Théorie appliquée des hélices



Très prochainement, je vous proposerai une méthode de dimensionnement de propulsion à la fois juste, c'est-à-dire représentative des phénomènes physiques en jeu, mais aussi facile d'utilisation et sans aucun besoin de calcul compliqué.
Pour y arriver, quelques bases de vocabulaire et de compréhension du fonctionnement de chaque composant d'une chaîne de propulsion seront nécessaires. Pour commencer, nous allons nous pencher dans cet article sur les hélices, puis viendront ensuite les moteurs, les accus et enfin l'avion lui-même, trop souvent oublié alors que c'est en réalité le maillon principal de la chaîne et sa finalité. L'hélice en est, dans l'ordre d'importance, le second maillon et surtout le plus mal compris, en plus d'être le plus complexe, et de loin. D'où le parti pris de commencer cette série d'articles par ce composant essentiel.

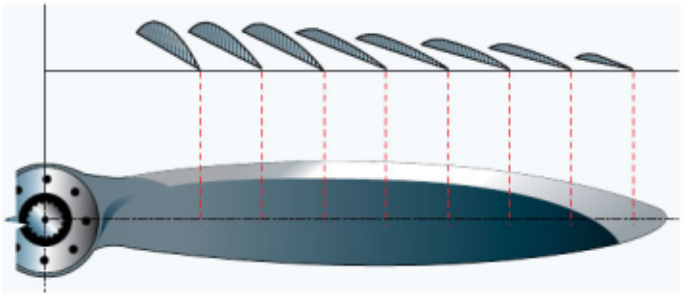
Quelques généralités sur le fonctionnement d'une hélice

Tout le monde sait à quoi ressemble une hélice, mais comment fonctionne-t-elle réellement ? On utilise souvent l'image d'un vissage dans l'air, mais cela reste très sommaire. On peut aussi citer d'autres manières de présenter les choses, cette fois plus précises, comme la troisième loi de Newton (accélération d'une masse d'air et réaction de sens opposée), le principe de Bernoulli (appliqué de proche en proche le long du profil de la pale) ou la théorie de Froude (application de Bernoulli au disque balayé par l'hélice), mais aucune ne donne de représentation pratique et intuitive à utiliser.

Pour aller à l'essentiel, il faut se concentrer sur les forces en présence et donc sur les phénomènes physiques à leur origine : les pales sont des ailes entraînées en rotation autour d'un axe par un moteur. Vu sous cet angle, le fonctionnement de l'hélice devient alors très simple à comprendre : ces ailes que sont les pales présentent une certaine incidence dans leur plan de rotation, ce qui engendre donc deux forces :

- une portance vers l'avant, c'est la traction de l'hélice, qui va entraîner l'avion ;
- une traînée qui s'oppose à leur avancement, c'est le couple résistif de l'hélice, nécessitant donc au moteur de fournir ce couple pour entraîner l'hélice.

Un peu plus subtil : étant chacune sur un rayon différent, les cordes d'une pale ne vont pas à



Source : Aerodynamic of Flight

la même vitesse linéaire (= régime de rotation x rayon), ce qui nécessite de caler leur profil avec un angle d'autant plus faible qu'on se rapproche du saumon (là où la vitesse est la plus élevée), cela s'appelle une évolution de vrillage.

On remarque l'importante section du pied de pale, indispensable pour la tenue mécanique car c'est là où se concentrent les contraintes engendrées par les efforts centrifuges, le couple et la traction. Avec, dans le cas de moteurs thermiques, une sollicitation supplémentaire : la forte variation de couple au cours d'une rotation à chaque cycle moteur, d'où la section bien plus importante des hélices thermiques par rapport aux hélices électriques. A noter aussi l'épaisseur du profil et la forme des pales, qui sont étudiées pour conserver une aérodynamique correcte à tous les régimes de rotation : en effet, sous l'effet des contraintes, en particulier la force centrifuge, la pale ne doit pas changer de forme sous peine de ne plus fonctionner correctement, ce qui en particulier nécessite de bien anticiper l'évolution du vrillage (on appelle cela le dévrillage).

A noter au passage que les profils des pales de nos hélices sont les mêmes que ceux des ailes de nos modèles : ClarkY, E193, NACAxxxx, etc.

NOTA : **nous parlerons par défaut ici des hélices bipales, les plus courantes et offrant le meilleur compromis rendement / facilité de réalisation / facilité d'équilibrage.**

Les principales dimensions

Par convention, les dimensions d'une hélice s'expriment ainsi : 9x6 = 9" de diamètre et 6" de pas, le pas étant mesuré à 75% du rayon de la pale. L'unité de base est donc le pouce, mais on trouve parfois des dimensions en mm (pour rappel : 1" = 25.4 mm).

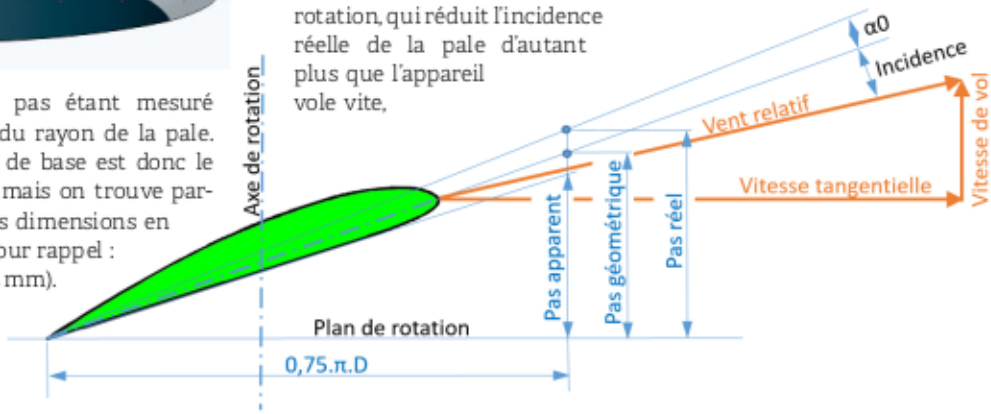
Concrètement, un pas de 6" (152 mm) veut dire que la pale avance théoriquement à hauteur de 152 mm par tour. Traduit en vitesse, mettons par exemple à 12000 tr/min, cela fait donc 30.4 m/s (ou 109 km/h), c'est ce qu'on appelle la vitesse de pas, V_pitch en anglais, ou vitesse de transparence en langage aéronautique. Cette vitesse n'est pas exactement la vitesse de l'air en sortie de l'hélice au sol, qui est moindre, mais la vitesse de vol à laquelle l'hélice ne fournit plus de traction.

Attention, les constructeurs n'indiquent quasiment jamais le pas réel de l'hélice, mais :

- Soit le pas apparent, donné par l'angle entre l'intrados du profil et le plan de rotation de la pale. C'est généralement les cas des hélices de grandes dimensions, notamment celles taillées en bois.
- Soit le pas géométrique, donné par l'angle de la corde du profil, c'est-à-dire l'incidence. C'est le cas des hélices les plus courantes : Graupner, APC, Master, etc.
- Soit le pas réel, appelé aussi pas effectif, c'est le cas le plus rare, comme sur certaines GWS HD.

Le seul pas qui nous intéresse est le pas réel, car c'est lui qui donne le V_pitch réel de l'hélice. Ce pas est le pas aérodynamique, c'est-à-dire la somme du pas géométrique et de l'offset de pas donné par l'angle de portance nulle du profil de pale (exactement comme pour une aile).

On remarquera sur le graphique ci-dessous la notion de vent relatif, composition de la vitesse de vol et de la vitesse de rotation, qui réduit l'incidence réelle de la pale d'autant plus que l'appareil vole vite,



jusqu'au moment où l'incidence atteint le pas réel (vitesse de vol = V_pitch) : la pale ne fournit alors plus de portance, et la traction d'hélice est donc nulle (mais pas la puissance consommée, à cause de sa traînée).

La vitesse de pas réelle d'une hélice est donc, sauf exception, toujours supérieure à celle calculée à partir du pas constructeur, ce qui explique que certains avions puissent aller plus vite que cette dernière (infirmant donc la croyance que la vitesse de vol d'un modèle est toujours d'environ 80% du V_pitch calculé avec le pas constructeur). Par exemple, pour une 9x6, le pas réel (et donc V_pitch en conséquence) est généralement d'environ 15% plus grand.

Une règle empirique issu des travaux de Guillaume Rouby et de votre serviteur donne de bons résultats pour les hélices les plus courantes :

Pas réel = 0.85 x Pas constructeur + 0.2 x Diamètre

Une remarque concernant les hélices repliables, qui peuvent être montées sur des porte-pales de différents diamètres : le diamètre à prendre à compte n'est pas celui indiqué sur les pales mais le diamètre réel, tandis que le pas réel est lui aussi modifié, de la même proportion que le diamètre (versus le diamètre de base). Par exemple, une hélice 10x5 montée sur un cone l'agrandissant à 10.5", soit 5% de plus de diamètre aura un pas augmenté d'autant, soit un pas réel de 5.25".

Certains constructeurs proposent aussi des porte-pales inclinés pour recaler angulairement les pales, c'est-à-dire modifier le pas. Si le calage est indiqué en degré, il faut faire un peu de trigonométrie pour calculer le pas réel. S'agissant d'angles faibles, l'approximation suivante est suffisante : *pas réel = pas d'origine + calage x 0.041 x diamètre*. Par exemple, une hélice 10x5 recalée de +2.5° aura donc un pas réel d'environ 6".

Les principales notions physiques à retenir

Un rappel des principaux concepts liés aux hélices bien ancrés dans notre culture modéliste :

- Les hélices pour moteurs thermiques ont un moins bon rendement que celles pour les électriques ;
- les hélices « modernes » à pales « travaillées » ont un meilleur rendement que les « anciennes » ;
- une grande hélice a un meilleur rendement qu'une petite ;
- le rendement d'une hélice donnée est une constante.
- c'est la traction statique qui importe ;
- les « ducted fans », ou turbines, (en fait des hélices carénées) ont un mauvais rendement.

Eh bien, tout cela est complètement faux !
La réalité est tout autre :

- les hélices électriques sont juste plus légères que leurs homologues thermiques (car moins sollicitées mécaniquement) ;
- les hélices « historiques », comme les Graupner Super Nylon ou les Master Airscrew, sont aussi performantes que les « modernes » CAM et autres ;
- le rendement d'une hélice ne dépend pas de son diamètre, mais en premier lieu de la vitesse de vol et du ratio pas / diamètre ;
- ce même rendement est nul au sol et maximal à une certaine vitesse de vol ;
- c'est la traction à la vitesse de vol qui importe (notion de puissance = traction x vitesse) ;
- les turbines ont le même rendement que les hélices équivalentes... contrairement aux avions qu'elles équipent, à l'énorme traînée, d'où un besoin en puissance très important ;
- au passage, on peut aussi ajouter que le rendement d'une hélice grandeur est du même ordre de grandeur que celui de nos petites hélices *(voir ci-après)*.

Pourquoi un tel écart entre les faits et notre (in)culture ? L'esprit humain aime simplifier les choses pour mieux se les approprier, mais il va parfois trop loin : ici, l'erreur est de faire l'amalgame entre la force de traction (très concrète et accessible directement à nos sens) et le rendement, ce dernier faisant appel à des notions de puissance, bien plus abstraites (puissance = produit force x vitesse, couple x régime ou tension x intensité).
Or, si on se rappelle bien nos cours de physique de seconde, une force statique, comme une masse posée au sol, ne produit strictement aucun travail ni puissance. Pour en produire, il faut qu'il y ait un mouvement causé par cette force. Pour faire une analogie, c'est la même chose en automobile, on fait souvent la confusion entre couple et puissance moteur, ce qui n'est pas la même chose. Il suffit de comparer un utilitaire diesel à une sportive pour saisir la différence, pourtant le couple moteur est similaire. Sur nos avions, le résultat pratique à retenir est simple : pour une puissance moteur donnée, ce n'est certainement pas l'hélice qui tire le plus fort au sol qui donne le meilleur résultat, mais celle qui tire le plus fort à la vitesse de vol. Et cette petite subtilité change tout...
Donc, attention aux simplifications trop poussées. Sans lien avec la logique qui a permis de l'obtenir, un résultat ne vaut pas grand-chose, et peut même être complètement faux s'il est utilisé hors de son contexte de détermination. Ne pas se contenter bêtement des résultats et comprendre d'où ils viennent est donc essentiel, c'est la base même d'une approche scientifique. Pour illustrer cette réflexion : tout le monde sait que Pi vaut 3.14 et une infinité de décimales, mais pour autant le plus important n'est pas tant sa valeur que le fait d'être le ratio entre le périmètre et le diamètre d'un cercle.
Pour revenir à nos moutons : du point de vue physique, l'hélice est donc un transmetteur de puissance, elle transforme la puissance mécanique à l'arbre moteur (= couple x régime) en une puissance mécanique utile (= traction x vitesse de vol), avec une certaine perte au passage (en échauffement de l'air par friction ou turbulence). Cette dualité puissance / rendement est une notion à bien assimiler car, plutôt que les forces, on préférera manipuler des puissances (= force x vitesse). Ici, il s'agit principalement de : taux de montée x poids, vitesse de vol x traînée, couple moteur x régime moteur, traction hélice x vitesse de vol, tension accu x intensité. Cela fait un peu peur dit ainsi, mais cela permet d'éviter bien des calculs fastidieux, grâce à la manipulation de rendements, et donc permet d'aller simplement et efficacement aux résultats les plus intéressants.
Pour bien appréhender ces notions, et cela sans rentrer dans la théorie des hélices (Froude, étude de profils, simulations CFD, etc.), assez hermétique, l'essentiel est de savoir lire une polaire d'hélice, qu'elle soit expérimentale ou calculée. C'est un peu le même principe que les polaires d'un profil, avec des variables différentes et, vous le verrez, ce n'est pas si sorcier.

Les polaires d'hélices

Comme c'est le cas pour les profils ou les ailes, où des coefficients (Cz, Cx, etc.) sont préférés aux forces physiques en jeu, les hélices sont étudiées par le biais des coefficients qui les décrivent, ici en termes de traction et de puissance. Cela semble plus compliqué de prime abord, mais s'avère très intéressant car permettant de faire des comparaisons adimensionnées, c'est-à-dire sans se soucier des dimensions de l'hélice (vu qu'une petite hélice peut faire le même travail qu'une plus grande, dans certaines limites que nous détaillerons). D'apparence moins simple à manipuler que les grandeurs physiques accessibles à nos sens, ces coefficients sont donc bien plus efficaces pour choisir une hélice.
Toujours dans un souci de comparaison adimensionnée, toutes les courbes de fonctionnement d'hélices sont construites par rapport à une variable, le facteur d'avancement noté J, qui traduit la vitesse de vol. Intuitivement, on pourrait imaginer que J représente le ratio vitesse de vol / V_pitch, allant donc de 0 à 1, mais encore faudrait-il connaître V_pitch (= pas réel x régime). Grâce à l'astuce qui consiste à remplacer dans ce facteur le pas par le diamètre, J devient une notion bien plus intéressante, à défaut d'être intuitive. En effet, un point remarquable : la valeur maximale (J_max) que le facteur d'avancement J peut atteindre (quand V = V_pitch) correspond au ratio entre le pas réel et le diamètre de l'hélice. Ce qui permet donc de calculer directement le pas réel, que l'on appellera P_aéro, à partir du diamètre.

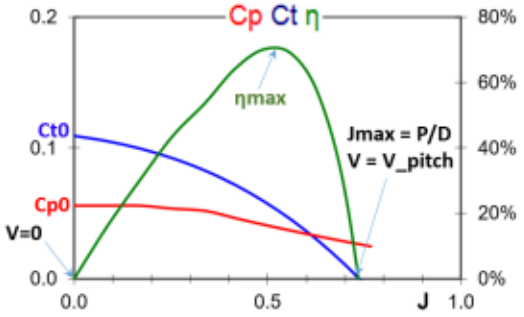
Les notions et conventions symboliques à retenir sont les suivantes :

- V = vitesse de vol
- D = diamètre
- P_géo = pas géométrique (incidence du profil dans le plan de rotation à 75% du diamètre)
- P_aéro : pas réel du profil… quasiment jamais donné par les fabricants
- V_pitch (vitesse de pas en anglais) = vitesse de vol à traction nulle
- J = facteur d'avancement de 0 (V = 0) à Jmax (V = V_pitch)
- Jmax = facteur d'avancement maximal de l'hélice (= P_aéro/D)
- Ct = coefficient de traction
- Cp = coefficient de puissance
- Ct0 et Cp0 : coefficient en statique (V = 0)
- η (êta) = rendement (= puissance transmise à l'avion / puissance à l'arbre)
- T = traction
- N = régime d'arbre
- C = couple d'arbre
- P = puissance à l'arbre (= C.N)
- T0, P0 et N0 : valeurs en statique (notées aussi T_stat, P_stat et N_stat)
- ρ (rhô) = masse volumique de l'air (environ 1.2 kg/m³)

Les équations associées sont les suivantes :

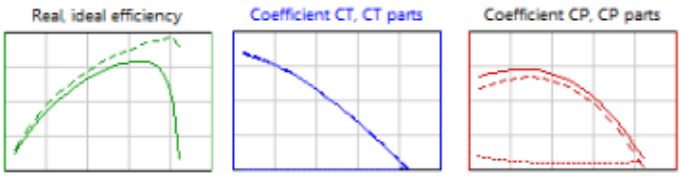
$$T = \rho . N^2 . D^4 . C_T \qquad P = \rho . N^3 . D^5 . C_P \qquad J = \frac{V}{N . D} \qquad \eta = J . \frac{C_T}{C_P} = \frac{T.V}{P}$$

Maintenant, nous pouvons enfin découvrir à quoi ressemble une polaire d'hélice, ici pour une 9x6 (simulation numérique PredimRC)

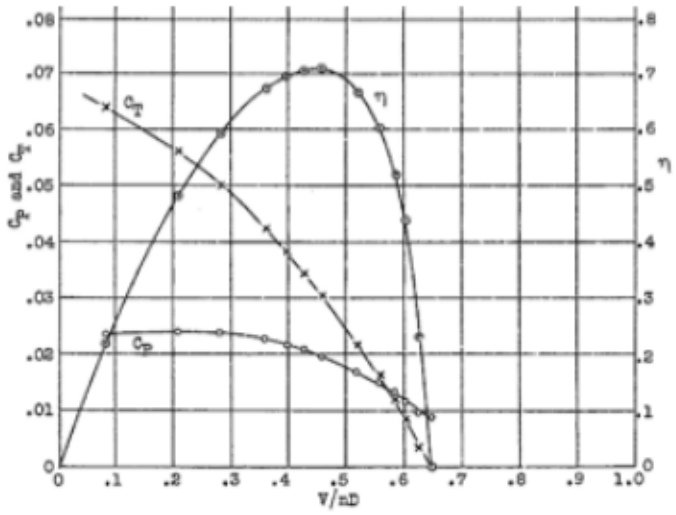


Et la même chose en force de traction et puissance (simulation numérique PropCalc)





Et, pour comparer, une polaire grandeur (extrait du NACA TN333)



On en retire les enseignements suivants :

➡ Le rendement d'hélice est maximum à une certaine vitesse de vol, et s'écroule en dehors. Un mauvais choix d'hélice (précisément un pas trop faible ou trop fort par rapport au domaine de vol de l'avion) peut donc être calamiteux pour le rendement propulsif de l'avion. Donc, à chaque avion une hélice bien adaptée, il n'y a pas de recette miracle et générique.

➡ La traction est maximale à vitesse nulle (condition statique = à l'arrêt au sol), c'est T_stat. Elle reste ensuite relativement constante jusqu'à une certaine vitesse, puis diminue jusqu'à V_pitch. Dans certains cas (hélice à très fort pas), la traction est plus faible au sol puis remonte avec la vitesse de vol avant de diminuer, c'est typique d'un phénomène de cavitation que l'on rencontre par exemple sur certaines turbines très poussées et les hélices de compétition F5D. Dans ce cas, il ne faut surtout pas se fier à la traction statique, qui ne veut rien dire avec ces hélices.

➡ Le couple suit le même type de courbe, à la différence près qu'il n'est pas nul à V_pitch, à cause de la traînée intrinsèque de l'hélice (comme une aile à portance nulle). Il devient nul à une vitesse plus élevée, à partir de laquelle c'est l'avion qui fournit de la puissance à l'hélice (windmilling), par exemple en piqué.

➡ Le point où la traction est nulle, J_max, correspondant à P/D, vaut ici 0.73. Le pas réel de cette hélice 9x6 est donc de 9x0.73 = 6.6".

Nota : **on pourra comparer ces simulations avec les polaires réelles qui suivent, et constater que nos logiciels de calcul sont très proches de la réalité. Faut-il rappeler une évidence : une théorie ne vaut que si elle décrit correctement la réalité, nul besoin donc dans le cas présent de mettre en opposition théorie et pratique.**

Où trouver des polaires d'hélice ?

Tout cela est bien joli, mais alors pour bien faire il faudrait disposer des polaires de nos différentes hélices ! Impossible ? Eh non, car internet recèle bien des trésors, et cela gratuitement.

Trois approches sont possibles (liens ci-après) :

- soufflerie réelle : UIUC, BART, WSU, Aerotrash, etc., qui recensent un grand nombre de polaires d'hélices modèles réduits testées en conditions réelles d'utilisation. Certains constructeurs sérieux fournissent aussi les polaires de leurs hélices, comme par exemple APC (même si elles sont parfois un peu surévaluées).
- Soufflerie numérique : PropCalc (Helmut Schenk) et JavaProp (Martin Hepperle), qui simulent numériquement l'aérodynamique des hélices que l'on y modélise.
- Corrélation numérique : PredimRC (Franck Aguerre) et TetaCalc (Guillaume Rouby, dont les publications sur les hélices sur son blog sont remarquables), qui utilisent des modèles numériques basés sur les mesures en soufflerie réelle, notamment celles de l'UIUC.

À noter que les outils classiques comme eCalc ou DriveCalc n'intègrent généralement pas ces mesures ou ces modèles numériques, tout simplement parce qu'ils ne calculent que la condition statique au sol (V=0). Contrairement à ce qu'ils laissent parfois supposer, ils ne servent

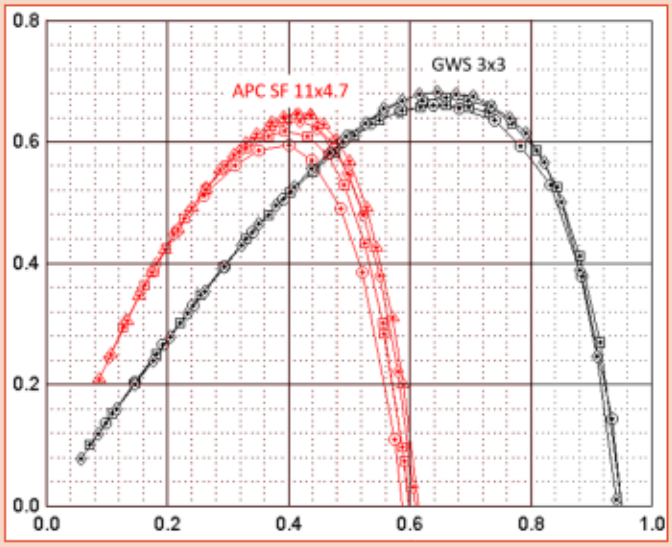
en effet qu'à simuler le groupe motopropulseur au point fixe et ne sont pas faits pour estimer ce qu'il se passe en l'air. Pour cela, il faudrait modéliser l'aérodynamique de l'avion, ce qui n'est pas le cas. Tous les simulateurs de chaîne de motorisation ne se valant pas non plus, ma préférence va à DriveCalc, gratuit et bien plus juste qu'eCalc, aux résultats souvent fantaisistes.

Analyse des polaires

Ainsi « armés », nous pouvons maintenant non seulement tordre le cou définitivement aux idées reçues mais surtout bien cerner les facteurs influant sur le fonctionnement d'une hélice. Ou plutôt, pour être précis, les facteurs influant sur l'adaptation de l'hélice au domaine de vol du modèle à équiper, ce qui est bien la finalité recherchée.

Pour cet exercice, nous utiliserons uniquement des polaires réelles données par l'UIUC, de manière à clore toute discussion inutile sur la validité des résultats obtenus. On notera que ces polaires comprennent plusieurs courbes pour une hélice donnée, il s'agit simplement de différentes conditions expérimentales. En règle générale, ces courbes sont identiques ou presque, ce qui montre que le fonctionnement d'une hélice est peu sensible à ces conditions. Seuls quelques cas particuliers présentent une certaine disparité, l'explication sera donnée ci-après dans le paragraphe traitant de la largeur des pales.

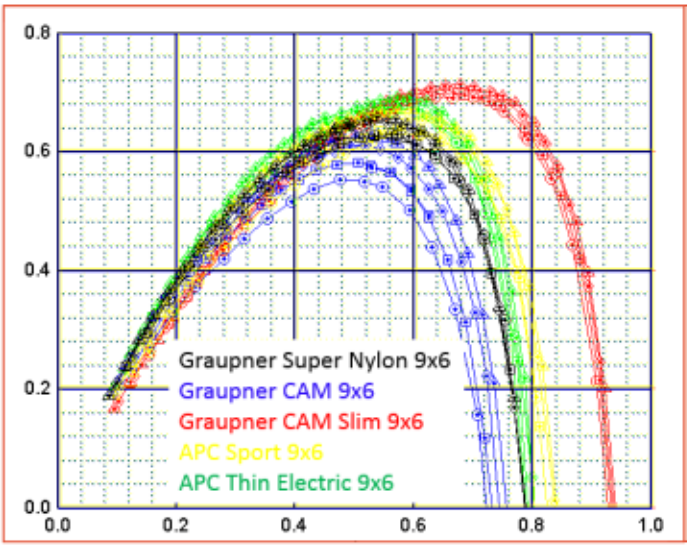
Rendement maximum en fonction du diamètre



On en retire les enseignements suivants :

➡ La minuscule GWS de 3 pouces de diamètre et de forme de pale d'apparence basique a un meilleur rendement maximum (environ 0.66 versus 0.62) que la presque 4 fois plus grande APC Slow Fly de 11 pouces.

➡ La 3x3 a aussi beaucoup plus d'allonge (J_max = 0.95 versus 0.6) que la 11x4.7.



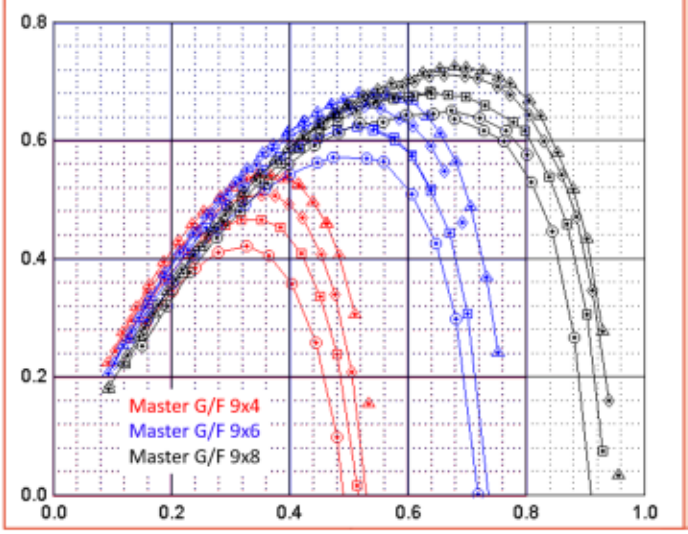
Rendement en fonction de la technologie, pour une taille d'hélice donnée

On en retire les enseignements suivants :

➡ Pas de différence majeure : l'antique Super Nylon, tout comme la Master G/F, sont largement équivalentes aux hélices « modernes ». La Graupner CAM est même en retrait par rapport à la Super Nylon. Attention toutefois de ne pas généraliser, toutes les hélices anciennes ne sont pas forcément au niveau de celles étudiées ici.

➡ Seule la Graupner CAM Slim 9x6 semble bien meilleure, mais c'est en fait une 9x8 (J_max = 0.92), ce qui explique son meilleur rendement (voir ci-après).

➡ A noter que le pas réel de toutes ces hélices, mis à par la CAM Slim, est de 7 pouces (J = 0.8 * Diamètre = 9). Le pas de 6" annoncé est le pas géométrique, c'est-à-dire l'incidence du profil dans le plan de rotation de l'hélice. V_pitch est donc plus élevé que ce que donnent les calculateurs basiques comme eCalc, qui utilisent le pas géométrique.



Rendement en fonction du pas, pour un diamètre donné

On en retire les enseignements suivants :

➡ Le rendement et la plage de rendement élevé s'améliorent très nettement quand le pas augmente, ou plus précisément quand le rapport pas /diamètre augmente.

➡ Ici, l'hélice la plus « carrée » (rapport pas/diamètre proche de 1) couvre les basses vitesse de vol aussi bien que celle qui a le pas le plus faible, et fait bien mieux tant en rendement maximum (environ 70% versus 50%...) qu'en plage d'utilisation ou vitesse maximum (le double...).

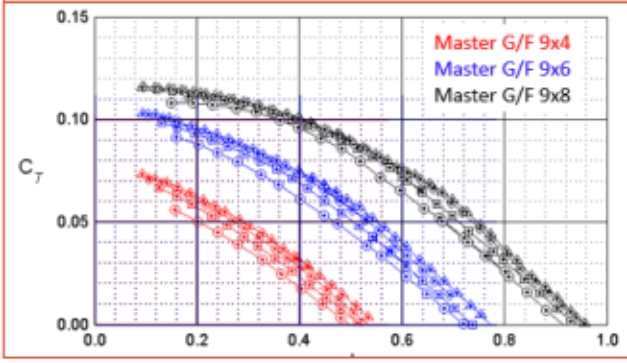
➡ Sur ces hélices, la disparité des mesures en fonction des conditions expérimentales est assez large, la faute aux Reynolds un peu faibles des conditions d'essai les plus basses. Ce phénomène disparaît aux Reynolds plus élevés auquels sont destinés ces hélices (voir ci-après le paragraphe traitant de la largeur des pales).

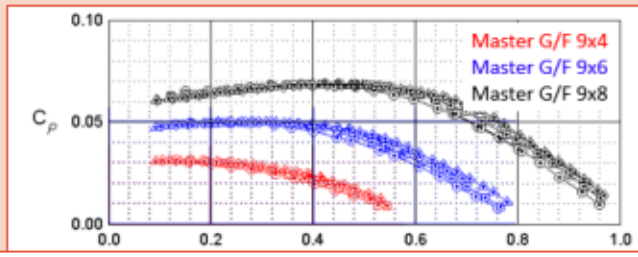
Traction et puissance en fonction du pas, pour un diamètre donné :

On en retire les enseignements suivants :

➡ C'est l'hélice avec le plus de pas qui tire plus et surtout qui a plus d'allonge, c'est-à-dire qu'elle fournit une traction plus importante à vitesse de vol plus élevé. Et c'est cela qui fait avancer un avion, pas la traction statique.

➡ En contrepartie, elle consomme plus de puissance pour un régime donné. On note même que la puissance consommée par la 9x8 augmente avec la vitesse de vol, ce qui est de prime abord contre-intuitif mais s'explique par le fort pas de l'hélice, avec un décrochage partiel à faible vitesse de vol. L'écoulement se recolle ensuite avec l'augmentation de la vitesse de vol, et donc la réduction de l'incidence de la pale.





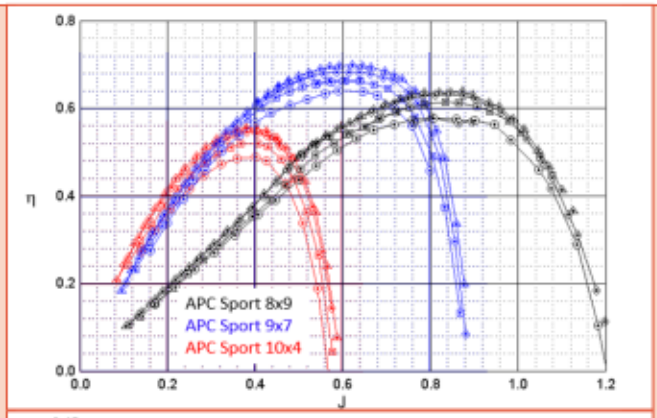
Traction et rendement, pour une puissance et un régime donnés :

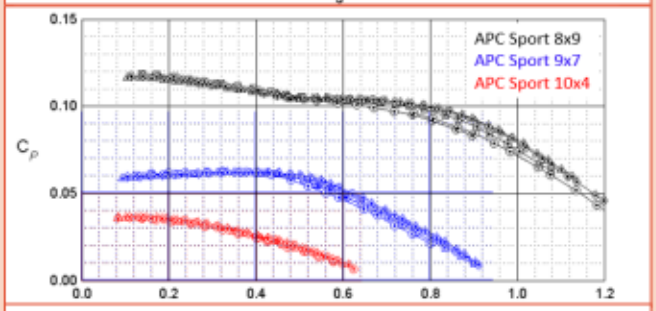
Cette fois, on compare les hélices consommant la même puissance à un régime donné, c'est-à-dire avec un produit Cp0*D^5 identique, ce que l'on obtient en jouant à la fois sur le diamètre et le rapport P/D.

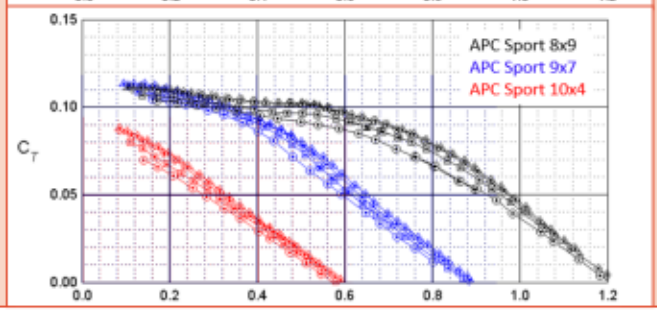
Pour rester dans la continuité des comparaisons précédentes, j'ai retenu trois hélices relativement proches de la série APC Sport :

- 8x9 : Cp0 = 0.110 => Cp0. D^5 = 3600
- 9x7 : Cp0 = 0.058 => Cp0. D^5 = 3525
- 10x4 : Cp0 = 0.035 => Cp0. D^5 = 3500

Sur ce dernier graphique, il ne faut pas oublier que la traction est en Ct.D^4. Pour faire simple, sachant qu'en statique ces trois hélices ont un Ct0 d'environ 0.1 à 0.12, considérons que la traction de l'hélice 8x9 est de 1 : alors celles des 9x7 et 10x4 sont respectivement 1.4 et 2.2 (ratio des diamètres exposant 4).







On en retire les enseignements suivants :

➡ Pour une puissance donnée, c'est l'hélice qui a le diamètre le plus fort (et donc le ratio pas/diamètre le plus faible) qui tire le plus fort au sol, et de loin.

➡ Et pourtant, ce n'est pas elle qui donnera le meilleur résultat en vol : ici, la 9x7 englobe le domaine de fonctionnement de la 10x4, avec un rendement identique à faible J, et fait bien mieux à J plus élevé. Seule exception : le vol 3D où la traction statique importe au premier ordre.

➡ On pourrait penser que, le coefficient CP de l'hélice à P/D faible chutant vite, la consommation du moteur diminuera d'autant, au bénéfice de l'autonomie. C'est vrai, mais comme c'est avec un rendement faible, le résultat est moins bon qu'avec les autres hélices dont on modulerait le régime (la commande des gaz n'étant généralement pas un interrupteur tout ou rien…).

➡ Le rendement maximum chute un peu quand le ratio pas/diamètre dépasse un (hélice dite « carrée »), qui est généralement l'optimal pour le rendement.

Limitations et adaptation d'une hélice

On a vu précédemment que la taille d'hélice ne joue pas sur son rendement maximum. Pourquoi dans ce cas ne pas utiliser une toute petite hélice sur un gros avion si elle fait le même travail ? Le bon sens nous dit que ça ne fonctionnera pas, mais c'est encore mieux en disant pourquoi.

L'adaptation de l'hélice au domaine de vol

Le choix du diamètre, à iso ratio P/D (ce dernier étant choisi pour avoir le meilleur rendement d'hélice, voir ci-avant), va positionner la vitesse de vol où le rendement de l'hélice est le plus élevé. Suivant le résultat attendu (par ex. : avoir le meilleur taux de montée possible, ou la meilleure vitesse de pointe, ou la consommation la plus faible à une vitesse donnée), l'hélice la mieux adaptée n'aura pas donc la même taille. En effet, pour une puissance donnée, en N^3.D^5, quand on réduit le

diamètre d'hélice N augmente proportionnellement plus vite que D ne diminue, et inversement. En conséquence, le produit N.D augmente quand on réduit le diamètre d'hélice, ce qui positionne Jmax à une vitesse de vol plus élevée pour une petite hélice et moins élevée pour une grande hélice. On aura donc tout intérêt à utiliser une grande hélice pour privilégier le taux de montée, et une petite pour aller vite.
Voilà qui devrait faire dire à certains « ah, j'avais raison, plus l'hélice est grande et mieux c'est ! » Mais, faut-il encore le marteler, ce n'est pas -contrairement à l'intuition commune- une question de rendement maximum de l'hélice, qui ne dépend que de P/D, mais de positionnement de ce rendement dans le domaine de vol de l'appareil à équiper. Positionnement qui n'est d'ailleurs pas binaire : par ex., si on cherche le meilleur taux de montée possible, pourquoi ne pas prendre à la lettre l'affirmation qui précède et utiliser des hélices d'une taille disproportionnée ? Or, au-delà d'un certain diamètre qui dépend de la puissance à passer, le taux de montée ne s'améliore pas, voire régresse, tandis que la plage d'utilisation devient tellement réduite que le vol au moteur devient impossible en palier, seul le vol pendu à l'hélice étant possible. De plus, chercher à trop augmenter le diamètre va poser des problèmes de taille moteur et/ou réducteur, et donc de masse, ce qui va à l'encontre du résultat recherché. Donc, comme bien souvent, tout est affaire de compromis, il faut étudier les choses dans leur ensemble et ne pas se contenter de recettes réductrices.
Nous détaillerons cela dans le chapitre traitant de l'exploitation pratique des polaires d'hélice.

La puissance maximale transmissible

Plus on veut passer de puissance avec une hélice donnée, et plus il faut la faire tourner vite. Et cette vitesse ne peut pas augmenter à l'infini, car deux limites se rappelleront à l'ordre avant : la tenue mécanique à la force centrifuge et la limite de vitesse sonique en bout de pale (environ 340 m/s à 15 °C). Généralement, les fabricants sérieux (APC, Graupner, Aeronaut, GWS, Master Airscrew, etc.) indiquent le régime maximum à ne pas dépasser pour chaque type d'hélice, généralement sous la forme : Nmax = coefficient / diamètre. Voir par exemple :
https://www.apcprop.com/technical-information/rpm-limits/
Pour les autres hélices fournies sans indication, les règles APC peuvent être reprises sans trop de risque (diamètre en pouces) :

- Thermique : 190000 / diamètre
- Électrique : 150000 / diamètre
- Repliable : 120000 / diamètre
- Électrique affiné (type GWS HD) : 100000 / diamètre
- SlowFly : 65000 / diamètre

L'interaction de l'hélice avec son environnement

Plusieurs effets d'intégration sont à noter :

- Effet du cône : un gros cône, en recouvrant une partie de l'hélice normalement active, va détériorer son fonctionnement. De plus, le cône lui-même dissipe une certaine puissance par friction avec l'air, qui peut être loin d'être nulle quand le régime est élevé. Les artifices de ventilation, comme ceux des cônes dits « turbo », prélèvent aussi de la puissance : sur un cône Ø57, j'ai par exemple mesuré 15 W de perte à 15000 tr/min. Sur une motorisation de 300 W, c'est déjà 5% de perdu, soit autant que la différence de rendement entre un moteur de qualité et un moteur tout venant.
- Effet du capot : un gros capot va interférer avec l'air brassé par l'hélice, il va le dévier et/ou le freiner, dont altérer le fonctionnement de l'hélice. C'est typiquement le cas des GeeBee, par exemple.
- Effet de culot : c'est le cas des canards à hélice propulsive, dont la traînée de fuselage est importante à cause du cône placé à l'aval, exactement comme pour une aile dont le profil serait inversé, avec le bord d'attaque à la place du bord de fuite.
- Effet du sillage : quand l'hélice est placée en aval de l'aile ou d'un pod sur le fuselage, l'hélice « frappe » le sillage de ces éléments, ce qui génère un bruit très marqué, en plus d'une légère perte de rendement et d'un risque de fatigue des pieds de pale.

Pales larges ou normales ?

À l'image d'une aile, l'adaptation aux faibles Reynolds (c.a.d, pour une hélice, une faible vitesse de rotation) passe par l'utilisation de profils fins (en épaisseur relative) et de cordes importantes. C'est justement le cas des hélices dites « slow fly », dont la forme caractéristique répond à cet impératif.
Revers de la médaille, ces hélices ne sont pas adaptées aux régimes de rotations plus élevés : leur conception les rend mécaniquement moins robustes que les hélices classiques et, dès qu'on les charge, leur faible allongement pénalise leur traînée induite (traînée marginale), donc leur rendement.
Il est donc erroné de croire que ces hélices sont « meilleures » dans l'absolu que les hélices classiques, chacune a un domaine de fonctionnement optimal propre.

Effet du nombre de pales

L'intérêt d'un grand nombre de pales, comme par exemple sur l'A400M, est de pourvoir passer plus de puissance avec un diamètre donné. Cela permet d'avoir un diamètre d'hélice plus petit que celui d'une hélice bipale classique, ménageant ainsi la garde au sol.
À notre niveau, on raisonne donc en équivalence, à puissance et régime donnés, de l'hélice bipale qui sert de référence. Comme c'est le pas qui donne la vitesse de vol, l'équivalence se fait en réduisant le diamètre, sans toucher au pas, avec la règle suivante :
$D2 = D1 . (Nb1 / NB2)^{0.25}$
Avec D le diamètre et Nb le nombre de pales.
Donc, il faut enlever 10% de diamètre pour passer de 2 à 3 pales, et 16% de 2 à 4. Par exemple, les équivalents d'une bipale de 10" de diamètre seront donc une tripale de 9" ou une quadripale de 8.4". Le seconde taille n'est pas courante, on choisira alors le diamètre inférieur le plus proche, ici 8".
En grandeur, le rendement ne change pas avec le nombre de pales. Par contre, à nos échelles, on constate une perte moyenne d'envion 5% de rendement par pale supplémentaire à iso-diamètre. Mais comme on raisonne à iso- régime, le diamètre est plus faible (versus l'hélice bipale équivalente) ce qui augmente le rapport P/D, donc le rendement. Du coup, le rendement final d'une multipale reste similaire à celui de la bipale équivalente, avec l'avantage d'une plus faible garde au sol.

Recouper une pale, bonne ou mauvaise idée ?

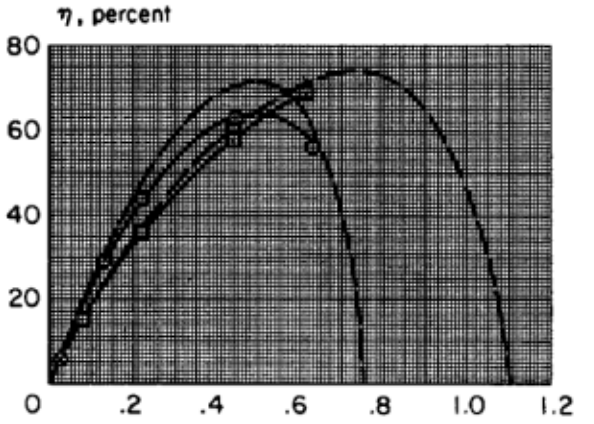
Même si cela s'est largement pratiqué à une époque, pour adapter l'hélice au plus près du point de puissance max du moteur, ce n'est pas l'idéal pour l'aérodynamique de l'hélice. En effet, cette modification va « casser » la répartition de portance de l'hélice et augmenter la traînée marginale, exactement comme ce serait le cas d'une aile elliptique qu'on tronquerait sauvagement, ce que personne ne ferait, soit dit au passage. Alors pourquoi infliger le même traitement à une hélice ? D'autant plus que le choix ne manque pas aujourd'hui pour trouver l'hélice la mieux adaptée.
De plus, on le verra plus tard, c'est aussi une mauvaise idée que trop faire mouliner un moteur au sol, car c'est en vol qu'on a besoin qu'il fonctionne à sa puissance maximum et non au sol.

Et pour les turbines ?

Une turbine, appelée « ducted fan » en anglais ce qui traduit bien son fonctionnement, est simplement une hélice caré-

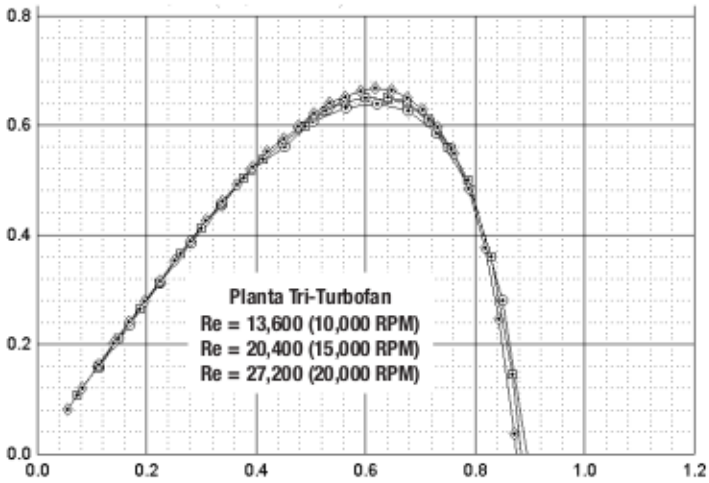
née... rien de plus. Vue globalement, c'est donc la même chose qu'une hélice, avec une traction favorisée si le pas est faible ou à l'inverse une poussée à vitesse élevée si le pas est important.
Le principal intérêt d'une turbine est de s'affranchir des problèmes d'écoulement marginal, celui-ci étant arrêté par la veine extérieure, ce qui est bénéfique au rendement. De plus, le flux est redressé en aval du rotor, supprimant ainsi la giration résiduelle propre à une hélice en veine ouverte, et améliorant là aussi le rendement.
Tout n'est pas si idyllique, car le principe même d'une turbine engendre aussi des pertes par friction et décollement le long de la veine d'air et au passage du redresseur de flux. Au final, contrairement aux idées reçues, le rendement d'une turbine est exactement du même ordre de grandeur que celui d'une hélice de caractéristiques équivalentes (au sens J_max faible ou important, suivant que la traction statique ou la poussée en vol est privilégiée). Tout dépend donc du ratio P/D. On retiendra aussi que les turbines à pas fort et à faible nombre de pales sont bien plus efficientes que celles à grand nombre de pales (tournent plus lentement à iso-puissance) et à faible pas (poussée statique privilégiée, donc Jmax faible), mais elles sont aussi bien plus adaptées aux vitesses de vol élevées qu'au vol lent. Bref, exactement le même raisonnement que pour les hélices.
Les deux documents suivants illustrent très bien ces aspects.

En grandeur, extrait du NASA TN D-4142 :



Ducted propeller thrust and power coefficient and propulsive efficiency with and without the exit vane at δ_V=α=0°.

En modèle réduit, essai d'une EDF Plantraco :



Exploitation pratique des polaires d'hélice

Le but est de positionner le domaine de fonctionnement de l'hélice sur celui de l'appareil à équiper. Cela passe par l'utilisation des formules ci-avant, en fixant le régime d'hélice ou, mieux, en fixant la chaînée de motorisation (sous-entendu : le régime moteur évolue en l'air).
Pour l'exemple, nous allons reprendre les trois hélices APC Sport étudiées précédemment. Par simplicité, ayant automatisé ces simulations dans le logiciel PredimRC, y compris l'évolution du régime moteur en vol, j'utiliserai ce dernier pour construire les graphiques qui suivent, ce qui permettra au passage d'introduire la courbe de traînée du modèle (ici un petit avion de 1 m d'envergure, surface 18 dm² et masse 1 kg).

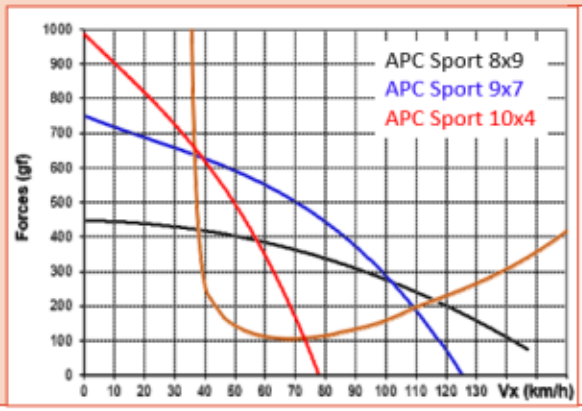
Le vol en palier plein gaz

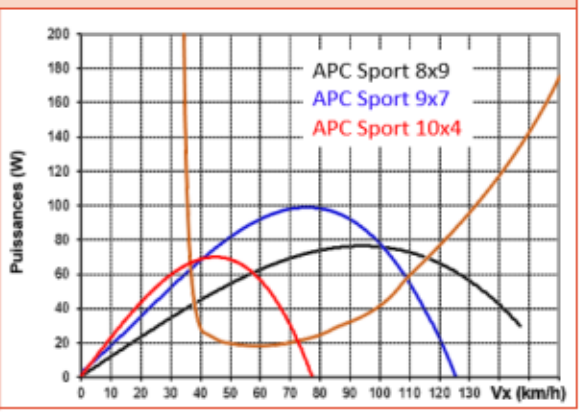
On peut présenter les choses sous deux formalismes différent, soit les forces soit les puissances. Les résultats sont identiques, mais chaque formalisme apporte un angle de vue différent et complémentaire de l'autre. Ici, j'ai fixé la puissance à 200 W (électrique), soit un régime d'environ 8500 tr/min pour ces hélices. La courbe orange est dans le premier graphique la traînée du modèle, puis dans le second graphique la puissance aéro dissipée par cette traînée, le tout en fonction de la vitesse de vol :

On en retire les enseignements suivants :

➡ On retrouve bien dans ces simulations les ratios de traction statique de 1.4 et 2.2 calculés avec les polaires d'hélices réelles. Idem pour les rendements, modulo celui du moteur (ici autour de 75%).

➡ Les vitesses de vol max en palier (72, 109 et 116 km/h), obtenues au croisement entre les courbes hélices et la courbe modèle, sont sensiblement supérieures au V_pitch cal-





culé avec le pas géométrique pour les 10x4 et 9x7 (52 et 91 km/h) et égales pour la 8x9 (117 km/h). Deux raisons à cela : d'une part, comme nous l'avons vu, le pas réel est supérieur au pas constructeur, et d'autre part le régime moteur augmente significativement en l'air. La règle communément admise d'une vitesse de vol égale à 80% du V_pitch, lui-même calculé avec le pas constructeur, n'a donc pas vraiment de justification réelle.

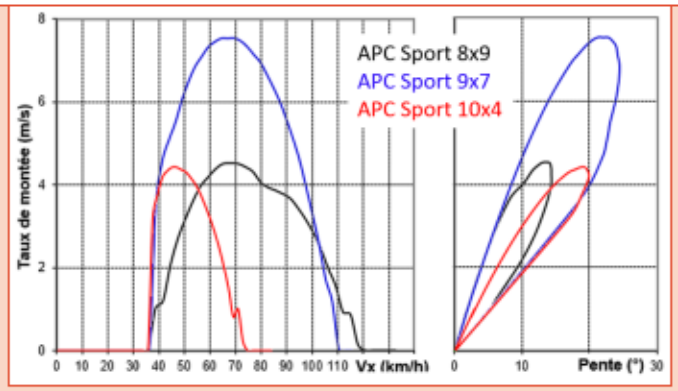
➡ La 10x4 tire le plus fort au sol mais cette traction s'effrondre dès que la vitesse augmente, avec un V_pitch apparent inférieur à 80 km/h. A contrario, la 9x7 tire bien moins fort au sol mais fait mieux dès 40 km/h, soit approximativement la vitesse de décrochage de l'appareil. La forte traction de la 10x4 est donc sans intérêt, puisque existant en dehors du domaine de vol de l'appareil.

➡ La 9x7 est aussi celle qui offre la plus grande réserve de traction (différence entre la traction que peut fournir le GMP plein gaz et celle nécessaire à équilibrer la traînée) sur la grande majorité du domaine de vol (entre le décrochage et le palier plein gaz), c'est donc elle qui offrira le meilleur agrément.

➡ Par rapport à la 9x7, la 8x9 permet de grapiller quelques km/h de vitesse de pointe (croisement avec la courbe de traînée du modèle), mais est moins polyvalente, avec moins de réserve de traction (ou de puissance, c'est idem) à basse vitesse.

Le vol ascendant

Ici, on regarde le taux de montée plein gaz, en fonction de la vitesse horizontale (à gauche) et de la pente de montée (à droite) :



On en retire les enseignements suivants :

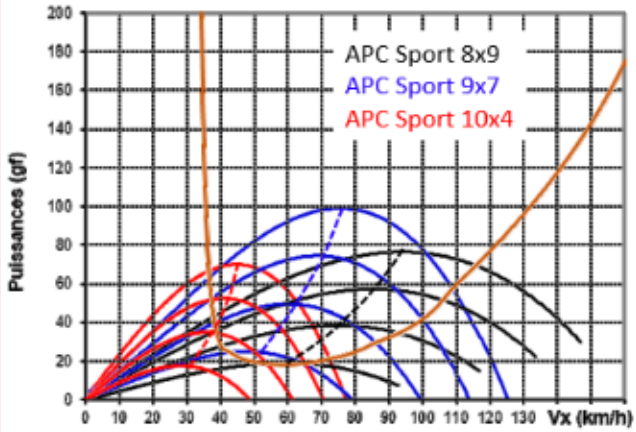
➡ La 9x7 permet de monter presque deux fois plus vite que les autres hélices, avec une pente optimale (ici environ 25°) bien plus importante. Pourtant, elle tire bien moins que la 10x4 au sol, mais c'est oublier que, même en montée, la vitesse de vol n'est pas nulle ; une forte traction statique n'est donc pas un critère pertinent de sélection d'une hélice.

➡ La 10x4 offre une pente de montée plus confortable (moins « pointue ») que la 8x9, qui au contraire offre une plage de vitesse horizontale plus étendue en montée. Dit autrement, la 10x4 permet de voler un peu plus « pendu à l'hélice », alors que la 8x9 demande de laisser filer sans freiner le modèle.

➡ Même si la traction de la 10x4 est égale au poids du modèle, elle ne permet pas de monter verticalement car elle doit aussi lutter contre la traînée (à cause de la vitesse de montée) en plus du poids.

Le vol en palier à régime partiel

Une autre approche consiste à tracer les courbes de puissance transmise par l'hélice aux régimes moteur intermédiaires, ici par pas de 25% de puissance à partir de l'exemple précédent, pour étudier le vol à régime partiel :



On en retire les enseignements suivants :

➡ Quelle que soit la vitesse de vol, la comparaison entre les hélices aboutit à la même conclusion que celle obtenue pour le vol plein gaz. Autrement dit, une hélice choisie soigneusement pour le 100% moteur est aussi bien adaptée au reste du domaine de fonctionnement : voilà qui simplifie grandement les choses , il suffit de considérer le plein gaz pour déterminer correctement une motorisation.

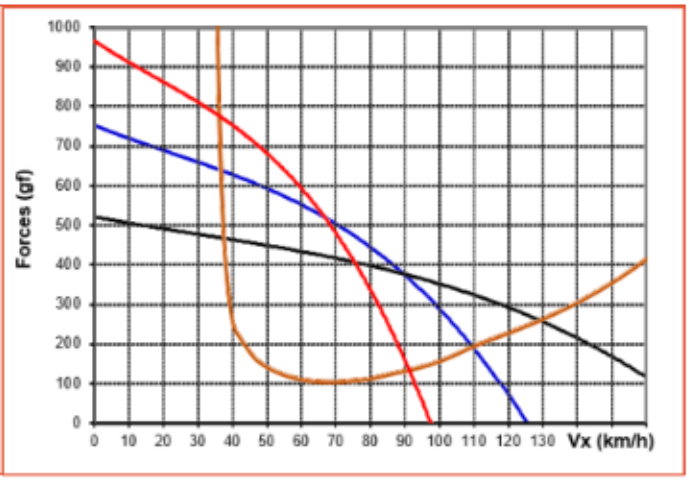
L'adaptation du diamètre d'hélice

Pour finir ce tour d'horizon, on va continuer à raisonner à puissance statique donnée, mais en variant le diamètre d'hélice de manière importante sans se soucier du régime (sous entendu, on trouvera un moteur et/ou réducteur capable). Seul le ratio P/D est fixé, ici à 0.8, car comme on l'a vu précédement, cette valeur donne le meilleur rendement maxi et la plage de rendement élevée la plus intéressante pour le vol courant.

Toujours en restant dans la gamme APC Sport, les hélices évaluées sont les 5.5x4.5, 9x7 et 13x10.

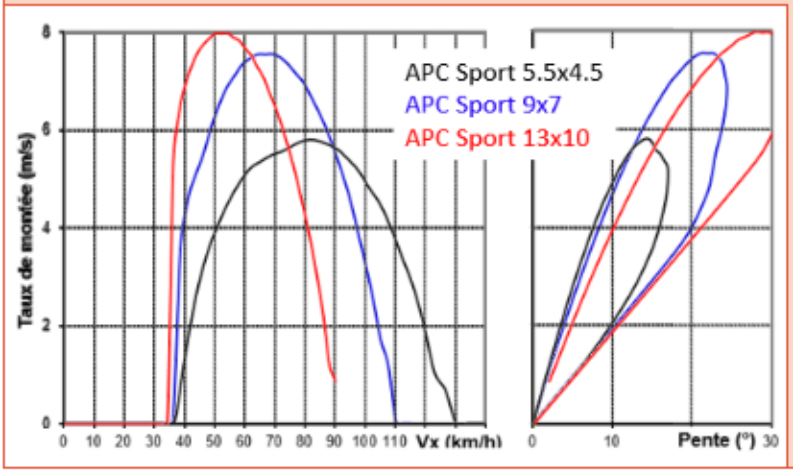
On en retire les enseignements suivants :

➡ Par rapport à la 10x4 vue précédemment, la 13x10 tire un peu moins au sol malgré son plus grand diamètre. Pourtant, c'est elle qui donne le meilleur taux de montée de toutes ces comparaisons, grâce à son ratio



P/D, le diamètre amenant le petit plus qui fait la différence par rapport aux deux autres hélices testées. Elle a aussi beaucoup plus d'allonge que la 10x4 et permet donc un vol bien plus confortable.

➡ L'effet du diamètre à iso P/D apparaît clairement, la 13x10 est la mieux adaptée à la phase de montée, la 9x7 au vol aux allures intermédiaires et la 5.5x4.5 à la vitesse de pointe.



➡ Le taux de montée maximum tend à stagner au fur et à mesure que le diamètre augmente, ce qui est logique puisque la puissance disponible est limitée et que le positionnement optimal du rendement maxi de l'hélice n'améliore pas pour autant ledit rendement. Si on traçait une courbe de ce taux de montée versus le diamètre, on verrait que, pour cet exemple, aller au-delà de 15" ne fait pas gagner en taux de montée et pénalise excessivement le reste du domaine de vol.

Il y aurait bien d'autres choses à dire sur ces graphiques, en particulier sur l'interaction entre le moteur et l'hélice, avec notamment l'évolution du régime de rotation et du rendement moteur en vol, nous y reviendrons en détail à la fin de cette série d'articles. Ce sera aussi l'occasion d'aborder le principe de pas variable, même s'il est peu courant en aéromodélisme.

En synthèse

Pour résumer l'essentiel de tout ce qui précède :

- le critère fondamental du choix d'une hélice est le ratio P/D, c'est lui qui définit le rendement de l'hélice et son adaptation au modèle à équiper. Par défaut, 0.8 est une valeur bien adaptée à la majorité des besoins courants, tandis que 1 conviendra aux appareils rapides et 0.6 aux appareils lents, voire moins pour le vol 3D pur et dur.
- le diamètre d'hélice se choisit pour adapter la vitesse de rendement maximum de l'hélice au domaine de vol du modèle, et cela dans des limites que sont la tenue mécanique au régime de rotation et l'intégration de l'hélice à la cellule.
- la largeur de pale et l'épaisseur relative du profil sont des critères d'adaptation au nombre de Reynolds : pale larges et fines pour les régimes réduits, pales plus étroites et plus épaisses pour les régimes élevés.
- les analyses et mesures en statiques sont parfaites pour tester un moteur mais ne sont d'aucune utilité pour savoir comment volera l'avion car, une fois en vol, la vitesse n'est jamais nulle... sauf cas particulier du torque-roll, évidemment ;-)

Quelques liens

https://m-selig.ae.illinois.edu/props/propDB.html
https://m-selig.ae.illinois.edu/pubs/UhligSelig-2008-AIAA-2008-407-PostStallProps.pdf
http://aerotrash.over-blog.com/article-les-helices-pour-les-nuls-88886705.html
http://aerotrash.over-blog.com/2015/01/calcul-de-la-poussee-d-une-helice.html
http://aerotrash.over-blog.com/2015/01/apc-propeller-data-what-s-new.html
http://aerotrash.over-blog.com/article-predimrc-et-ses-helices-123711974.html
http://www.aerodynamics4students.com/propulsion/blade-element-propeller-theory.php
https://www.slideshare.net/AnurakAtthasit/aircraft-propulsion-performance-of-propellers
https://www.mh-aerotools.de/airfoils/propuls1.htm
https://www.mh-aerotools.de/airfoils/pylonprops_1.htm
http://www.drivecalc.de/PropCalc
http://rcaerolab.eklablog.com/predimrc-p1144024

Conclusion

En espérant que ce premier article ait été pour vous une bonne découverte, je vous donne rendez-vous dans quelques semaines pour la suite.

Franck Aguerre
http://rcaerolab.eklablog.com/

Bibliographie

Wind Tunnel Investigation of the Effect of Duct and Cross-flow on Small Propellers for Unmanned Aerial Vehicles, David Serrano, University of Alberta, 2018
UIUC Propeller Data Site, John B. Brandt, Robert W. Deters, Gavin K. Ananda, and Michael S. Selig, University of Illinois, 2015
APC Propellers Performance Data, www.apcprop.com, 2014
Measurement of Static and Dynamic Performance Characteristics of Electric Propulsion Systems, Aron J. Brezina and Scott K. Thomas, Wright State University, 2013
Analytical/Experimental Comparison for Small Electric Unmanned Air Vehicle Propellers, Michael Ol, Cale Zeune and Michael Logan, Air Force Research Lab / NASA, 2012
Propeller Performance Data at Low Reynolds Numbers, J.B. Brandt and M.S. Selig, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2011
Model Airplance Propellers, W. B. Garner, 2009
Post Stall Propeller Behavior at Low Reynolds Numbers, Daniel V. Uhlig and Michael S. Selig, Department of Aerospace Engineering, University of Illinois, 2008
Static Testing of Micro Propellers, Robert W. Deters and Michael S. Selig, Department of Aerospace Engineering, University of Illinois, 2008
Small-Scale Propeller Performance at Low Speeds, M.S. Thesis, J.B. Brandt, Department of Aerospace Engineering, University of Illinois, 2005
Propeller Performance Measurement for Low Reynolds Numbers Unmanned Aerial Vehicule Applications, Thesis by Monal Pankaj Merchant B.S., Wichita State University, 2004
A wind-tunnel investigation of a 7-foot-diameter ducted propeller, B. Gamse and K.W. Mort, NASA Ames Research Center, 1967
Test of an adjustable pitch model propeller at four blade settings, Technical Note TN333, National Advisory Committee for Aeronautics, 1930