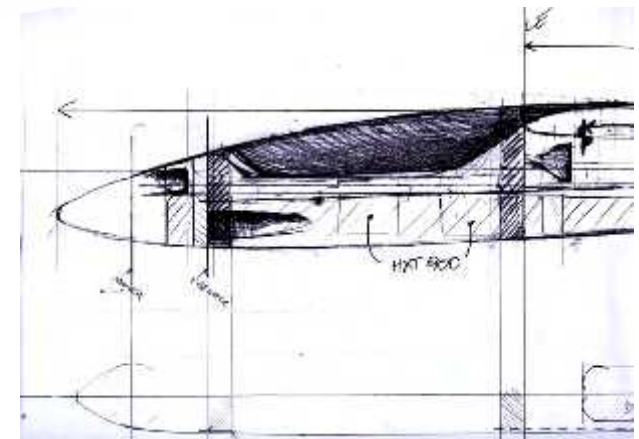




NOTIONS AERONAUTIQUES

CH 03-10: L'hélice

V01
21/09/2016





AVERTISSEMENT



Ceci n'est pas un cours académique et ne peut pas servir en tant que tel.

Ceci est une approche simplifiée d'une discipline regroupant plusieurs branches: aérodynamique, mécanique du vol, aéromodélisme, etc.

Certains résultats découlent d'une modélisation donnée (hypothèses). Généraliser les résultats en dehors de leur cadre peut conduire à des interprétations erronées.

Certaines assertions reflètent l'interprétation de l'auteur. Le lecteur doit prendre du recul et les soumettre à son sens critique.

Vos remarques seront très appréciées: helmitouel@yahoo.fr

Sommaire:



Introduction

- **Notions de bases**
- **Hélice aéronautique**
- **Caractéristiques**
- **Annexes**

Introduction

- Le fonctionnement de l'hélice est tellement intuitif qu'il est difficile d'imaginer la complexité de ce mécanisme.
- Dans ce chapitre, notre but est de comprendre les notions générales liées au fonctionnement de l'hélice.

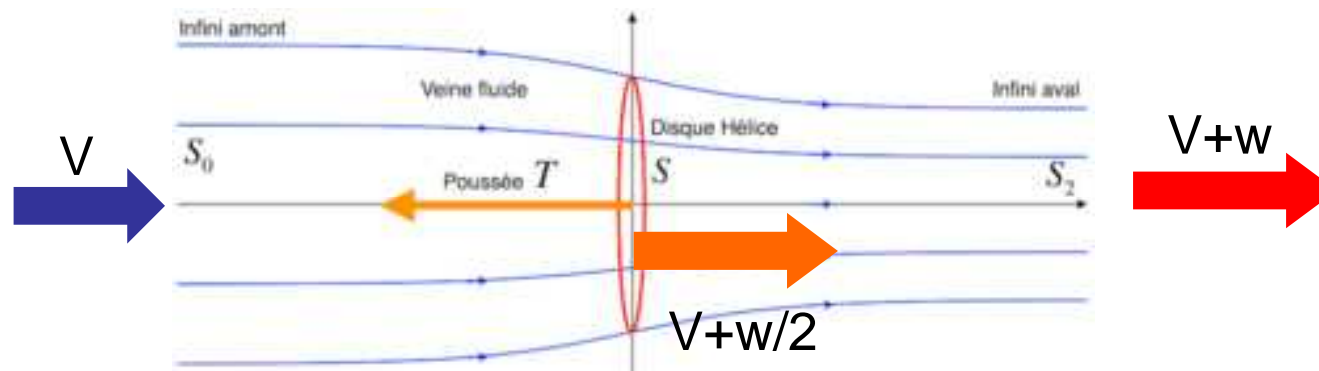


Sommaire:

- 
- Introduction
 - **Notions de bases**
 - Hélice aéronautique
 - Caractéristiques
 - Annexes

Notions de base

- Les premières études des hélices (Froude) avaient une approche globale.
- C'est-à-dire on considère que l'hélice comme un disque qui « agit » sur l'écoulement.



- On démontre (voir annexe 1) que l'écoulement est « accéléré » en aval de l'hélice:
 - Dans le repère de l'avion, on passe de V (vitesse relative par rapport à l'avion) à $V+w/2$ au niveau de l'hélice puis à $V+w$ en aval.
 - Pour un observateur au sol, l'air est passer de 0 (amont) à w (avale).

Constations

- La force de « **traction** » est proportionnelle **au débit** et à la différence de vitesse (aval/amont).

$$\vec{F} = \rho S v (v_2 - v_1) \vec{e}_x = D_m (v_2 - v_1) \vec{e}_x$$

- Le **débit** est directement lié à **la surface** balayée par l'hélice (diamètre des pales) et la vitesse relatif de l'écoulement.
- Donc on peut générer une même force avec :
 - Un **débit important** (diamètre important) et une **faible variation de vitesse**,
 - Ou, **un faible débit** (diamètre faible) et **une grande variation de vitesse**.
- Pour trancher entre ces deux méthodes, on doit déterminer le rendement « de puissance » dans les deux cas.

Rendement

- Le rendement est de la forme (V : vitesse relative amont, w = **variation de vitesse** donnée par l'hélice à l'**écoulement**) :

$$\text{Rendement de puissance} = \frac{P_w \text{ récupérée par l'avion}}{P_w \text{ donnée au fluide}} = \frac{V}{V + w/2}$$

- Cette approche simple permet de dégager une notion importante: le rendement est **inversement proportionnelle** à la **variation de vitesse** donnée par l'hélice à l'**écoulement**.
- Mais comme on a besoin de développer une force pour avancer, alors il faut compenser la baisse de w par le débit: (Force= Débit . w).
- Le débit étant fonction de la surface des pales et de la vitesse de l'avancement de l'avion.
- La vitesse de l'avion étant ce qu'elle est, on peut alors jouer sur le diamètre de l'hélice-> diamètre important-> débit important-> w faible-> rendement meilleur.

ATTENTION: on cherche à optimiser l'hélice en terme de rendement. Mais ce n'est pas le seul critère qui compte. Il y a aussi la limitation de vitesse en bout de pale, l'encombrement, etc.

Sommaire:

- Introduction
- Notions de bases
- **Hélice aéronautique**
- Caractéristiques
- Annexes

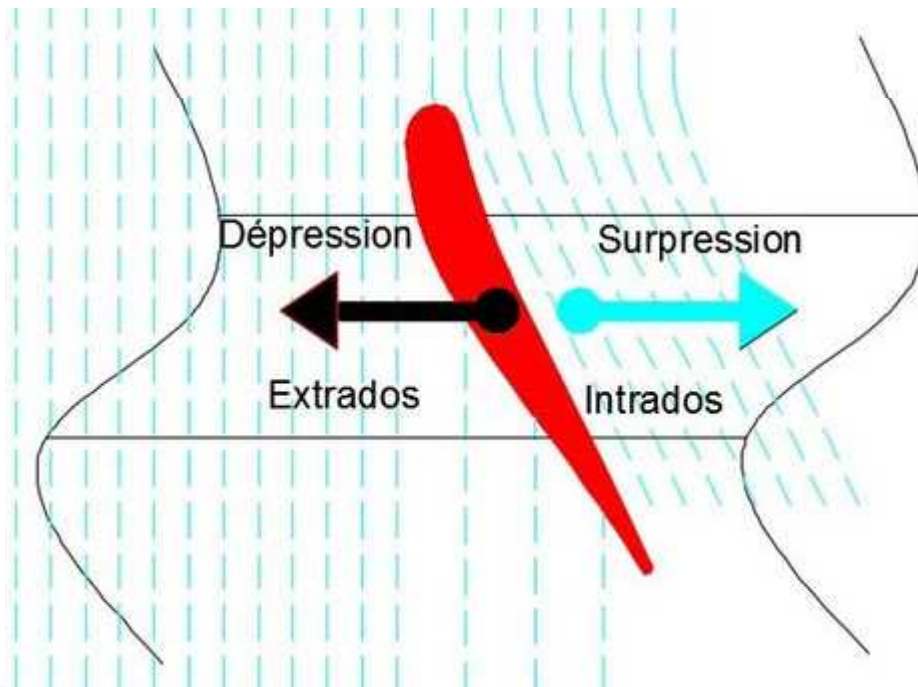
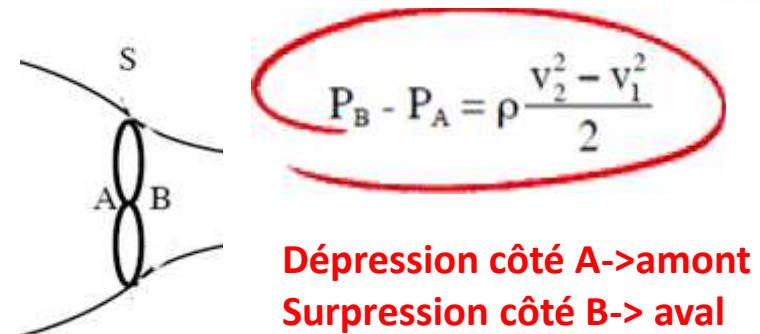
Hélice aéronautique

- Depuis ses débuts, l'aéronautique a fait usage de l'hélice pour obtenir la traction nécessaire à l'avion (pour acquérir de la vitesse).
- Sur ce modèle de **l'Eole de Clément Ader**, l'hélice est inspirée des plumes des oiseaux.
- A ce stade, on sait que **l'hélice** permet « **d'accélérer** » l'air.
- Mais le fonctionnement de l'hélice n'est pas encore à son state optimum.



Hélices modernes

- Le décliage est survenu lorsqu'on a compris que la différence de vitesse (amont/aval) résulte de la *différence de pression sur les pales de l'hélice*.



- L'idée est alors de donner à chaque pale d'hélice la forme *d'un profil*.
- En tournant, le profil génèrera une dépression sur l'extrados (amont de l'écoulement) et une surpression sur l'intrados (aval).

Pour info

- Des hélices, il y en a de toutes les formes et de toutes les couleurs.
- Mais, on peut dire qu'entre hélice pour bateau et hélice pour avion, il y a une marge importante.
- Cette différence est liée à la différence du fluide: Air / eau.
- Des phénomènes comme la cavitation peuvent apparaître au niveau de l'hélice d'un bateau. Ceci oblige à un dimensionnement différent.



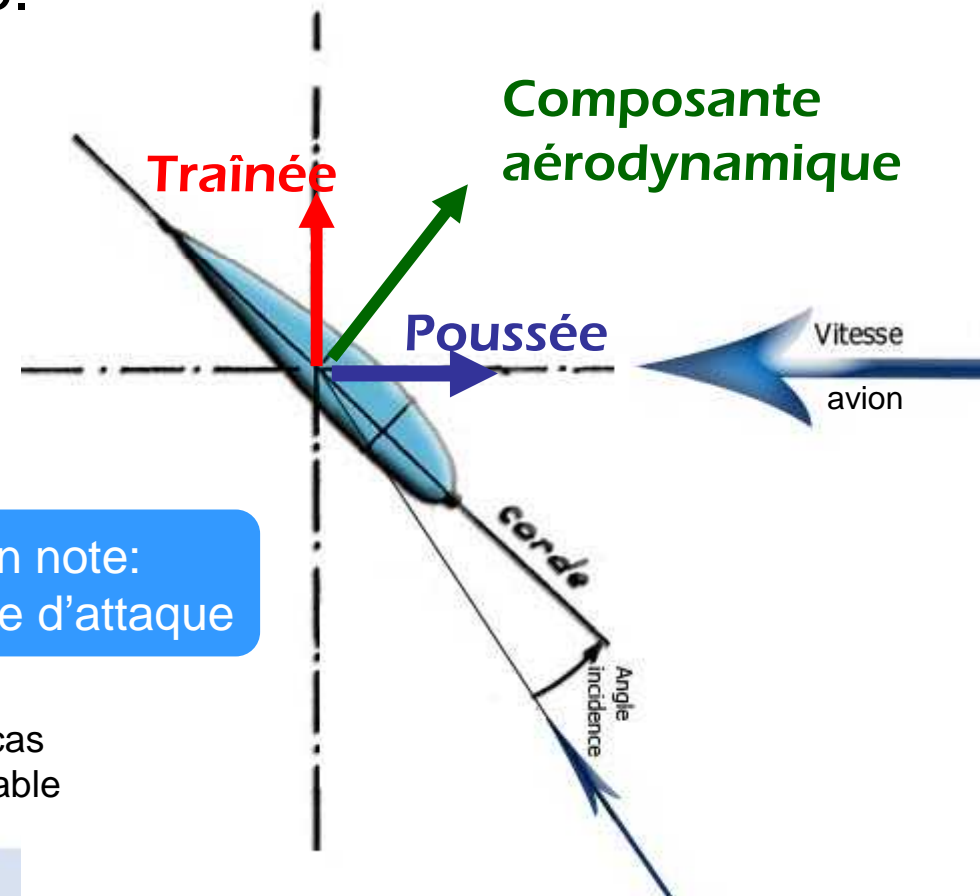
Sommaire:

- Introduction
- Notions de bases
- Hélice aéronautique
- **Caractéristiques**
- Annexes



Angle de base

- Le profil fonctionne sous un flux qui est la combinaison de **la vitesse de l'avion** et **la vitesse de rotation**.
- Comme on l'a déjà vu, le profil va générer une composante aérodynamique.
- La composante en question, projetée sur l'axe qui représente la vitesse de l'avion, donne la poussée recherchée.
- La deuxième composante et la traînée.
- Dans notre cas c'est un couple qui sera compensé par le moteur.

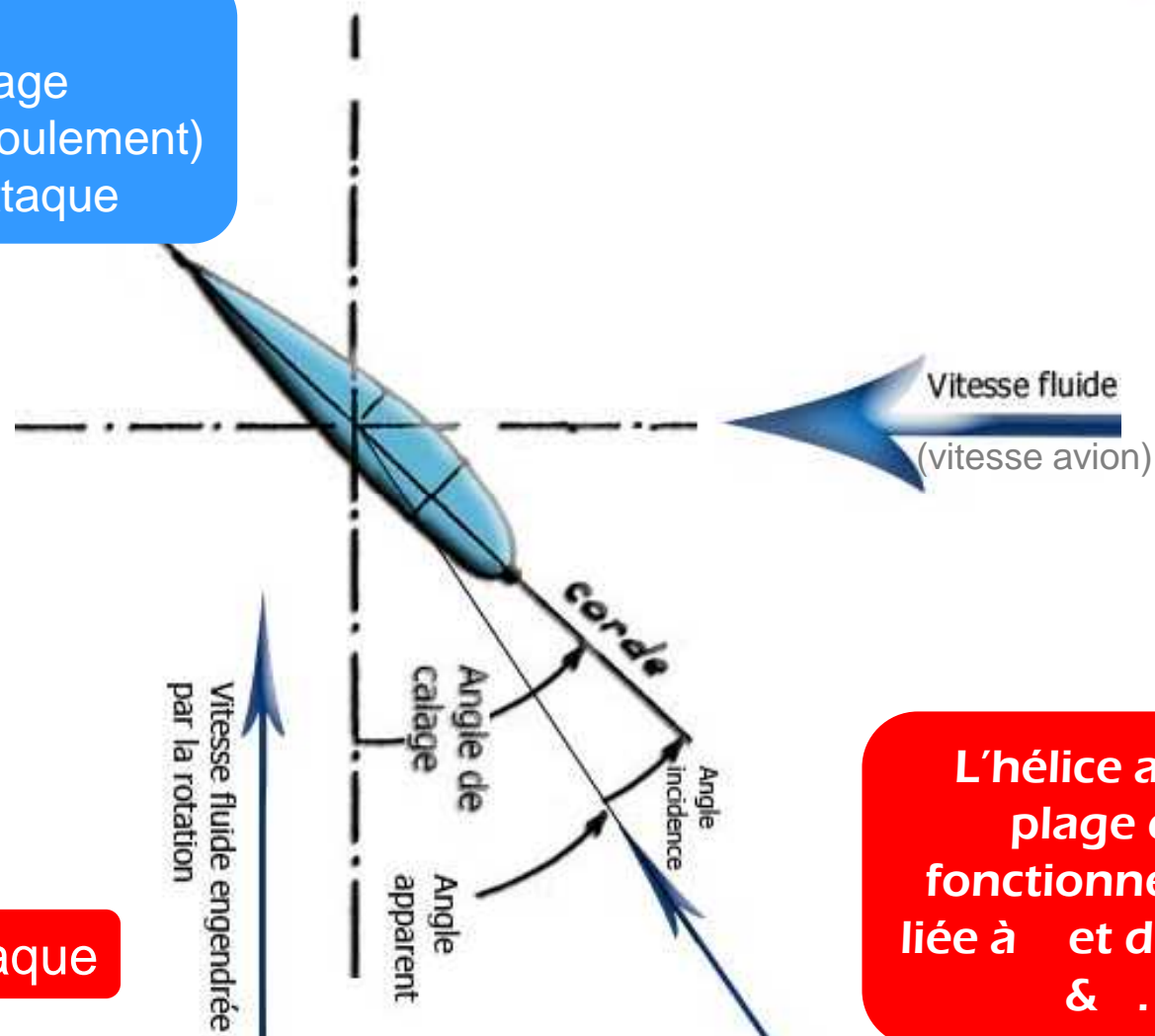


On note:
angle d'attaque

Attention: étant donné que la projection diffère du cas d'un avion, le C_z et C_x classique ne sont pas utilisable directement.

Notations:

On note:
 α : angle de calage
 α_{app} : angle apparent (écoulement)
 $\alpha_{app} = \alpha - \alpha_{inc}$ angle d'attaque

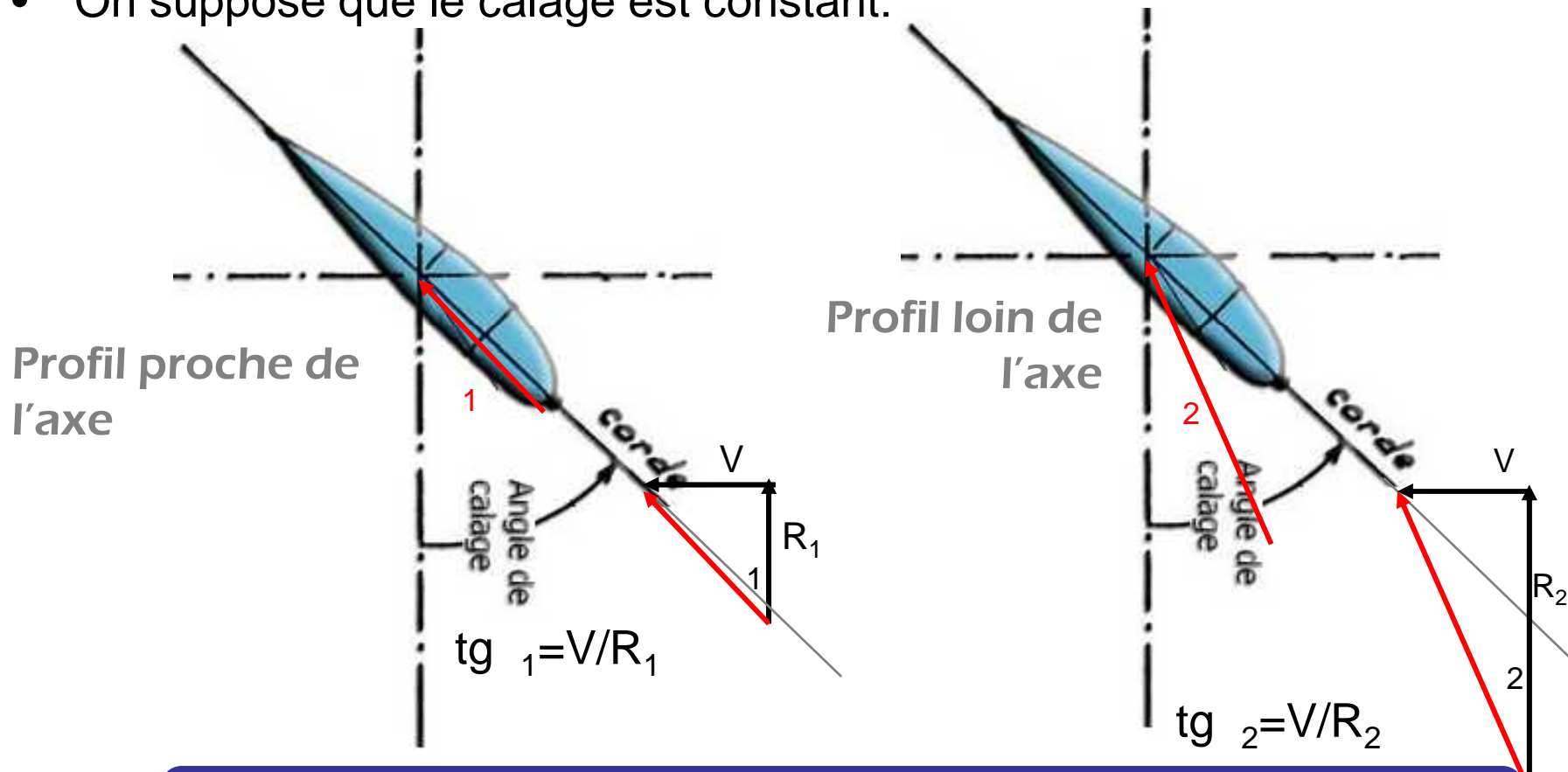


$\alpha_{app} = \alpha - \alpha_{inc}$ angle d'attaque

L'hélice a une plage de fonctionnement liée à α et donc à α_{app} & α_{inc} .

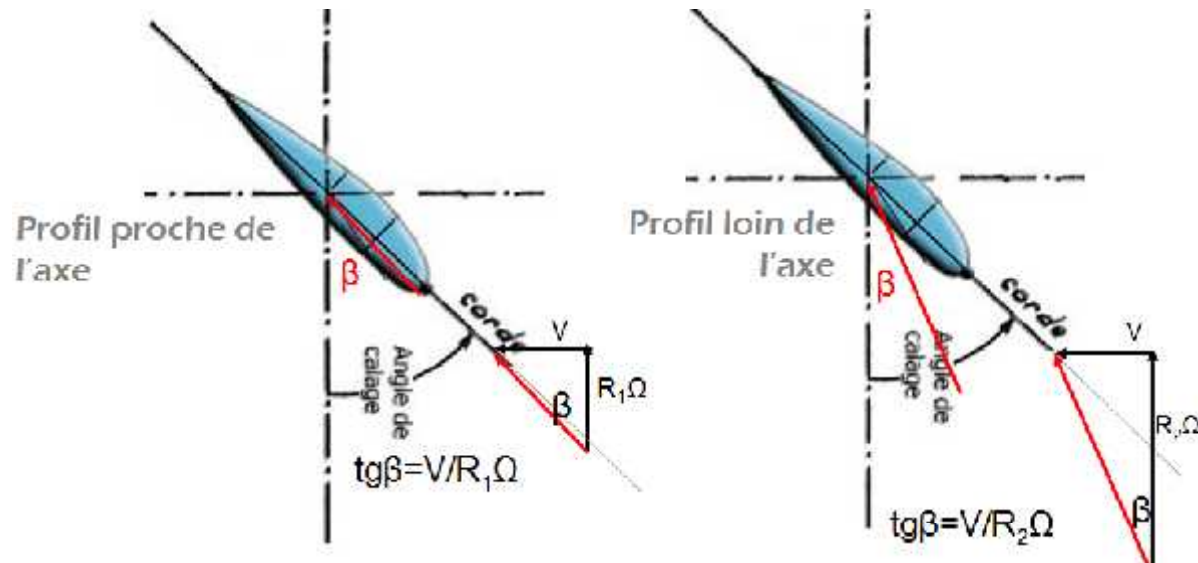
Calage

- La vitesse relative engendrée par la rotation angulaire () est proportionnelle au rayon (vitesse relative = $R \cdot \omega$).
- On suppose que le calage est constant:



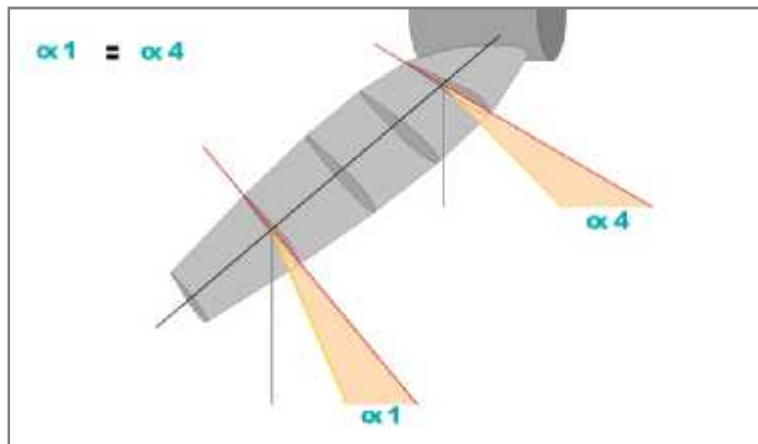
Si le calage est constant, alors l'angle d'attaque augmente lorsqu'on s'éloigne de l'axe de l'hélice.

Vrille (calage variable)



- On vient de voir que l'angle apparent de l'écoulement diminue.
- Donc l'angle d'attaque augmente.

$$\alpha_1 = \alpha_2 \quad \alpha_1 < \alpha_2$$

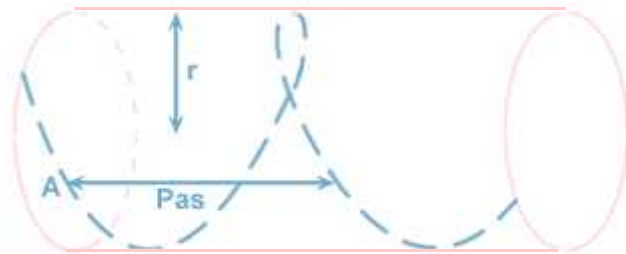


- Mais si l'angle d'attaque augmente d'une façon importante, on peut atteindre le décrochage.
- Pour palier à ce problème, **l'hélice est vrillée** « négativement ».
- Le BA* se baisse en s'éloignant de l'axe= angle de calage décroissant.

(*) BA= bord d'attaque

Pas Géométrique

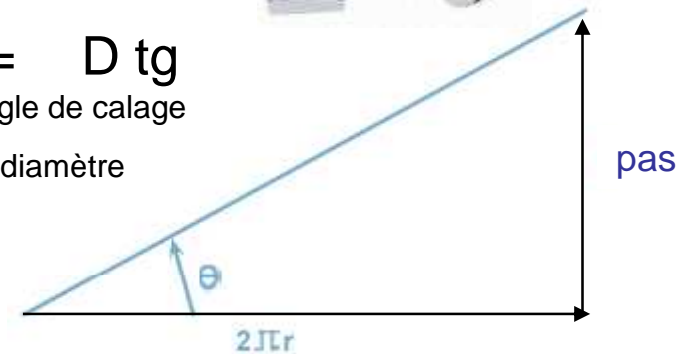
- Le **Pas Géométrique** est une notion équivalente à celle d'une vice.
- C'est la distance parcourue par A lors d'un déplacement sans glissement.



$$P_{\text{géo}} = D \tan \theta$$

: l'angle de calage

D: diamètre



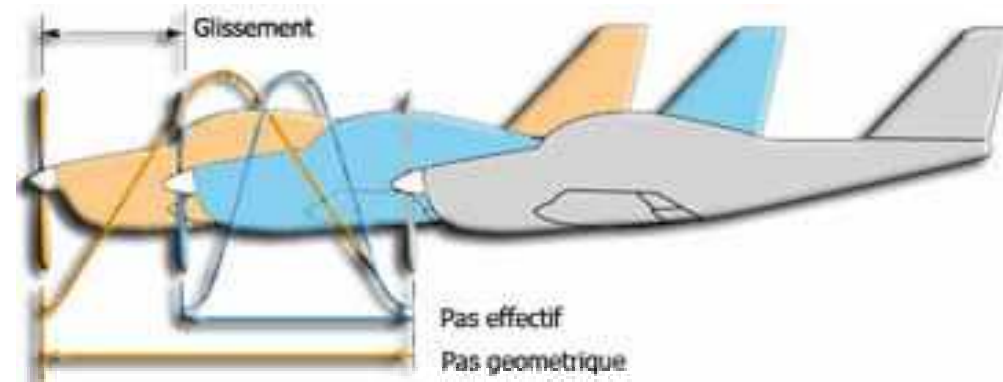
- C'est ici que les choses se compliquent puisque l'angle de calage est variable.
- Alors certains prennent θ à $r = 0,7 R$ (site avionnaire).
- Le **Pas Géométrique Relatif** est défini comme étant $P_{\text{géo}} / D$ avec D le diamètre de l'hélice.
- C'est l'occasion de définir une vitesse appelée « **Vent d'Hélice** » qui est l'avancement en une seconde d'une hélice qui fait N de tours par second.

$$V_{\text{hélice}} = N P_{\text{géo}}$$

Pas Effectif

- Le **Pas Effectif**, est la distance d'avancement pendant un tour:
- Un tour se fait pendant $T = 1/N$ second.
- L'avion avance avec une distance de:

$$P_{\text{eff}} = V \quad T = V/N$$

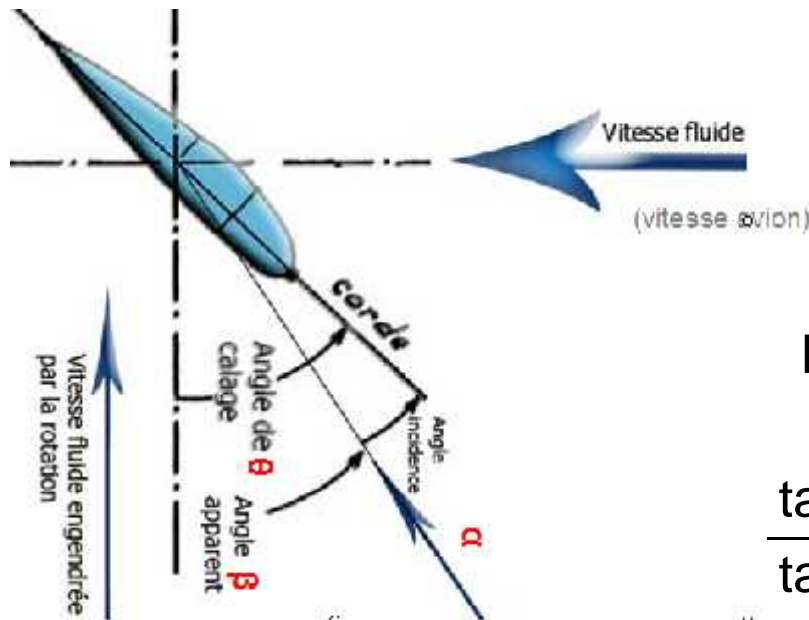


- On retrouve le même résultat si on prend l'angle beta entre l'écoulement relatif et l'axe de l'hélice: $P_{\text{eff}} = D \tan \beta$
- Le **Pas Effectif Relatif** (appelé avancement A_v^*) est: $A_v^* = P_{\text{eff relatif}} = V/ND$.
- Le **Glissement** (on l'appelle aussi **Recul**) étant la différence entre la pas géométrique et le pas effectif.

$$\text{Glissement} = P_{\text{Géo}} - P_{\text{eff}}$$

(*) On trouve beaucoup la notation J pour avancement

Résumé



Géométrique

$$P_{\text{géo}} = D \tan$$

$$P_{\text{géo}} = \frac{V_{\text{ent d'hélice}}}{N}$$

$$P_{\text{géo relatif}} = \frac{V_{\text{ent d'hélice}}}{ND}$$

$$\frac{\tan}{\tan} = \frac{P_{\text{eff}}}{P_{\text{géo}}} = \frac{A_v}{P_{\text{géo relatif}}} = \frac{V}{V_{\text{hélice}}}$$

Effectif

$$P_{\text{eff}} = D \tan$$

$$P_{\text{eff}} = \frac{V}{N}$$

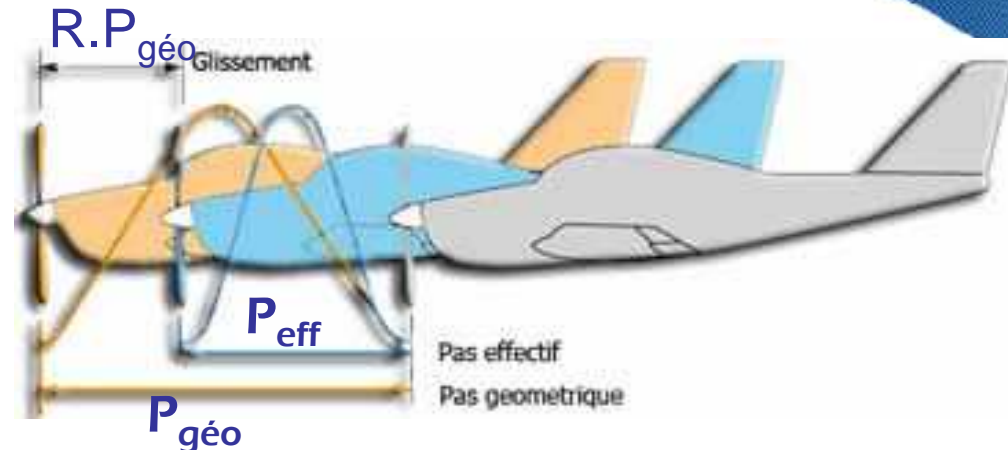
$$A_v = \frac{V}{ND}$$

- Donc pour que l'hélice fonctionne bien, il faut que l'angle apparent de l'écoulement reste inférieur à l'angle de calage .
- Donc l'Avancement A_v doit rester inférieur au Pas géométrique relatif -> on en déduit que $A_v \text{ max}$ est égale à $P_{\text{géo relatif}}$:

$$A_{v \text{ max}} = P_{\text{géo relatif}}$$

Recule

- Certains préfèrent faire le raisonnement avec le Pas effectif est dire qu'il doit être inférieur au Pas géométrique.
- On introduit alors **un recule R** qui est sans dimension & qui représente un pourcentage du Pas géométrique:



$$P_{eff} = P_{géo} - R \cdot P_{géo}$$

$$P_{eff} = P_{géo} (1 - R)$$

- L'entité $R \cdot P_{géo}$ est le glissement. Le facteur R (appelé le recul) est compris entre 0 et 1.
- De même on peut déduire que: $V = V_{hélice} (1 - R)$
- Pour un avion « lent » on a un R de 40%. Pour un trainer, on a un 30%. Pour un voltigeur, on passe à 10 %. Pour un 3D on peut atteindre $R=0$.

Sommaire:

- **Introduction**
 - **Notions de bases**
 - **Hélice aéronautique**
 - **Caractéristiques**
- Annexes**



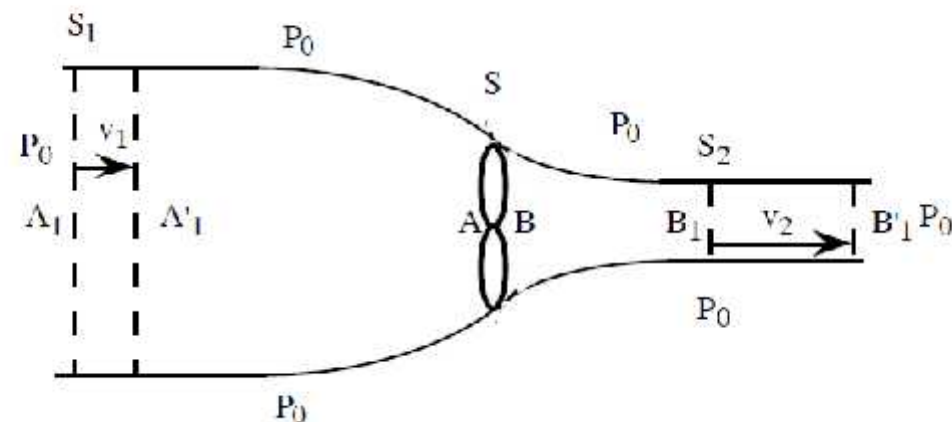
Flash back prépa!

- Voici l'étude de l'hélice reprise d'un vieux cours de prépa (PSI Brizeux).

Dans un fluide parfait incompressible est immergée une hélice qui par sa rotation met le fluide en mouvement. Nous supposons le problème de révolution autour d'un axe noté x , le problème devenant ainsi unidimensionnel. Le régime est enfin supposé stationnaire.

- en amont de l'hélice, l'écoulement est uniforme de vitesse \vec{v}_1 , et la section de l'écoulement S_1 .
- en aval de l'hélice, l'écoulement est uniforme de vitesse \vec{v}_2 , et la section de l'écoulement S_2 .
- la pression loin de l'hélice est uniforme et égale à P_0
- les forces de pesanteur sont négligées

Les lignes de courant du fluide qui « s'appuient » sur l'hélice ont l'allure suivante :



Bernoulli

Il s'agit de déterminer les caractéristiques de l'écoulement au voisinage de l'hélice, la force qu'elle exerce sur le fluide et la puissance reçue par ce dernier.

Le problème vient ici du fait que la zone de fluide au voisinage proche de l'hélice est en écoulement perturbé, le fluide ne pouvant plus en particulier être considéré comme parfait : il y a notamment discontinuité de la pression de part et d'autre de l'hélice. Il est impossible par exemple d'appliquer la relation de Bernoulli sur une ligne de courant qui traverserait l'hélice.

En revanche, il est tout à fait possible d'appliquer cette relation :

- entre un point A_1 « loin » en amont de l'hélice et un point A en amont « proche » de l'hélice :

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{P_0}{\rho} = \frac{v_A^2}{2} + \frac{P_A}{\rho}$$

- entre un point B_1 « loin » en aval de l'hélice et un point B en aval « proche » de l'hélice :

$$\frac{v_2^2}{2} + \frac{P_0}{\rho} = \frac{v_B^2}{2} + \frac{P_B}{\rho}$$

Pression

Le fluide étant incompressible, la conservation du débit exige :

$$S_1 v_1 = S_A v_A = S_R v_R = S_2 v_2$$

Les points A et B étant proches de l'hélice, et la section du tube de courant continue, $S_A \approx S_B = S$, d'où :

$$v_A \approx v_B = v$$

La comparaison des expressions écrites plus haut implique alors :

$$P_B - P_A = \rho \frac{v_2^2 - v_1^2}{2}$$

Dépression côté A->amont
Surpression côté B-> aval

Force: action/réaction

Pour déterminer la force subie par le fluide de la part de l'hélice, il suffit d'établir un bilan de quantité de mouvement sur une masse m proche de l'hélice et la traversant :

Puisqu'il y a continuité de la vitesse en A et B, la variation de quantité de mouvement est nulle et on peut écrire :

$$\vec{0} = P_A S \vec{e}_x - P_B S \vec{e}_x + \vec{F}$$

La force exercée par l'hélice sur le fluide est donc :

$$\vec{F} = \rho S \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \vec{e}_x$$

Cette force est positive, ce qui implique que $v_2 > v_1$ et donc $S_1 > S_2$, ce qui justifie l'allure des lignes de courant tracées ...

Il est possible d'établir une autre expression de \vec{F} en utilisant un bilan de quantité de mouvement sur une masse m de fluide traversant l'hélice et située entre des « parois » éloignées :

- à t le système est délimité par les « parois » A_1 et B_1
- à $t + dt$ par les « parois » A_1' et B_1'

la variation de quantité de mouvement associée est : $D\vec{p} = \rho S v dt (v_2 - v_1) \vec{e}_x$

Puissance

La pression restant uniforme sur les parois latérales de cette masse de fluide, leur résultante est nulle. Il ne reste que la force exercée de la part de l'hélice elle-même :

$$\text{D'où} \quad \vec{F} = \rho S v (v_2 - v_1) \vec{e}_x = D_m (v_2 - v_1) \vec{e}_x$$

La comparaison des deux expressions conduit à : $v_2 + v_1 = 2v$

Nous pouvons enfin directement exprimer la puissance P reçue par le fluide selon :

$$P = Fv = \rho S v \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = D_m \frac{v_2^2 - v_1^2}{2}$$

Attention:
si $v_2 = v_1$ alors $P = 0$

Ici encore un bilan direct d'énergie aurait pu nous donner cette puissance : remarquons en effet que l'expression de la puissance apparaît comme étant égale à la variation d'énergie cinétique (par unité de temps) de la masse m de fluide considérée...

Dans le cas d'une hélice associée à un navire en translation de vitesse $-u\vec{e}_x$, la force $-\vec{F}$ subie par l'hélice de la part du fluide fait avancer le navire. La puissance utile correspondante est Fu .

En outre, dans un référentiel « terrestre », le fluide est au repos en avant du bateau, et à la vitesse $w\vec{e}_x$ assez loin en arrière du navire.

Rendement

Dans le référentiel lié au navire, les vitesses \vec{v}_1 et \vec{v}_2 sont alors respectivement égales à $u\vec{e}_x$ et $(w + u)\vec{e}_x$. D'où $\vec{F} = D_m (w + u - u)\vec{e}_x = D_m w\vec{e}_x$. La puissance utile, dans le référentiel terrestre, est :

$$P_u = D_m w u$$

La puissance motrice nécessaire au fonctionnement de l'hélice, transmise par le moteur embarqué, et donc déterminée dans le référentiel du navire, représente aussi la puissance communiquée au fluide, soit :

$$P_m = D_m \frac{(w + u)^2 - u^2}{2} = D_m w \frac{w + 2u}{2}$$

D'où un rendement de propulsion

$$\eta = \frac{P_u}{P_m} = \frac{2u}{w + 2u}$$

Attention:

La formule n'est valable que si $w > 0$ sinon, $P_m=0$ et donc on ne peut plus parler de rendement.