[Texte et croquis : Olivier Caldara] [photo : Dimitri Delemarle]

ACTION... RÉACTION

Pour aborder le sujet de ce mois-ci, consacré à l'hélice, je vous propose tout d'abord comme exemple le canoë-kayak !

Le principe de propulsion à la rame est simple : à chaque traction sur la rame, une quantité d'eau est « mise en mouvement » par celle-ci avec une certaine vitesse. Cette mise en mouvement crée une force qui s'applique « par réaction » à la rame, au kayak et le fait avancer. Les principes à la base de cette simplissime « technologie de propulsion » sont issus de Newton :

• seconde loi de Newton : la force appliquée sur un corps (la quantité d'eau) est égale à la variation de sa quantité de mouvement (variation du produit masse x vitesse) ;

• troisième loi de Newton : action = réaction, comme dans « Les Choristes »...

Bien sûr, au vu des remous et tourbillons provoqués par chaque coup de rame, on imagine que le rendement n'est pas fameux.

Une hélice est un bien meilleur moyen de propulsion. Elle utilise exactement les mêmes lois de Newton. En ce sens, comme la rame ou la fusée, c'est un « moteur à réaction ». Cette chronique s'attachera à décrire son fonctionnement de base et l'influence de ses caractéristiques dimensionnelles sur ses performances. Quelques raisonnements et relations simples permettent d'établir ces influences.

UN « ACCÉLÉRATEUR DE QUANTITÉ DE MOUVEMENT »

Une hélice se comporte donc comme une rame, en accélérant une veine d'air entre l'amont des pales (vitesse V0, par exemple la vitesse de vol d'un paramoteur) et l'aval du plan des pales (vitesse V1). Avantage : au lieu de le faire par saccades, cette accélération est continue grâce à la structure rotative de l'hélice. On ne remerciera jamais assez l'inventeur de l'axe et de la roue ! La figure 1 montre une représentation de ce fonctionnement. Si l'on considère la veine d'air délimitée par l'hélice, la conservation de la matière montre que si le débit d'air est le même en amont et en aval, cette veine d'air se « rétrécit » au passage de l'hélice :

• Débit amont : $Q0 = \rho \cdot S0 \cdot V0$

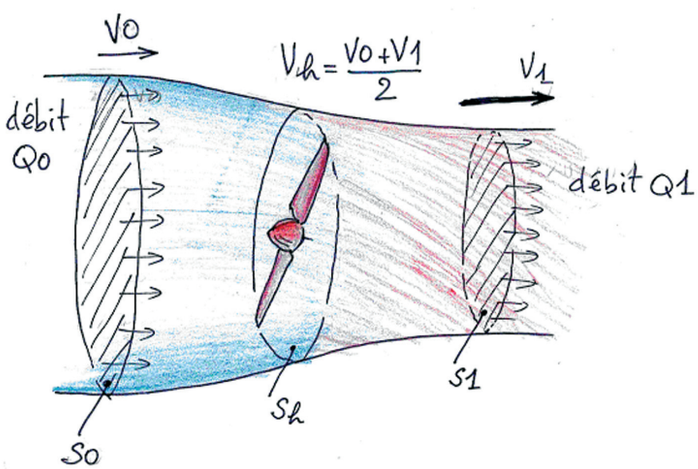
• Débit aval : $Q1 = \rho \cdot S1 \cdot V1$

• Débit dans le plan de l'hélice : $Qh = \rho \cdot S \cdot Vh$

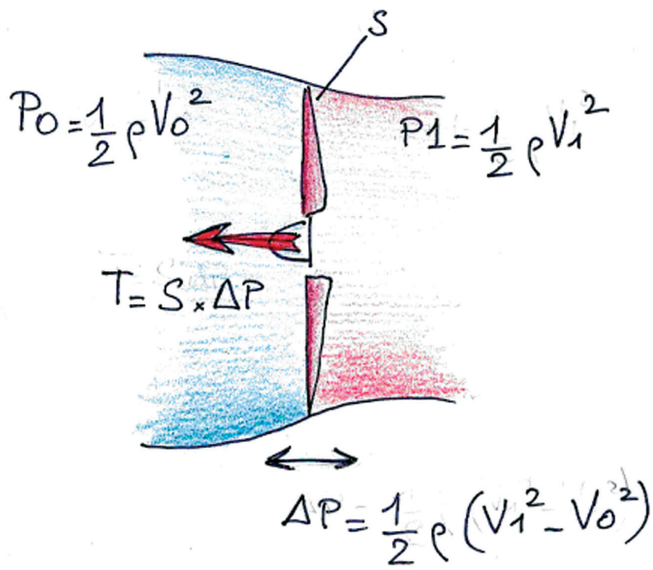
• Conservation du débit :

$$Qh = Q0 = Q1 \quad \text{donc} \quad S1 = S0 \cdot \frac{V0}{V1}$$

On montre par ailleurs que la vitesse de l'air Vh au niveau du plan de l'hélice est égale à la moyenne entre V1 et V0. En gros, cela signifie que la moitié de l'accélération se produit en amont et la moitié en aval. Enfin, la veine d'air n'est pas seulement accélérée. Elle est aussi mise en rotation à cause du sillage des pales.



[*Figure 1 : l'accélérateur de quantité de mouvement*]



[*Figure 2 : Newton ou Bernouilli ?*]

Le théorème de la quantité de mouvement permet d'obtenir la traction T engendrée par l'hélice. Comme le diamètre de la veine d'air est connu dans le plan de l'hélice et que l'on connaît aussi sa vitesse, le calcul de la traction à cet endroit donne :

$$T = \rho \cdot \frac{V1+V0}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot (V1 - V0)$$ avec

- $\frac{\pi \cdot D^2}{4} = S$ surface de l'hélice
- $\rho \cdot \frac{V1+V0}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = Qe$ débit massique d'air dans le plan de l'hélice
- $(V1 - V0)$ accélération entre amont et aval

Cette première expression montre qu'on peut obtenir une traction désirée T de plusieurs façons :
• avec une petite hélice procurant une grande accélération à la veine d'air ;
• avec une grande hélice procurant une faible accélération à la veine d'air ;
Nous verrons plus loin que ces deux méthodes ne sont pas équivalentes.
Par ailleurs, en remarquant (à mon époque en 3ème, on appelait ça je crois, une identité remarquable…) que (V1+V0).(V1-V0) est égal à ($V1^2$ - $V0^2$), la traction s'écrit aussi :

$$T = S \cdot ((1/2 \cdot \rho \cdot V1^2) - (1/2 \cdot \rho \cdot V0^2))$$

ou bien $T = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot (V1^2 - V0^2)$

qui traduit simplement que la force de traction est égale à la surface de l'hélice par la différence de pression dynamique de l'air avant et après celle-ci, ce qui semble assez logique (figure 2)…
Nota : sur ce cas simple de l'hélice, on peut remarquer qu'à partir des lois de Newton (quantité de mouvement et action-réaction), on déduit l'expression d'une force sous une forme de type « loi de Bernouilli » (force = surface x pression dynamique). J'en avais déjà parlé. Fin de la parenthèse pour les esprits chagrins qui veulent à toute force, c'est le cas de le dire…, entretenir un « combat » Newton/Bernouilli qui n'a pas de raison d'être.

RENDEMENT DE L'HÉLICE ET DIMENSIONS

Si l'on s'intéresse au rendement du système de propulsion, il faut aborder le rapport entre la puissance obtenue en sortie (Ps) et la puissance « communiquée » à la veine d'air par le système (Pc).
La puissance obtenue est simplement exprimée en faisant le produit de la force de traction T par la vitesse de vol V0, soit :

$$Ps = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot (V1^2 - V0^2) \cdot V0$$

Dans un premier temps si l'on considère que l'hélice est parfaite, sans traînée, la puissance engendrée et communiquée à la veine d'air est égale à la différence de puissance cinétique entre amont et aval :

$$Pc = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot (\frac{V1+V0}{2}) \cdot (V1^2 - V0^2)$$

Le rendement s'écrit donc :

$$\eta = \frac{2}{1+\frac{V1}{V0}}$$

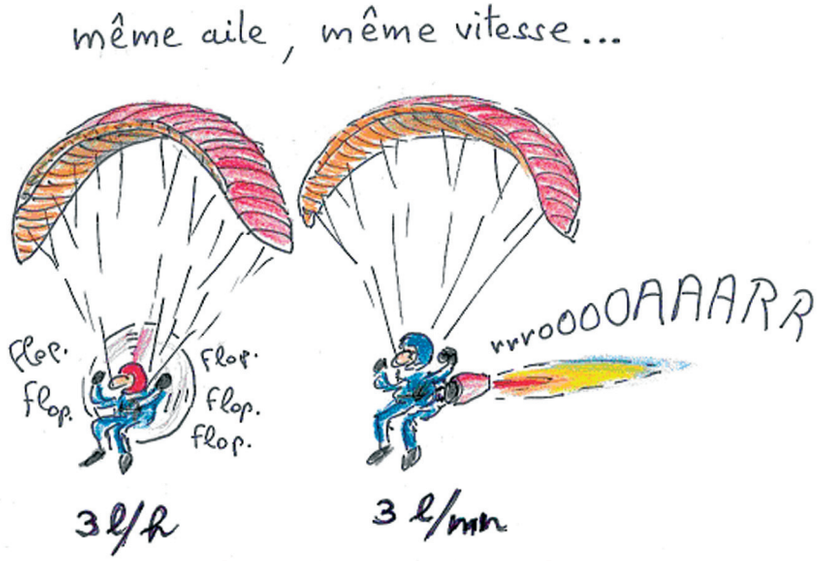
ou bien en faisant intervenir la « charge alaire » T/S de l'hélice :

$$\eta = \frac{2}{1+\sqrt{\frac{T/S}{1/2 \cdot \rho \cdot V0^2}+1}}$$

Ces deux expressions du rendement permettent de comprendre les caractéristiques bien connues liées aux dimensions des hélices. La première expression du rendement montre que pour une poussée désirée donnée, le rendement est d'autant plus faible que la veine d'air est accélérée.
Il serait « idéalement » de 100 % si V1=V0. Mais dans ce cas la traction serait nulle !
La seconde expression montre que pour une même traction une hélice très « chargée », donc de faible surface, diminue très sensiblement le rendement.
En résumé, une grande hélice peu chargée est le gage d'un bon rendement et d'une consommation raisonnable. L'évolution naturelle vers les grandes hélices en est l'application. A titre d'anecdote, il est parfaitement concevable de réaliser un paramoteur utilisant un petit réacteur. Il est cependant certain que du strict point de vue du rendement, c'est la pire solution :
Une très petite turbine, très chargée, une vitesse d'éjection très grande, largement supérieure à la vitesse de vol d'un parapente… Donc un rendement très nul. Mais si on ne regarde pas la consommation, c'est gravement fun !

LA PROCHAINE FOIS

Cette introduction, basée sur une analyse de l'aspect principal « accélérateur de quantité de mouvement », n'abordait pas les caractéristiques plus précises du fonctionnement de l'hélice, sa nature d'aile tournante et les conséquences sur son fonctionnement, traînée, etc. Ce sera l'objet de la prochaine chronique.



[*Figure 3 : action... réaction !*]