

# Aéronautique et physique : forces appliquées sur une hélice

## Comprendre le fonctionnement d'une hélice de moteur d'avion

par Nicolas CHEYMOL

Académie de Montpellier

nicolas.cheymol@ac-montpellier.fr

Dominique DUCOURANT

Académie de Montpellier

domi.ducourant@orange.fr

et Jean-Jacques CALLIET

Académie de Montpellier

jean-jacques.calliet@ac-montpellier.fr

**C**ET ARTICLE s'inscrit dans la série déjà publiée sur ce thème. Il propose une modélisation simplifiée du fonctionnement d'une hélice d'un avion. En physique, cela correspond à l'étude d'un solide en rotation<sup>(1)</sup> autour d'un axe. Dans ce cadre, les grandeurs pertinentes pour cette étude devraient être celles relatives aux couples de forces, aux moments et aux moments d'inertie. Néanmoins, dans cet article, nous adopterons une approche analytique simplifiée. Celle-ci consiste à décomposer une pale en éléments (sections de pale) dont on étudie le comportement dans l'air à l'aide de la résultante aérodynamique qui modélise l'action de l'air exercée sur une section de pale de l'hélice lorsque celle-ci est en rotation.

### INTRODUCTION

Un avion léger monomoteur pour voler a besoin d'ailes, mais il a aussi besoin d'un moteur muni d'une hélice<sup>(2)</sup> c'est ce qui va permettre de le propulser (cf. figure 1, page ci-après). Considérons un avion, on y trouve un moteur à combustion interne comme sur une voiture, à la différence que le moteur n'entraîne pas des roues, mais une hélice. Cette hélice peut être réalisée avec différents matériaux<sup>(3)</sup>.

- (1) Rappelons qu'en lycée, les mouvements de rotation ne sont abordés qu'en STI2D...
- (2) Sur des avions de taille plus importante, on utilise un ou plusieurs turbopropulseur (turbomoteur muni d'une hélice).
- (3) Les matériaux les plus utilisés pour réaliser des pales d'hélice sont le bois, le métal et les matériaux composites. Le bois (utilisé historiquement) a l'avantage d'être léger et de bien absorber les vibrations. Il s'agit de bois multicouche lamellé-collé en hêtre (en général, le bord d'attaque est protégé contre les gravillons par une lame en métal (laiton ou alliage d'aluminium). On réalise également des pales d'hélice en duralumin, alliage léger (densité

A



B



**Figure 1** - A Hélice tripale sur un Beech 58, bi-turbopropulseur (ENAC) ; B Hélice bipale DA20, avion monomoteur (aéroclub de l'Hérault).

Dans cet article, nous allons décrire les caractéristiques d'une hélice et proposer une modélisation simplifiée de son fonctionnement dans différentes configurations à l'aide uniquement du concept de force. On assimile une pale d'hélice à une aile d'avion qui tourne.

## 1. DE L'AILE D'AVION À LA PALE D'UNE HÉLICE...

Si l'on observe attentivement les pales d'une hélice, on constate qu'elles ont la forme d'une aile d'avion (profil similaire) (cf. figure 2, page ci-contre). Bien sûr, ce n'est pas un hasard... Les pales ont un extrados bombé comme une aile d'avion (cf. figure 3, page ci-contre).

Rappelons que lorsque l'avion vole, l'air qui s'écoule sur l'aile accélère en rencontrant le profil bombé ce qui provoque une dépression au-dessus de l'aile (extrados de l'aile). L'aile est littéralement aspirée vers le haut. Ce phénomène aérodynamique est modélisé par une force, appelée résultante aérodynamique<sup>(4)</sup> ( $R_a$ ), dirigée vers le haut

de l'ordre de 2,8) à base d'aluminium (95 %, de cuivre 4 %, de magnésium (0,5 %) et de manganèse (0,5 %). Après traitement thermique, cette alliage présente une grande dureté et une forte résistance à la traction. Enfin actuellement on a recours aux matériaux composites à base de fibre de verre, de Kevlar, de carbone, c'est un bon compromis entre le bois et le métal mais les composites restent sensibles aux chocs.

(4) On rappelle que la résultante aérodynamique est la somme vectorielle d'une composante verticale (appelée portance) et d'une composante horizontale (appelée traînée).



**Figure 2** - Hélice de DA20

(diamètre : 1,70 m, pas de l'hélice à 75 % du rayon 10-35°, rapport de réduction 2,43 : 1).

*Profil d'une aile à son extrémité  
(TD10)*

*Profil d'une pale d'hélice  
(tronçon de pale)*



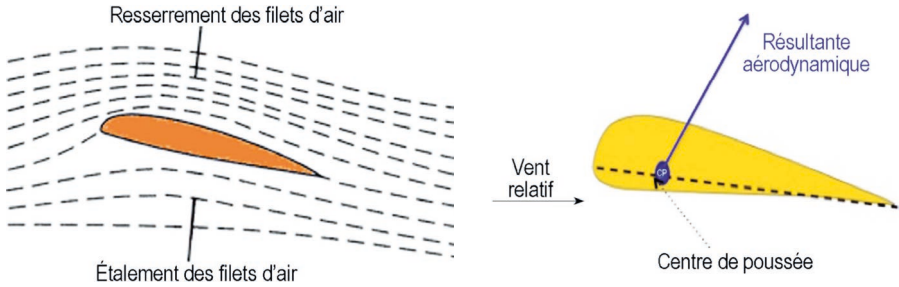
**Figure 3** - Comparaison du profil d'une aile d'avion et d'une pale d'hélice.

et vers l'arrière de l'aile [1] (cf. figure 4, page ci-après).

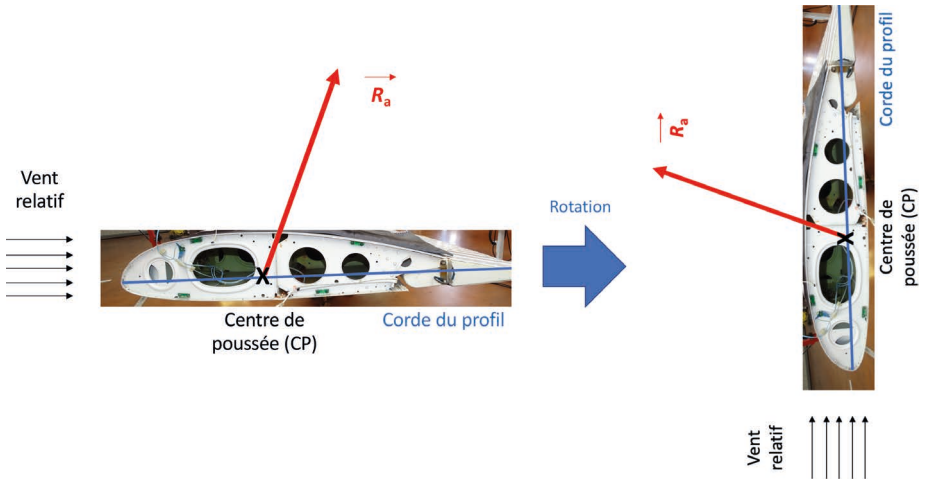
Réalisons une expérience de pensée, plaçons cette aile à la verticale, on obtient une pale d'hélice : les mêmes causes entraînant les mêmes effets quand l'hélice est en rotation, l'air accélère en rencontrant ce profil bombé ce qui provoque une dépression à l'avant de l'hélice.

L'hélice est littéralement aspirée vers l'avant. On modélise ce phénomène par une force appelée résultante aérodynamique ( $R_a$ ) (cf. figure 5, page ci-après). Ainsi, une pale d'hélice peut être assimilée à une aile en rotation.

Remarque : En réalité, plusieurs phénomènes physiques se conjuguent pendant la rotation de l'hélice. La formation d'une dépression à l'avant que l'on vient d'aborder explique l'origine de la traction. De plus, on constate également que les pales de l'hélice



**Figure 4** - Représentation de la résultante aérodynamique sur un profil d'aile. L'angle entre le vecteur associé au vent relatif et la résultante aérodynamique est toujours supérieur à 90° et ces deux vecteurs ne sont pas dans le même demi-plan. La corde de profil délimite ces deux demi-plans.



**Figure 5** - Du profil d'aile au profil d'une pale d'hélice.



**Figure 6** - Principe des actions réciproques appliqué à l'hélice en rotation.

«prennent» de l'air à l'avant et le chasse vers l'arrière en l'accélégrant. En fait, en chassant de l'air vers l'arrière, les pales génèrent une action mécanique modélisée par une force qu'on appelle «l'action» ; or d'après le principe des actions réciproques de Newton<sup>(5)</sup>, il se crée simultanément une force qu'on appelle «la réaction» en l'occurrence une force ici dirigée vers l'avant et qui participe au déplacement de l'avion (cf. figure 6, page ci-contre).

Pour conclure, le rôle d'une hélice est de tracter l'avion. L'action exercée par l'air sur les pales en rotation est modélisée par une force aérodynamique dont une des composantes est la force de traction. L'hélice est fixée à l'extrémité du vilebrequin du moteur. Le rôle du moteur est de transférer de l'énergie mécanique à l'hélice pour la mettre en rotation.

## 2. DESCRIPTION D'UNE HÉLICE

Une hélice est constituée de deux ou plusieurs pales<sup>(6)</sup> réunies sur une partie centrale (moyeu) qui tournent dans un plan vertical (cf. figure 7).

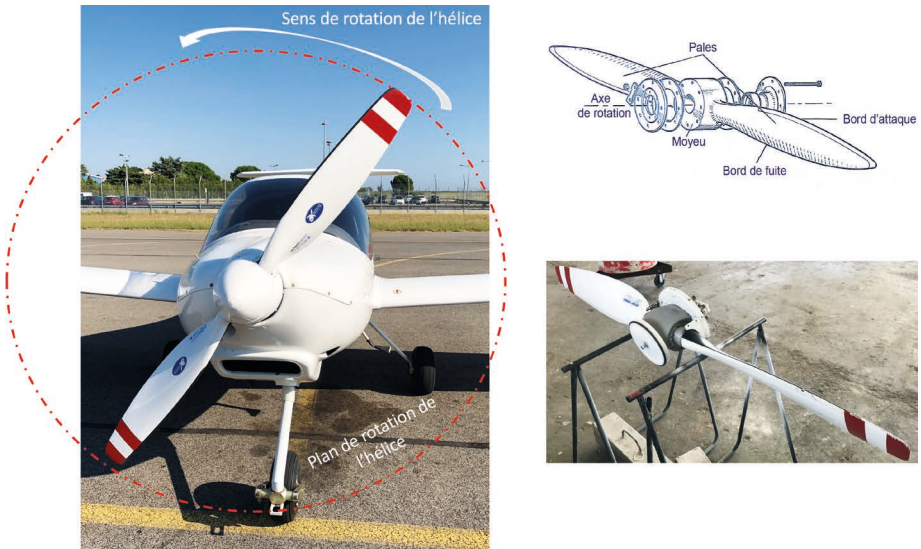


Figure 7 - Différents types d'hélices (à droite, hélice de l'A400M).

Vue de la place du pilote, les pales tournent dans le sens du mouvement des

- (5) «Toute action exercée dans une direction donnée génère une action identique dans la direction opposée, appelée action réciproque».
- (6) Le diamètre d'une hélice est limitée par la vitesse en bout de pale qui ne doit pas atteindre la vitesse du son. En augmentant le nombre de pales, on augmente la puissance absorbée par le moteur. Le nombre de pales est limité car lorsqu'une pale tourne, elle est soumise au sillage de la pale précédente ce qui peut diminuer le rendement global. L'augmentation du diamètre de l'hélice et du nombre de pales diminuent le bruit.

aiguilles d'une montre<sup>(7)</sup> (cf. figure 8). Le diamètre d'une hélice est celui du cercle décrit par l'extrémité des pales.



**Figure 8** - Hélice bipàle d'un DA20 d'aéroclub (aéroclub de l'Hérault).

Le moyeu de l'hélice peut être entraîné directement par le moteur, dans ce cas l'hélice est fixée sur un axe solidaire de l'extrémité du vilebrequin. L'hélice peut être entraînée par l'intermédiaire d'un réducteur<sup>(8)</sup> et tourne alors à une vitesse inférieure à celle du vilebrequin (cf. figure 9, page ci-contre). L'hélice est protégée à l'avant par un cône d'hélice encore appelé « casserole d'hélice » dont la fonction est d'assurer l'aérodynamisme et l'écoulement de l'air pour le refroidissement du moteur (cf. figure 10, page ci-contre).

Une section de pale suivant un plan perpendiculaire à l'axe de la pale fait apparaître un profil aérodynamique comparable à un profil d'aile (cf. figure 11, page ci-contre). Par analogie avec une aile d'avion, on parle dans le cas d'une pale d'hélice de bord d'attaque (bord de la pale attaquant l'air), de bord de fuite (bord opposé au bord d'attaque), d'intrados (partie la moins bombée) et d'extrados (partie la plus bombée) de la pale (cf. figure 12, page ci-contre).

(7) Le sens de rotation d'une hélice dépend de la cambrure et de la torsion des pales. Sur un bi-turbopropulseur, chaque hélice tournera dans un sens différent.

(8) Pour limiter le bruit et la vitesse en bout de pale à 85 % de la vitesse du son, le diamètre d'une hélice et sa vitesse de rotation sont limités à 1,80 m et 3600 tours/min. D'où la nécessité d'un réducteur si la vitesse de rotation du moteur est supérieure.

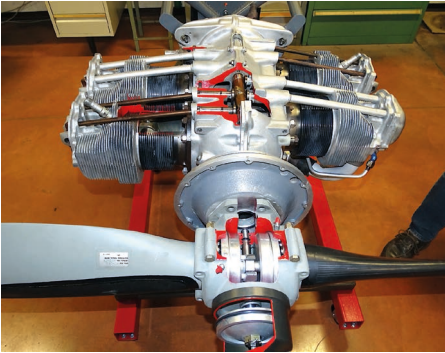


Figure 9 - Moteur écorché avec son hélice.



Figure 10 - Cône d'hélice.

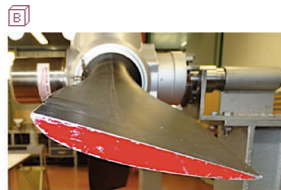
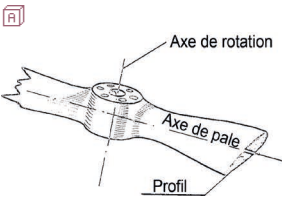


Figure 11 - (B) Profil d'une pale, (C) profil d'une aile d'avion TB10 ENAC, notez la ressemblance.

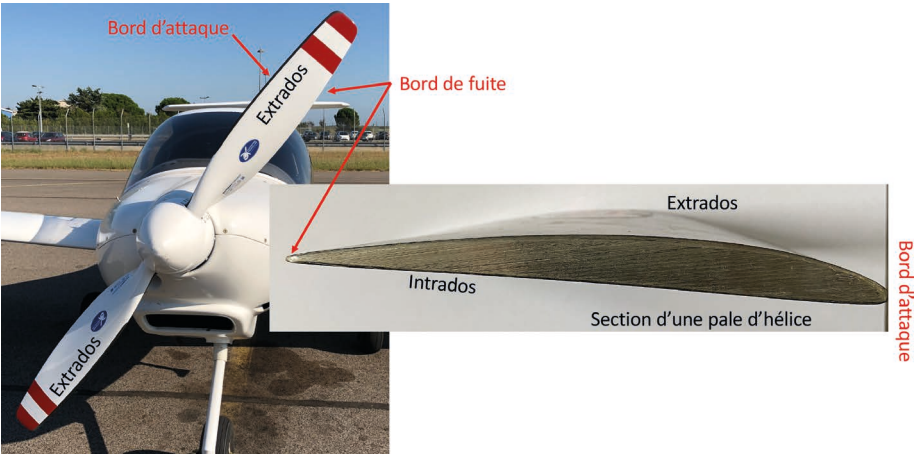


Figure 12 - Description d'une pale d'hélice.

### 3. CARACTÉRISTIQUES D'UNE HÉLICE [3-4]

#### 3.1. Corde de la pale

Par définition et analogie avec la corde du profil d'une aile, c'est le segment de droite qui relie le bord d'attaque et le bord de fuite du profil d'une pale d'hélice (cf. figure 13).

#### 3.2. Calage de l'hélice

Par définition, l'angle  $\theta$  formé par la corde de profil de la pale et le plan de rotation de l'hélice est appelé l'angle de calage. Comme une pale est vrillée (cf. sous-paragraphe 3.3.), par convention on dira que le calage de l'hélice est celui du profil de la section de référence se situant à 75 % du rayon maximum (cf. figure 14).

#### 3.3. Vrillage de l'hélice

En observant une pale (cf. figure 2, pages précédentes), on constate que l'épaisseur et la forme de la pale varient sur toute sa longueur, pourquoi ?

Considérons la situation où le moteur fonctionne, l'avion est à l'arrêt, l'hélice est animée d'une certaine vitesse angulaire de rotation  $\omega$ . Un point M situé sur une des pales à une distance  $r$  de l'axe de rotation est animé d'une vitesse tangentielle  $\mathbf{v}_t$  dont la valeur est donnée par la relation mathématique :  $v_t = \omega \cdot r$ . Contrairement à ce qui se passe sur une aile, où c'est l'avion qui avance pour créer une circulation d'air autour du profil de l'aile, la vitesse nécessaire pour faire apparaître la résultante aérodynamique sur la pale est obtenue par la mise en rotation

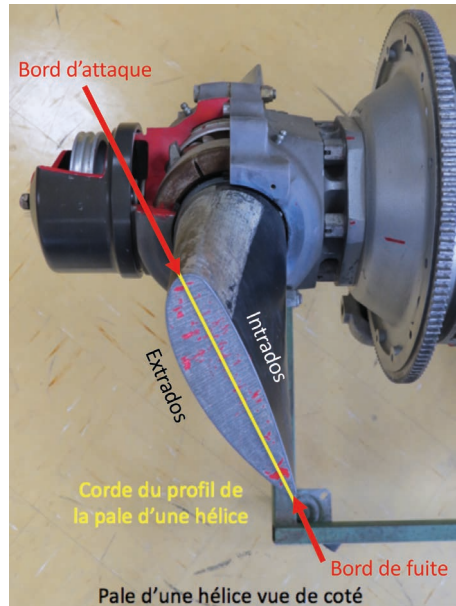


Figure 13 - Corde d'une section de pale d'hélice.

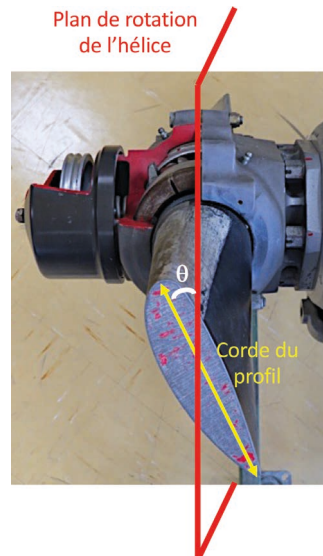


Figure 14 - Angle de calage.



de celle-ci. Ainsi, contrairement à l'aile d'avion, pour laquelle la vitesse du vent relatif est identique en chaque point de l'aile, la vitesse tangentielle le long d'une pale augmente du moyeu à son extrémité (cf. figure 15). Si la section de la pale avait la même forme sur toute sa longueur, il apparaîtrait alors une augmentation, le long de la pale, de la valeur de la résultante aérodynamique<sup>(9)</sup> [2].

Pour maintenir à peu près la résultante aérodynamique constante le long de la pale, une solution technologique consiste à vriller légèrement la pale par construction autour de son axe longitudinal (cf. figure 16). Cela revient à diminuer l'angle de calage de l'hélice au fur et à mesure que l'on s'éloigne du pied de pale. L'idée est d'avoir dans la partie de la pale proche du moyeu, une incidence plus grande dans le but d'augmenter  $C_a$  pour compenser la valeur faible de la vitesse tangentielle ; à l'extrémité de la pale, une incidence plus faible dans le but de diminuer  $C_a$  pour compenser la valeur plus grande de la vitesse tangentielle.

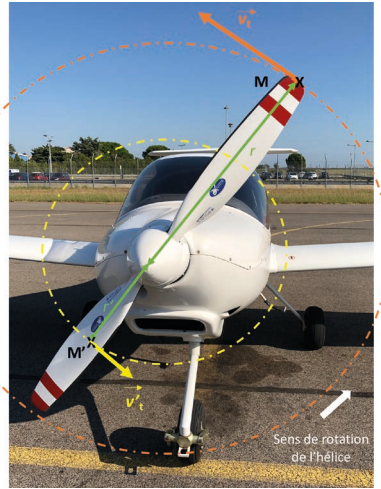


Figure 15 - Influence de la distance entre le point M et le moyeu sur la vitesse tangentielle.

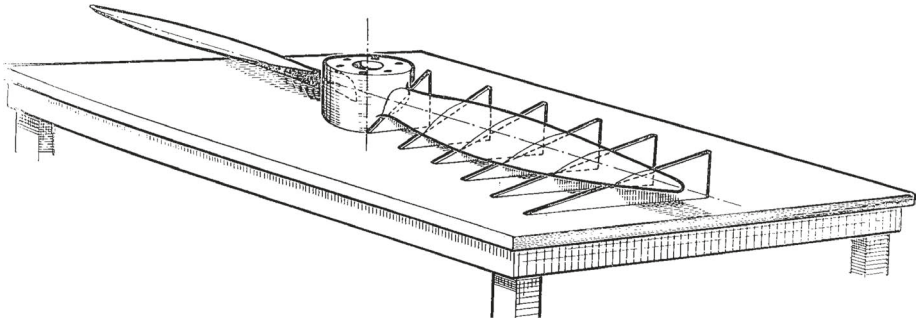
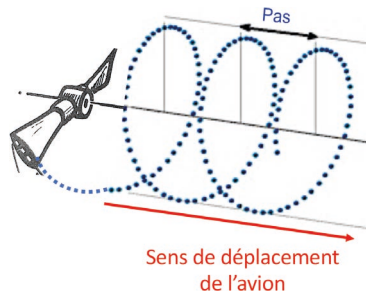


Figure 16 - Vrillage de la pale.

- (9) On rappelle l'expression mathématique de la résultante aérodynamique :  $R_a = 1/2 \rho v^2 S C_a$  avec  $v$  la vitesse du vent relatif (ici  $v$  est la vitesse tangentielle, si l'avion est à l'arrêt et que le moteur fonctionne),  $S$ , la surface de la pale,  $\rho$  la masse volumique de l'air et  $C_a$  un coefficient aérodynamique qui dépend essentiellement de deux facteurs : la forme du profil de la pale et de son angle d'incidence.

### 3.4. Pas géométrique de l'hélice

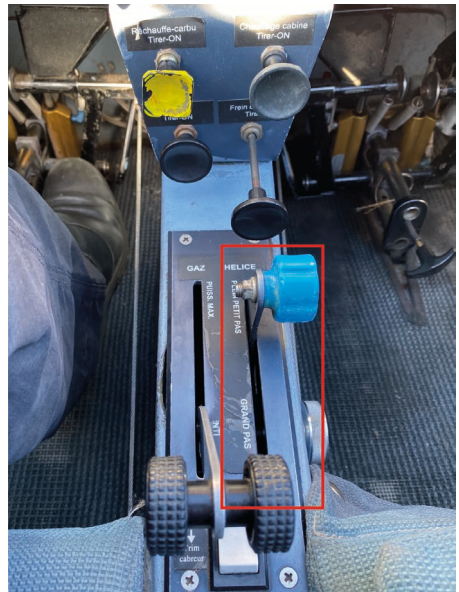
Lorsque le moteur fonctionne et l'avion avance, à l'image d'un tire-bouchon, l'hélice effectue un mouvement combiné de rotation autour de son axe et de translation parallèlement au sens de déplacement de l'aéronef. La trajectoire décrite par un point M de la pale est une hélice (cf. figure 17). En un tour, un point M situé à l'extrémité d'une des pales avance d'une certaine distance : par définition, le pas de l'hélice (appelé « pas géométrique » ou « pas théorique ») correspond à la distance parcourue par l'hélice le long de son axe de rotation en un tour.



**Figure 17** - Trajectoire décrite par un point M d'une pale d'hélice lorsque l'avion se déplace.

#### Remarques

- ◆ Le pas de l'hélice est contrôlé par la manette bleue dans le poste de pilotage (cf. figure 18) qui agit sur l'angle de calage des pales.
- ◆ Dans la pratique, le pas réel, dit « pas aérodynamique » de l'hélice est légèrement moins élevé que le « pas géométrique », cela est dû à la compressibilité de l'air (les molécules gazeuses de l'air se dérobent sous la pression des pales et l'hélice ne progresse à chaque tour que d'une quantité inférieure au pas théorique).
- ◆ Il ne faut pas confondre le calage de l'hélice, qui mathématiquement correspond à un angle et le pas de l'hélice qui mathématiquement correspond à une distance.

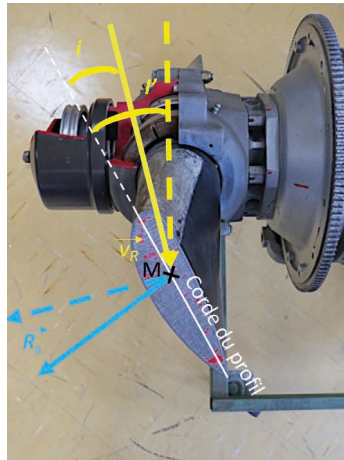


**Figure 18** - Manette bleue permettant d'ajuster le pas de l'hélice en fonction des phases de vol.

- ◆ Modifier l'angle de calage d'une hélice modifie le pas de l'hélice.

#### 4. MODÉLISATION DU FONCTIONNEMENT DE L'HÉLICE TRACTRICE

On rappelle que l'angle d'incidence,  $i$ , ou plus communément l'incidence correspond à l'angle formé entre la corde de profil de la pale et la direction du vecteur vent relatif<sup>(10)</sup>. L'orientation de la résultante aérodynamique,  $\mathbf{R}_a$  associée au profil d'une section de pale varie avec la valeur de l'incidence [1, 4]. Ainsi, l'angle entre le vecteur associé au vent relatif et la résultante aérodynamique est toujours supérieur à  $90^\circ$  et ces deux vecteurs ne sont pas dans le même demi-plan. La corde de profil délimite ces deux demi-plans. La résultante aérodynamique se trouve donc dans le plan de représentation (cf. figure 19).



**Figure 19** - Représentation de la résultante aérodynamique en fonction de l'angle d'incidence. Ici, le plan de rotation de l'hélice est perpendiculaire au plan de la feuille et l'axe de rotation est dans le plan de la feuille.

Dans cette partie, il s'agit de représenter la résultante aérodynamique afin de faire apparaître, à partir de celle-ci, la force de traction que l'on note  $\mathbf{F}_T$ . On suppose dans cette étude que l'angle de calage des pales est fixé.

- (10) L'étude de l'écoulement de l'air autour d'un objet peut être étudiée de deux manières : soit on considère que l'objet se déplace dans une veine d'air avec une vitesse  $v_{\text{objet/air}}$ , soit on considère l'objet comme étant immobile dans la veine d'air dont les filets d'air sont animés d'une vitesse  $v_{\text{air/objet}}$  appelée vitesse du vent relatif, noté  $v_R$ . On admet que ces deux situations sont équivalentes en physique des fluides : les valeurs des vitesses  $v_{\text{objet/air}}$  et  $v_{\text{air/objet}}$  sont égales mais les vecteurs associés à ces deux vitesses sont opposés.

#### 4.1. Étape 1 : représentation du vecteur vitesse associée au vent relatif ( $v_R$ ) et angle d'incidence

Procédons en deux étapes :

##### 4.1.1. Première étape

Le moteur fonctionne, l'hélice tourne, mais l'avion est à l'arrêt<sup>(11)</sup>, l'hélice est alors animée d'une vitesse angulaire de rotation  $\omega$ . Un point M situé sur une des pales, à une distance  $r$  de l'axe de rotation, est animé d'une vitesse tangentielle ( $v_t$  dont la valeur est donnée par la relation mathématique :  $v_t = \omega r$  (cf. figure 20A). Le « vecteur vitesse » associé au vent relatif,  $v_R$ , ressenti au niveau du bord d'attaque de la pale en M, à la même norme et la même direction que le vecteur associé à la vitesse tangentielle,  $v_t$  mais est de sens opposé (cf. figure 20B).



Figure 20 - (A) Vecteur vitesse tangentielle - (B) Vecteur vitesse vent relatif.

##### 4.1.2. Seconde étape

L'avion à présent se déplace au sol ou vole à vitesse constante. L'incidence n'est plus celle constatée lorsque l'avion est à l'arrêt et que l'hélice tourne. Il faut donc établir la direction du vent relatif pour trouver cette nouvelle incidence. Considérons par exemple la situation de vol en palier avec une vitesse de l'avion par rapport à l'air

(11) Cette situation se rencontre par exemple au point d'attente (point avant l'entrée de piste) où le pilote a serré le frein de parking et réalise les essais moteur avant le décollage.

constante et égale à  $v_p$  (cf. figure 21).



Figure 21 - Vecteur vitesse propre d'un avion en vol palier à vitesse constante.

On cherche la direction et le sens du « vecteur vitesse » associé au vent relatif sur la pale d'hélice. Pour cela, il faut commencer par trouver le « vecteur vitesse total »  $\mathbf{v}_T$  associé à ce point M, obtenu à partir de la somme vectorielle du :

- ◆ «Vecteur vitesse tangentielle»  $\mathbf{v}_t$  en ce point M de la pale en rotation qui dépend de la vitesse de rotation  $\omega$  de l'hélice. Cette vitesse est contrôlée par la manette de pas (manette de couleur bleue, cf. figure 18, pages précédentes). L'instrument de contrôle est le tachymètre qui fournit un nombre de tours par minute de l'hélice (RPM) (cf. figure 22A).
- ◆ «Vecteur vitesse propre» de l'avion  $\mathbf{v}_p$ . La vitesse de propre de l'avion dépend de la puissance fournie par le moteur et qui est commandée par le pilote à l'aide de la manette des gaz (manette de couleur noire). L'instrument de contrôle est la pression d'injection (cf. figure 22B).

A



B



Figure 22 - A Tachymètre - B Pression d'injection.

Construisons ce « vecteur vitesse total »,  $\mathbf{v}_T$  pour une vitesse de rotation et une vitesse propre de l'avion fixées (cf. figure 24, page ci-après). Pour cela, on considère une section de pale et un point M situé à une distance  $r$  du moyeu d'une pale d'hélice.

La figure 23B servira de base à la représentation des vitesses et des forces appliquées à l'hélice dans toute la suite de l'article.



Figure 23 - Représentation de la section de pale d'une hélice pour l'étude des forces.

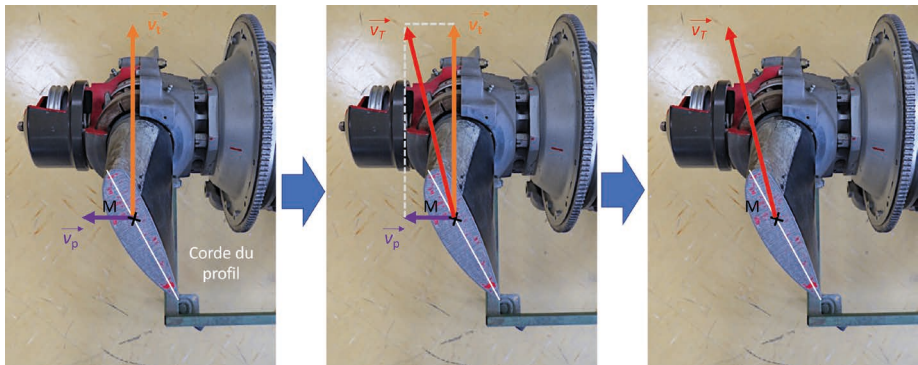
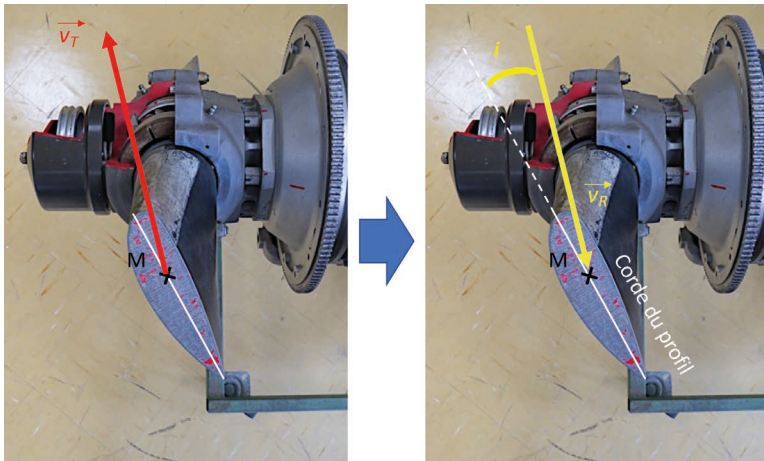


Figure 24 - Les différentes étapes de construction du vecteur vitesse total  $\mathbf{v}_T$ . On commence par représenter en un point M de la corde du profil d'une pale, le vecteur vitesse tangentielle  $\mathbf{v}_t$  de la pale en rotation, puis le vecteur vitesse de l'avion  $\mathbf{v}_p$  (photo de gauche). Pour représenter le vecteur vitesse total  $\mathbf{v}_T$  (photo de droite), on fait la somme vectorielle de  $\mathbf{v}_t + \mathbf{v}_p$  (photo du milieu).

Il nous reste à représenter le « vecteur vitesse » associé au vent relatif,  $\mathbf{v}_R$  et déterminer l'angle d'incidence (cf. figure 25, page ci-contre). Ainsi, lorsque l'avion se déplace au sol ou lorsqu'il vole, l'incidence n'est plus déterminée par rapport à la direction de la vitesse tangentielle comme lorsqu'il est à l'arrêt, mais selon celle du vent relatif dont la direction dépend à la fois de la vitesse tangentielle et de la vitesse propre de l'avion.

**Remarque** : on peut facilement constater graphiquement que l'angle d'incidence augmente avec une diminution de la vitesse propre et/ou une augmentation de la



**Figure 25** - Représentation des vecteurs : vitesse totale et vitesse du vent relatif, de même direction mais de sens opposé.

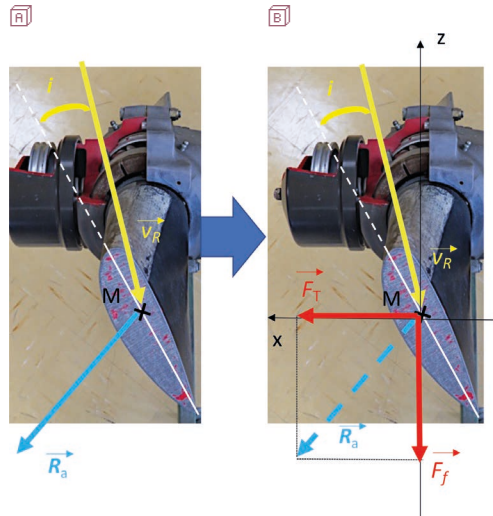
vitesse de rotation de l'hélice (donc de la vitesse tangentielle). Inversement, l'angle d'incidence diminue avec une augmentation de la vitesse propre et/ou une diminution de la vitesse angulaire.

#### 4.2. Étape 2 : représentation de la force de traction ( $F_T$ )

Une fois représentés le vecteur vitesse associé au vent relatif et la détermination de l'angle d'incidence, on représente :

- ◆ Dans un premier temps, le vecteur associé à la résultante aérodynamique,  $\mathbf{R}_a$  (cf. figure 26A, page ci-après). L'angle entre le vecteur associé au vent relatif et la résultante aérodynamique est toujours supérieur à  $90^\circ$  et ces deux vecteurs ne sont pas dans le même demi-plan. La corde de profil délimite ces deux demi-plans. La résultante aérodynamique se trouve donc dans le plan de représentation.
- ◆ Dans un second temps, on projette le vecteur  $\mathbf{R}_a$  sur les axes du repère défini ci-dessous pour faire apparaître la force de traction (cf. figure 26B, page ci-après). Repère choisi : l'axe de traction, appelé  $(x'x)$ , parallèle à la direction du vecteur vitesse propre de l'avion. C'est sur cet axe de l'on représente la force de traction,  $\mathbf{F}_T$  et l'axe  $(z'z)$  perpendiculaire à l'axe de traction. C'est sur cet axe de l'on représente la force de résistance de la pale  $\mathbf{F}_R$ .

Ainsi, une pale comme une aile d'avion est le siège de phénomènes aérodynamiques modélisés par une force appelée résultante aérodynamique. Dans le cas d'une pale d'hélice en mouvement, l'une des composantes de la résultante aérodynamique est une force de frottement,  $\mathbf{F}_R$ , l'autre composante,  $\mathbf{F}_T$ , contribue à la traction de l'avion.



**Figure 26** - Représentation de la résultante aérodynamique **A** - projection de  $\vec{R}_a$  sur les axes du repère (xMz) **B**  $\vec{R}_a$ ,  $\vec{F}_T$  et  $\vec{F}_f$  se trouvent dans le plan de représentation (plan de la feuille).

## 5. DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS D'UNE HÉLICE

Pour une hélice à calage fixe (ou calage fixé pour une hélice à pas variable) et une vitesse de rotation de l'hélice fixée, la modification de la vitesse de déplacement de l'avion par rapport à l'air va modifier la valeur de l'angle d'incidence et en conséquence l'orientation du vecteur résultante aérodynamique sur le profil de la pale. Nous allons montrer que dans cette situation, l'hélice peut se retrouver dans différentes configurations de fonctionnement.

### 5.1. Premier cas

Fonctionnement normal de l'hélice, l'hélice est tractive, l'incidence est positive ; c'est le cas étudié dans le paragraphe précédent (cf. figure 26).

### 5.2. Second cas

Le frein aérodynamique : si par rapport à la situation de fonctionnement normal (cf. figure 26), la vitesse propre de l'avion augmente trop, la direction du vent relatif bascule de l'autre côté de la corde du profil, on dit que l'incidence est négative. Or, comme l'angle entre le vecteur associé au vent relatif et la résultante aérodynamique est toujours supérieur à  $90^\circ$  et que ces deux vecteurs ne sont pas dans le même demi-plan (la corde de profil délimite ces deux demi-plans), la résultante aérodynamique change



alors d'orientation. Elle passe derrière le plan de rotation de l'hélice (cf. figure 27). La projection du vecteur  $\vec{R}_a$  sur les axes du repère défini à la page précédente fait apparaître ici une « force de traction » qui s'oppose à l'avancée de l'avion. L'avion est freiné par son hélice.

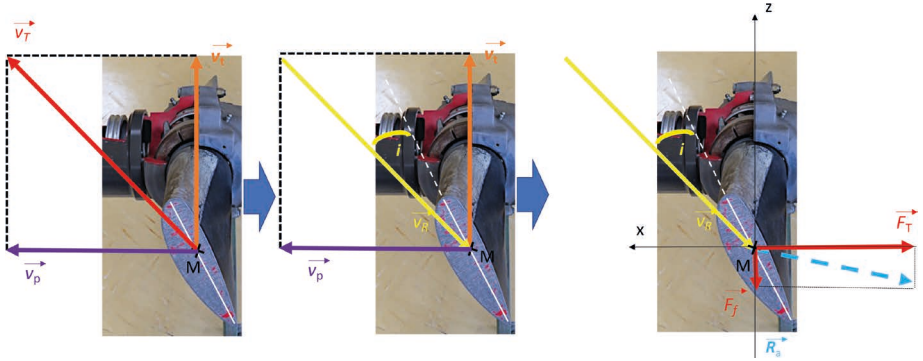


Figure 27 - Hélice en configuration frein aérodynamique.

### 5.3. Troisième cas la transparence (drapeau)

La pale (bord d'attaque) est dans le lit du vent relatif. Ceci se produit lorsque l'incidence devient quasi nulle. La résultante aérodynamique est alors réduite à la seule force de traction qui s'oppose à l'avancée de l'avion, mais dont l'intensité est très faible (cf. figure 28).

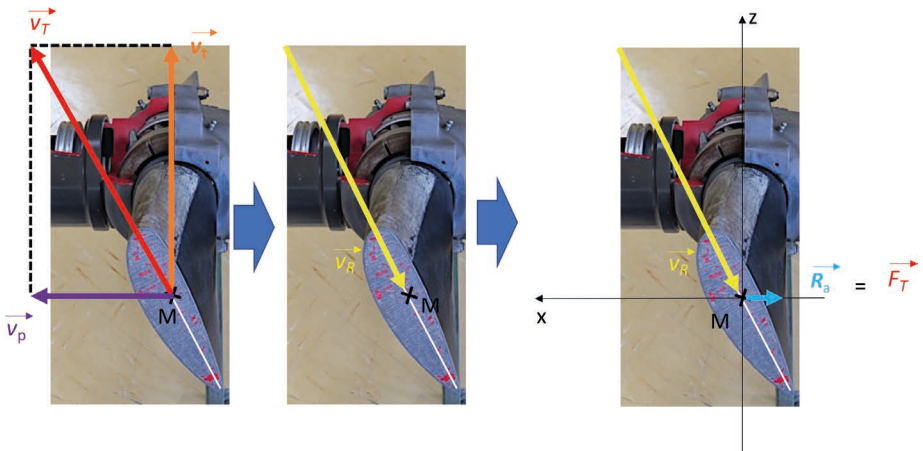


Figure 28 - Hélice en configuration transparence.

#### 5.4. Quatrième cas, le moulinet<sup>(12)</sup>

Lorsque l'angle d'incidence est très négatif, la résultante aérodynamique se décompose en une force de traction qui s'oppose à l'avancée de l'avion, mais dont l'intensité est faible et en une force de frottement qui, ici, est orientée dans le sens du mouvement de rotation de l'hélice (cf. figure 29). Cette situation se produit par exemple lorsque survient une panne moteur avec arrêt de l'hélice. Le pilote va pousser sur le manche pour mettre l'avion à piquer afin d'essayer de relancer la rotation de l'hélice en espérant ainsi redémarrer le moteur.

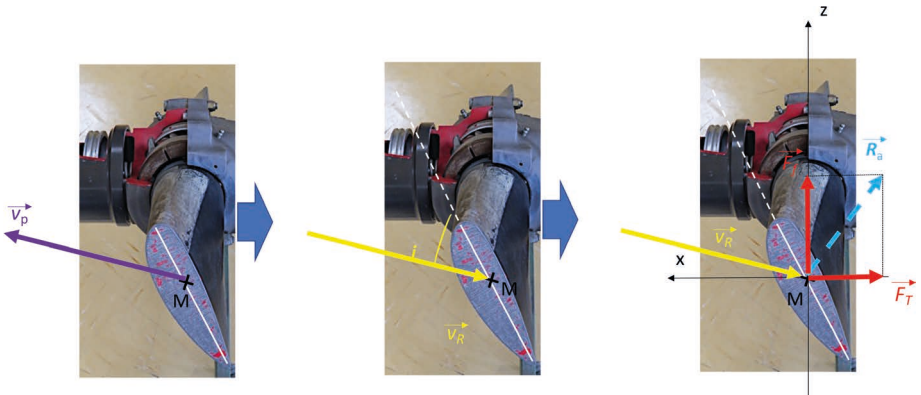


Figure 29 - Hélice en configuration moulinet.

## 6. RENDEMENT D'UNE HÉLICE À CALAGE FIXE ET D'UNE HÉLICE À CALAGE VARIABLE

Par définition, le rendement d'une hélice est défini comme étant le rapport entre l'énergie ou la puissance restituée par l'hélice et l'énergie ou la puissance mécanique fournie par le moteur. Le rôle d'une hélice est de transformer l'énergie mécanique fournie par le moteur en une énergie utile pour le déplacement de l'aéronef. Une partie de cette énergie mécanique sera dissipée sous forme thermique liée, entre autres, au frottement de l'hélice dans l'air. En conséquence, le rendement d'une hélice sera toujours inférieur à un. Le rendement d'une hélice est de l'ordre de 0,7 à 0,8 pour les plus performantes. Il existe deux sortes d'hélices (cf. figure 30, page ci-contre) :

- ◆ *des hélices à calage fixe* : l'angle de calage est fixé par le constructeur et ne peut être modifié ;

(12) En cas de panne moteur, l'hélice continue à tourner entraînée par le vent relatif. Sa traînée est maximale. Si le moteur n'arrive pas à redémarrer, on positionnera l'hélice en drapeau pour cela les pales seront placées dans le vent relatif. L'hélice ne tourne plus, la traînée est alors minimale. Le drapeau est obtenu lorsque le pilote met le « plein grand pas » (voir ci-après).

- ◆ *des hélices à calage variable* : l'angle de calage peut être modifié par le pilote en fonction des différentes phases de vol.

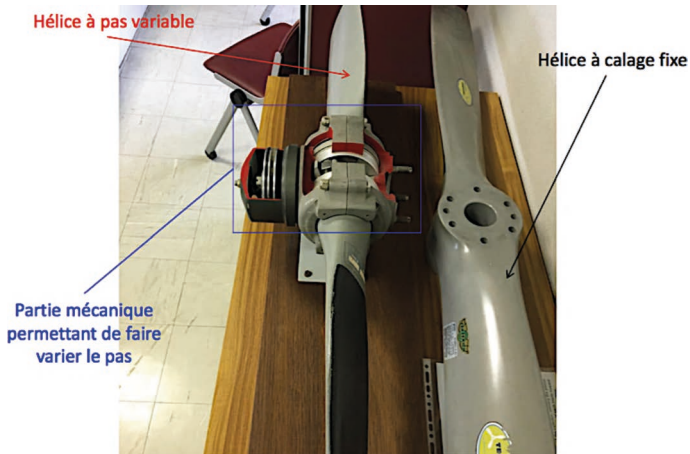


Figure 30 - Les deux sortes d'hélices, à calage fixe et à calage variable.

### 6.1. Rendement d'une hélice à calage fixe

La forme complexe d'une hélice est adaptée à un choix de performances qui dépendent de sa vitesse de rotation et de la vitesse de déplacement d'un avion. Le graphique ci-dessous (cf. figure 31) représente le rendement d'une hélice à calage fixe en fonction de la vitesse de déplacement de l'avion.

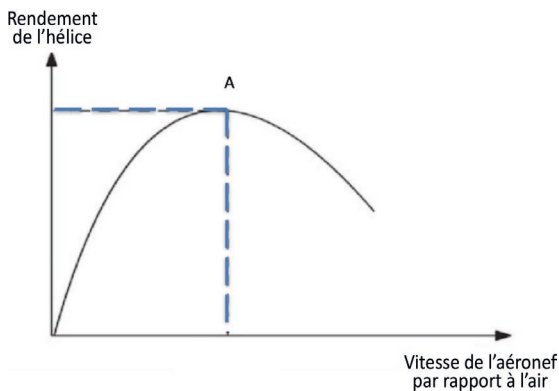


Figure 31 - Allure de l'évolution du rendement d'une hélice à calage fixe en fonction de la vitesse de l'avion/air.

En observant le graphe de la figure 31, on constate que le rendement d'une hélice

à calage fixe est meilleur à vitesse de croisière (de l'ordre de 0,8) qu'au décollage et à l'atterrissage.

## 6.2. Rendement d'une hélice à calage variable

L'intérêt des hélices à calage variable (pas variable) est qu'elles peuvent s'adapter aux différentes phases de vol. En effet, l'angle de calage sera adapté en fonction de la vitesse de déplacement de l'avion et la vitesse de rotation de l'hélice afin de conserver une incidence donnant le meilleur rendement le plus longtemps possible. Par analogie, le calage d'une hélice est assimilable à la boîte de vitesse d'une automobile : la première vitesse correspondant à un petit calage et la cinquième vitesse correspondant à un grand calage. En agissant sur la manette bleue située dans le poste de pilotage, le pilote peut faire varier le calage des pales : il peut placer la manette dans une position au plein « petit pas » (petit angle de calage) au décollage et à l'atterrissage et augmenter le pas en croisière. En vol, la puissance étant réglée par la manette des gaz et contrôlée par lecture de la pression d'admission, un pilote agit sur la manette bleue pour afficher la vitesse de l'hélice correspondante à la puissance du moteur et donc à un rendement optimal du couple moteur/hélice (cf. figure 32).

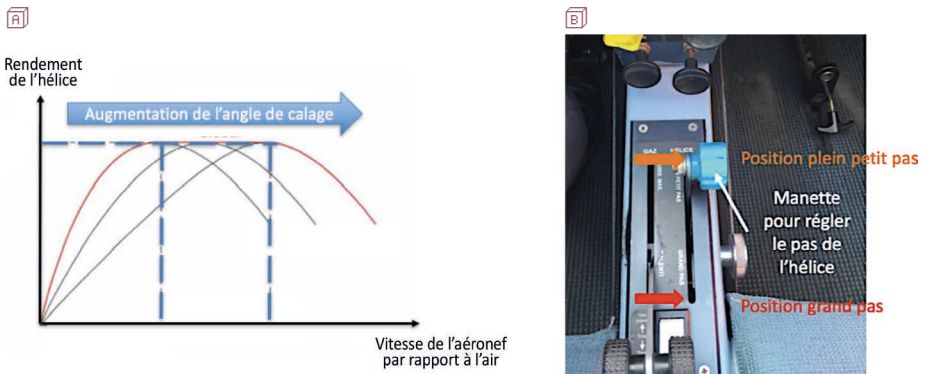


Figure 32 - (A) Allure du rendement d'une hélice à pas variable en fonction de la vitesse de l'avion par rapport à l'air - (B) Manette pour contrôler le pas de l'hélice.

La check-list d'un aéronef rappelle au pilote dans quelle configuration doit se trouver l'hélice pour les phases de décollage et d'atterrissage (cf. figure 33, page ci-contre).

## 6.3. Modélisation d'une hélice à calage variable

Que se passe-t-il lorsque le pilote modifie le pas de l'hélice (c'est-à-dire l'angle de calage des pales) ? Cela revient à modifier l'angle d'incidence et donc la valeur et

Avant mise en route		Atterrissage	
Palonniers	Réglés verrouillés	<b>Hélice</b>	<b>Plein petit pas</b>
Ceintures	Attachées	Volets	LDG (2 <sup>e</sup> cran)
Frein de parking	Serré	Fuel pompe	ON
Commandes	Libres, essayées	Vitesse volets ATT	57 Kts + Kve
Réchauffage carburateur	Froid poussé	Message radio	Fait
Friction manette	Réglée	Remise de gaz	
Manette des gaz	Plein réduit	Assiette	Positive
<b>Manette hélice</b>	<b>Plein petit pas</b>	<b>Hélice</b>	<b>Plein petit pas</b>
Horizon cagé maintenu	BATT + GEN sur ON	Gaz	Plein gaz
Alarme générale	Allumée	Réchauffage carburateur	Poussé
Alarme fuel	Allumée	Variomètre	Positif
Verrière (Canopy)	Fermée verrouillée	Volets	Position T/O (1 <sup>er</sup> cran)
Alarme Canopy	Éteinte	Vitesse	65 Kts
Croisière			
Manette des gaz	À la demande		
<b>Manette hélice</b>	<b>1900 - 2260 RPM</b>		

Figure 33 - Check-list d'un DA20 (aéroclub de l'Hérault).

la direction de la résultante aérodynamique et par conséquent la force de traction (cf. figures 34 et 35)...

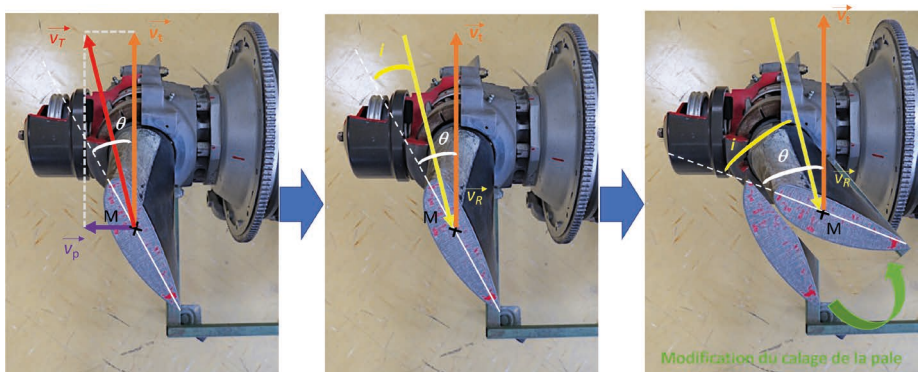


Figure 34 - Influence du pas des pales sur l'angle d'incidence. Tous les vecteurs représentés sont dans le plan de la feuille.

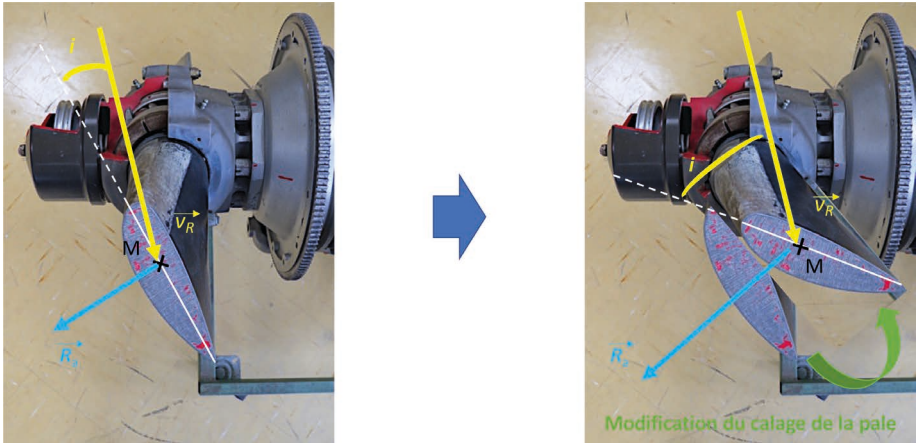


Figure 35 - Influence du pas des pales sur la résultante aérodynamique.

Ainsi modifier le pas des pales de l'hélice permet de conserver une incidence optimale pour le vol à des vitesses propres de l'avion différentes.

## CONCLUSION

Nous venons de voir que le fonctionnement d'une hélice associée à un moteur d'avion peut être expliqué à l'aide du concept de force. Ainsi, une pale comme une aile d'avion est le siège de phénomènes aérodynamiques modélisés par une force appelée résultante aérodynamique.

Dans le cas d'une pale d'hélice en mouvement, l'une des composantes de la résultante aérodynamique est une force de frottement,  $F_f$ , l'autre composante,  $F_T$ , contribue à la traction de l'avion. En fonction de l'angle d'incidence et des vitesses de rotation des pales et de déplacement de l'avion, l'hélice peut se trouver dans différentes configurations de fonctionnement.

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le centre ENAC (École nationale de l'aviation civile) de Castelnauary, en particulier, Madame Nathalie Delesse, chef du département technique, Monsieur Jean-François Sicard, responsable de l'unité de maintenance de Castelnauary, Monsieur Jean-Luc Enmanuel, chef de la division maintenance et production ainsi que tous les personnels du centre et aussi l'aéroclub de l'Hérault à Montpellier pour l'accueil, la disponibilité, l'écoute et leur aide.

## BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- [1] D. Ducourant et N. Cheymol, «Aéronautique et physique : autour du concept de force (partie 1)», *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 109, n° 972, p. 421-467, mars 2015.
- [2] D. Ducourant et N. Cheymol, «Aéronautique et physique : de l'avion à l'hélicoptère : autour du concept de force (partie 2)», *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 109, n° 975, p. 897-922, juin 2015.
- [3] L'avionnaire : <https://www.lavionnaire.fr>
- [4] Les cours Mermoz : <https://www.institut-mermoz.com>
- [5] Deux ressources vidéos<sup>(13)</sup> :
  - ◆ Description d'une hélice et étude mécanique : <https://www.ac-montpellier.fr/cid114393/description-de-l-helice-et-etude-mecanique.html>
  - ◆ Utilisation du logiciel *GeoGebra* pour étudier et comprendre le fonctionnement de l'hélice : <https://www.ac-montpellier.fr/cid103162/utilisation-du-logiciel-geogebra-pour-etudier-et-comprendre-le-fonctionnement-de-l-helice.html>

## Compléments de l'article

*Cet article comporte des compléments nommés :*

- ◆ *L'hélice (partie 1) - Principe de fonctionnement aérodynamique.mp4*
- ◆ *L'hélice (partie 2) - Différentes configurations étudiées avec GeoGebra.mp4*

*L'ensemble est disponible sur le site de l'UdPPC sous la forme d'un fichier zippé 10280995.*



**Nicolas CHEYMOL**

*IA-IPR physique-chimie*

*Correspondant académique pour les sciences et la technologie (CAST)*

*Délégué académique à la formation aéronautique et spatiale (DAFA)*

*Académie de Montpellier*



**Dominique DUCOURANT**

*Professeure de physique-chimie retraitée*

*Chargée de mission DAFA*

*Académie de Montpellier*



**Jean-Jacques CALLIET**

*Professeur de mathématiques retraité*

*Chargé de mission DAFA*

*Académie de Montpellier*

(13) Ces vidéos sont disponibles sur le site de l'UdPPC.