« PALE RIDER* »

Ce mois-ci, sans trop d'équations, les boires et déboires d'une pale ou quelques notions d'adaptation des hélices appliquées au paramoteur.

** Pour les cinéphiles, c'est un génial western de Clint Eastwood. Pour les anglophobes, traduit en français çà donne « le cavalier solitaire ». Pour tous les lecteurs de Vol Libre lassés de mes titres / jeux de mots approximatifs, celui-ci remporte la pale-me ! Il ne veut strictement rien dire.*

UNE AILE EN ROTATION

Les effets du diamètre et de la charge alaire ou « charge au disque » d'une hélice sur son rendement propulsif nous ont montré le mois dernier qu'une grande hélice peu chargée, accélérant peu la veine d'air par rapport à la vitesse de vol, était plus efficace qu'une petite hélice très chargée accélérant beaucoup la veine d'air.

Dans tous les cas, petite ou grande hélice, la nature du moyen utilisé pour accélérer la veine d'air est prépondérante. Une pale d'hélice pouvant être assimilée à une aile en rotation, elle est soumise aux mêmes limitations et particularités que nos ailes de parapente :

- elle est constituée d'un profil ou section, d'une corde, en fonction de son « envergure » ou rayon de l'hélice ;
- elle possède donc une polaire en fonction de son angle d'incidence ;
- une incidence de décrochage, une incidence de finesse maximale et une incidence où sa portance est nulle.

Une particularité est que, par son fonctionnement en rotation, pour une incidence de travail donnée son calage dépend du rayon auquel on se situe.

Le « pas » géométrique de l'hélice est tout simplement la distance que parcourrait une section donnée en un tour si elle se vissait dans l'air. La figure 1 montre, pour une section donnée à un rayon donné, l'incidence locale sur cette section qui dépend à la fois de la vitesse de rotation Vrot et de la vitesse d'avancement de l'hélice V (ici 2 cas V1 ou V2). La vitesse d'avancement de la pale v , ici v1 ou v2, est la composition de V et de Vrot. L'angle de cette vitesse d'avancement par rapport au calage de la section (le pas local pour cette section) donne l'incidence locale de travail du profil.

On peut remarquer que pour une vitesse de rotation donnée, l'incidence de travail dépend très fortement de la vitesse V. La figure 2 montre des cas limites particuliers :

- si la vitesse est très faible pour un pas donné et une vitesse de rotation donnée, la pale peut décrocher comme une aile et sa poussée devient quasi-nulle ;
- comme pour toute aile, il existe une incidence (un pas) pour une composition de vitesse V et Vrot particulières, pour laquelle la pale est à sa « finesse maximum », donnant le meilleur rendement de l'hélice ;
- si la vitesse est très élevée pour un pas donné et une vitesse de rotation donnée, l'incidence peut atteindre l'incidence de portance nulle du profil et la poussée devenir nulle. L'hélice « mouline ».

Ces cas particuliers donnent les limites d'utilisation d'une hélice et son comportement en fonction de la vitesse du paramoteur :

- plus le pas est élevé, plus il y a un risque de décrochage à basse vitesse et de poussée au décollage trop faible ;
- plus il est petit, plus il y a risque d'atteindre rapidement une vitesse limite au-delà de laquelle l'hélice ne pousse plus ;
- entre les deux il y a tout intérêt à optimiser le rendement de l'hélice, donc la consommation, pour la vitesse de croisière choisie pour le paramoteur.

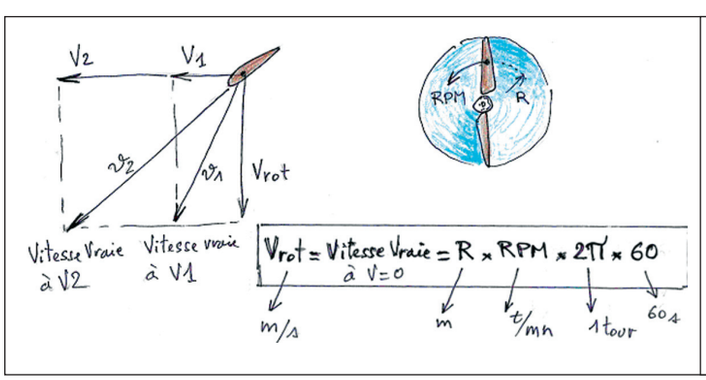
En paramoteur, à cause du décollage à pied, il est impératif d'avoir une bonne poussée à vitesse nulle. Excepté avec des roulettes, la capacité d'accélération au sol de « l'aéronef » à pied est nettement plus limitée que sur un avion ou ULM ! Cette particularité montre un des challenges des hélices en paramoteur : obtenir un bon domaine d'utilisation en croisière tout en conservant une poussée importante à vitesse nulle. On se doute que le problème sera d'autant plus difficile que la vitesse de croisière sera élevée.

L'optimisation d'une hélice reprend les mêmes principes que pour une aile. Pour la gamme de vitesses de croisière et de vitesses de rotation choisies, il faut optimiser en même temps :

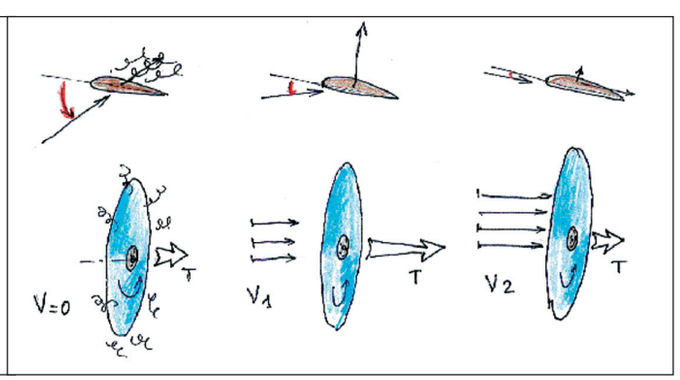
- le calage (pas géométrique) sur toute « l'envergure » de l'aile ;
- la loi de Cordes, pour diminuer la traînée induite.

Comme pour une aile, il existe pour chaque hélice

[*Figure 1 : vitesse d'avancement et vitesse de rotation*]



[*Figure 2 : limites du domaine d'utilisation*]



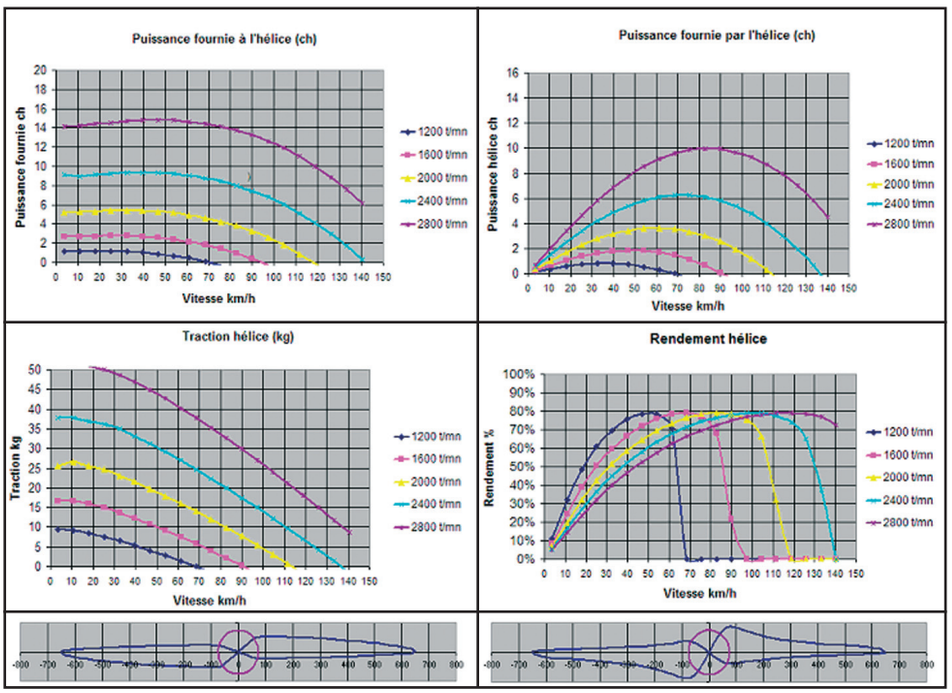
une loi de cordes donnant la traînée induite minimale. Si la loi est elliptique pour une aile, elle est un peu plus complexe pour une hélice du fait de sa nature tournante par laquelle aucune section n'a la même vitesse d'avancement. Plusieurs méthodes sont disponibles pour obtenir une hélice optimisée, basées sur les mêmes principes que pour une aile (calcul des tourbillons, etc).

La figure 3 montre les courbes de : puissance fournie, puissance délivrée, traction et rendement d'une hélice typique du domaine d'utilisation du paramoteur. Les différentes courbes représentent l'évolution en fonction de la vitesse de rotation de l'hélice.
Pour cette hélice de 1.30 m de diamètre, la forme « optimale » est représentée en bas à droite. On remarque un pied de pale très large, caractéristique des hélices adaptées pour les basses vitesses. La forme de gauche est une évolution de forme plus « classique » donnant sensiblement les mêmes résultats. L'hélice a été calculée pour obtenir une bonne poussée à vitesse nulle afin de faciliter le décollage.
Sur les courbes de traction, on remarque la poussée qui diminue avec la vitesse du paramoteur et qui devient nulle à partir de la vitesse limite, différente pour chaque vitesse de rotation.
Sur les courbes de rendement, cette limite se retrouve, ainsi que le maximum (finesse max) pour chaque vitesse de rotation considérée.
La puissance délivrée (produit de la traction par la vitesse du paramoteur) est nulle à vitesse nulle. La puissance fournie, elle, n'est jamais égale à 0. Même à vitesse nulle du paramoteur, la puissance du moteur est consommée par l'hélice, au travers du couple.
Si l'hélice est adaptée pour une vitesse plus élevée, le risque évoqué plus haut est matérialisé dans la figure 4, exemple typique qui montre les mêmes résultats pour une hélice de seulement 1 m de diamètre, tournant plus vite, dont la poussée et le rendement maximums sont décalés vers les vitesses de croisière élevées.
La courbe de traction montre clairement le décrochage des pales, donnant une poussée très faible à vitesse nulle, malgré une puissance consommée importante.
Ce décrochage se retrouve sur les courbes de rendement, « creusées » pour les vitesses faibles bien que le rendement global soit amélioré pour les vitesses au-dessus de 100 km/h.
Au passage, on peut remarquer que la forme de pale « optimale » (à droite) devient plus classique et proche des formes d'hélices traditionnelles pour un avion ou ULM.

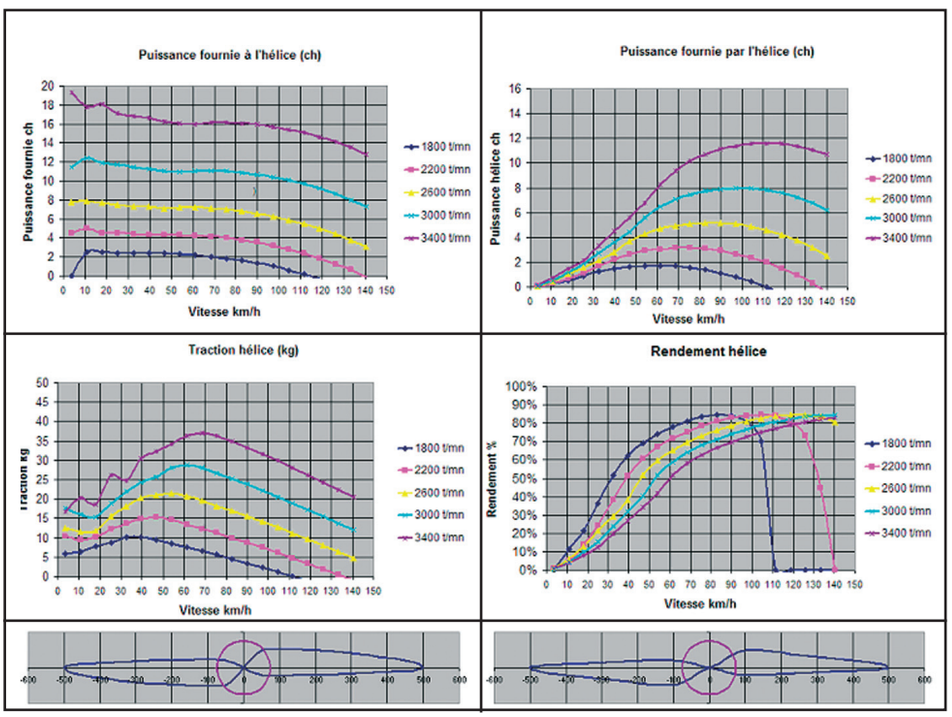
CONCLUSION

Du classique finalement dans ce petit panorama des particularités de fonctionnement d'une hélice paramoteur :

- le choix d'une bonne hélice en paramoteur passe par une bonne poussée statique ;
- les vitesses relativement faibles en paramoteur permettent l'utilisation d'hélices adaptées pour un domaine de 0 à 80 km/h ;
- pour le futur, ou les pilotes avides de records, le choix d'une hélice adaptée pour les vitesses supérieures à 100 km/h sera problématique pour le décollage, à moins d'utiliser des roulettes...



[*Figure 3 : hélice adaptée basses vitesses*]



[*Figure 4 : hélice adaptée grandes vitesses*]