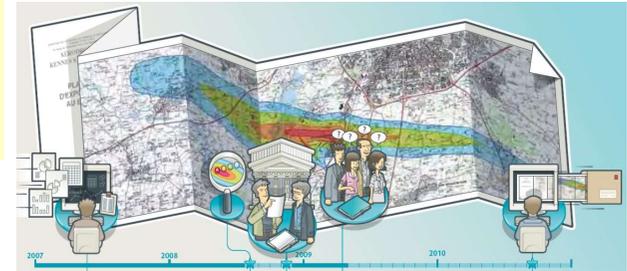
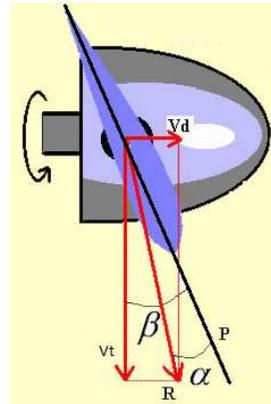
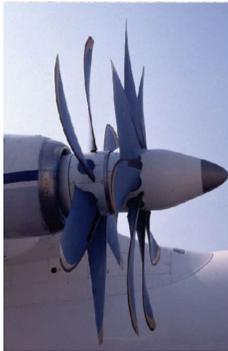




3. Etude des aéronefs et des engins spatiaux

3.2.2 Hélices et rotors Contraintes liées au développement durable Version Aout 2025



3. Etude des aéronefs et des engins spatiaux

3.2 Les groupes motopropulseurs

- Hélices et Rotors
 - Principe
 - Pas
 - Fixe
 - Variable
 - Calage
 - Rendement
 - Couple gyroscopique et souffle hélicoïdal
- Contraintes liées au développement durable

Groupes motopropulseurs

- Hélices et rotors

- Principe

- Pas

- fixe

- variable

- Calage

- Couple gyroscopique et souffle hélicoïdal



L'hélice



hélice à 2 pales en bois



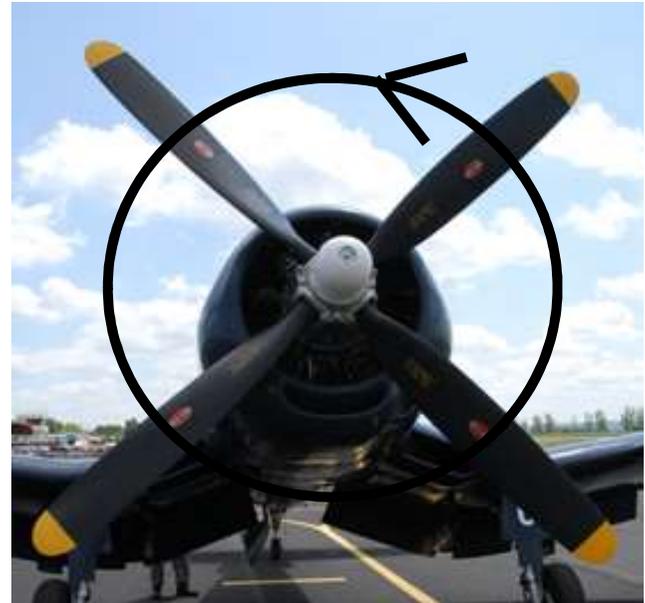
hélice à 6 pales en fibre de carbone

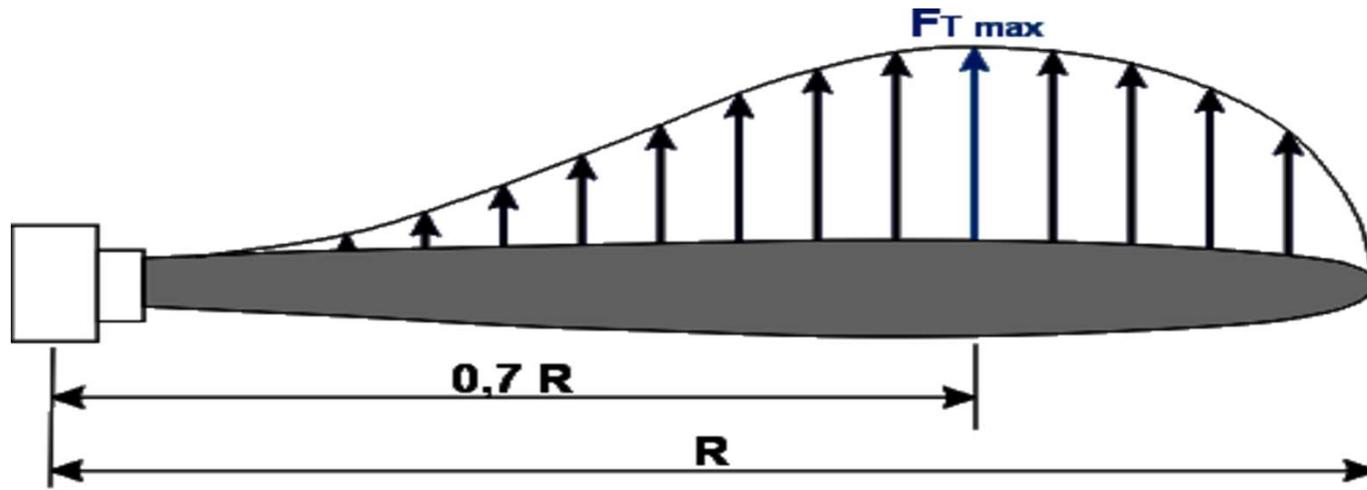
hélice à 4 pales en métal



Principe

- **C'est un dispositif:**
 - rotatif
 - formé d'un certain nombre de pales ayant un profil d'aile
- **En mouvement ce dispositif crée:**
 - une dépression devant lui
 - une surpression derrière lui.
- **Il accélère des masses d'air.**
- **C'est une "aile tournante".**





- ➡ L'hélice n'a pas un fonctionnement aérodynamique optimal. Les meilleures performances sont obtenues vers 70% à 80% de R.
- ➡ La géométrie de l'hélice (diamètre, nombre de pales) est à adapter aux performances du moteur (puissance à transmettre). Il est possible d'adjoindre un réducteur entre le vilebrequin du moteur et l'axe de rotation de l'hélice.
- ➡ Les hélices sont fabriquées en bois (plus légères mais plus fragiles), éventuellement renforcées au bord d'attaque, en acier (plus lourdes . . . conséquences sur le centrage !), ou en matériaux composites.

Groupes motopropulseurs

- Hélices et rotors
 - Principe
 - Pas d'une hélice
 - Calage
 - fixe
 - variable
 - Couple gyroscopique et souffle hélicoïdal

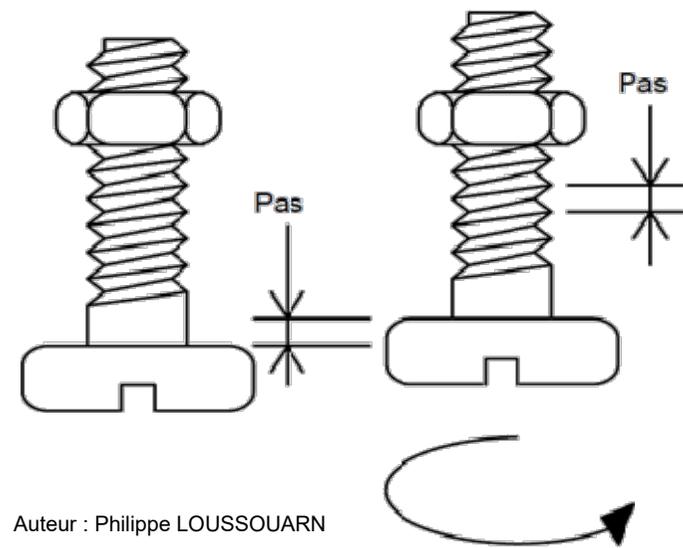


Le pas de l'hélice

- Pas = Distance parcourue pour un tour d'hélice.



boulon : vis + écrou

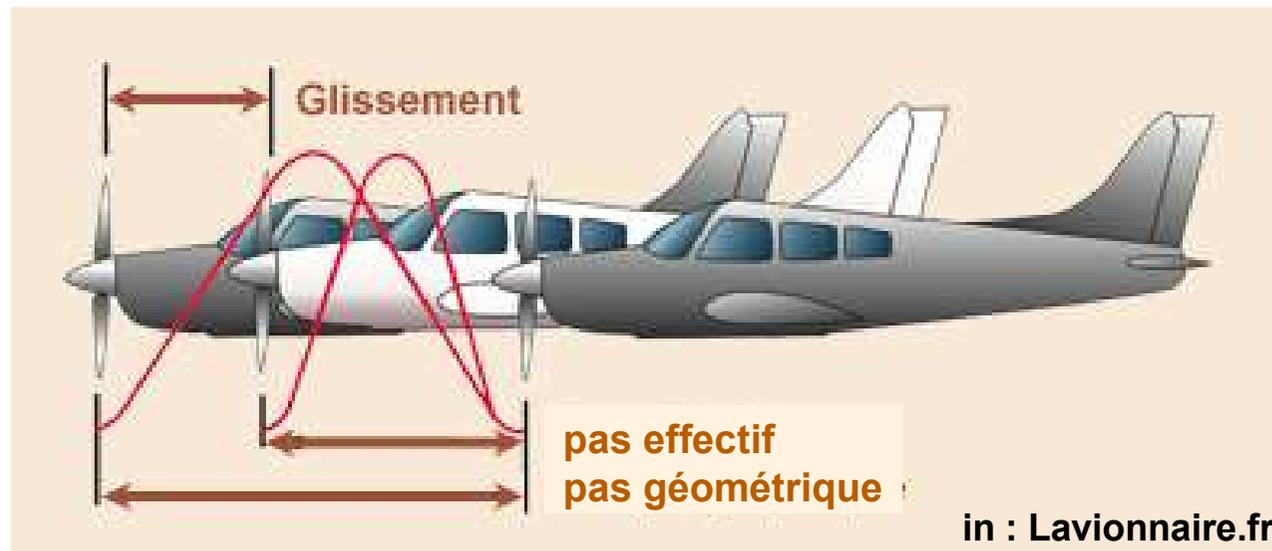


Auteur : Philippe LOUSSOUARN

1 Tour dans le sens horaire

Pas géométrique, pas effectif

- Le **pas effectif** est la distance effectivement parcourue par l'avion pendant un tour d'hélice.
- Le **pas théorique** (géométrique) est la distance que parcourrait l'hélice en un tour si elle se vissait dans un milieu incompressible et inerte.



- A vitesse de rotation constante le bout de pale se déplace plus vite que près du noyau :

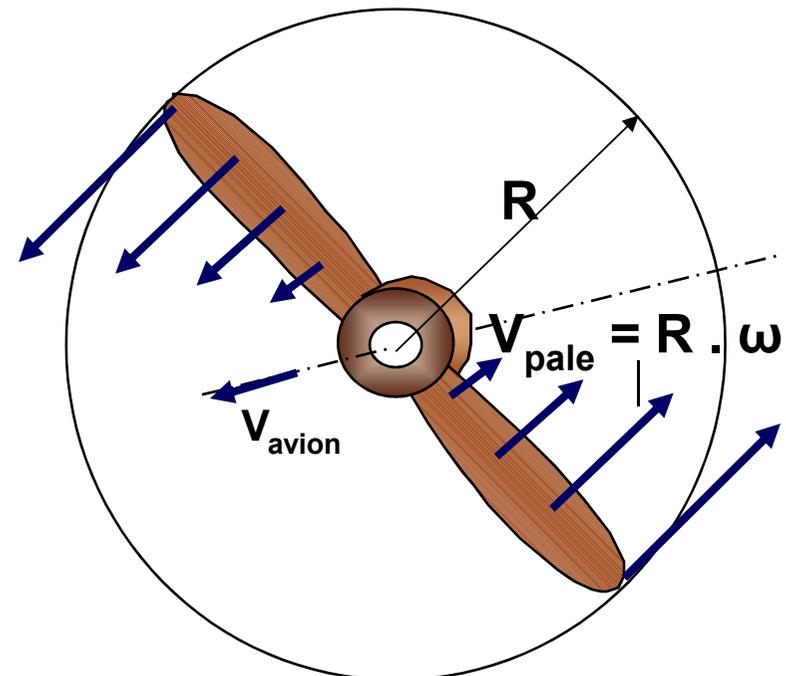
$$V = R \cdot \omega$$

- Si le calage de la pale (angle entre la pale d'hélice et l'axe de rotation) était constant, l'extrémité de la pale créerait beaucoup plus de traction que la partie proche du centre

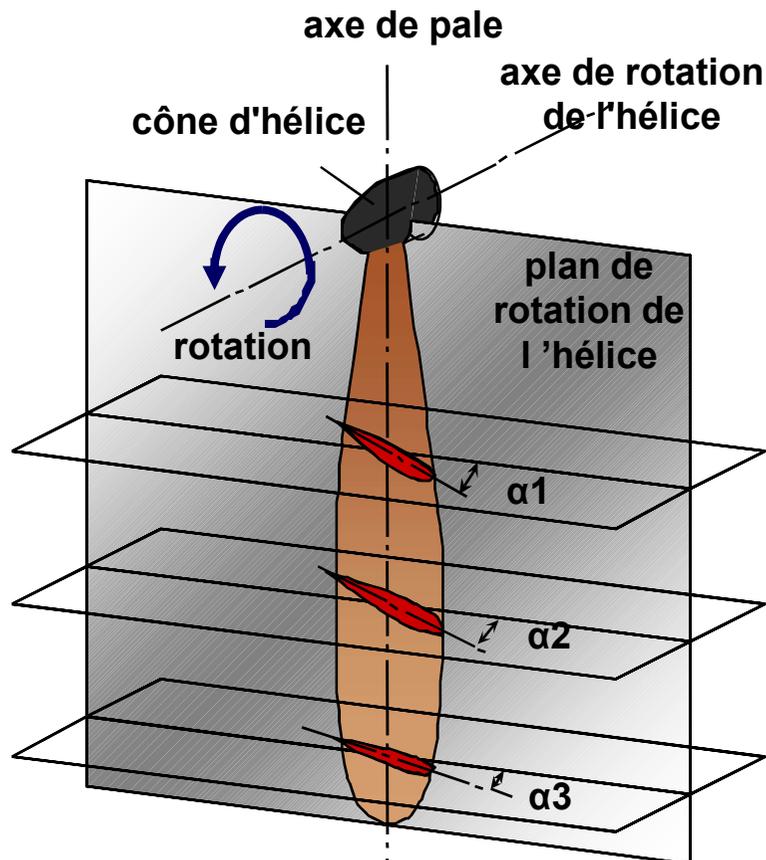
ω → vitesse angulaire (en rad/s)
 R → distance de l'axe de l'hélice au point considéré de la pale
 V → vitesse tangentielle du point considéré

- L'hélice pourrait se déformer et se rompre

- L'hélice à pales plates est donc à bannir car son rendement est mauvais et elle risque de casser



Le pas de l'hélice



$$\text{pas} = 2\pi \cdot R_i \cdot \tan(\alpha_i)$$

- Pour un fonctionnement optimum, la pale devra donc être vrillée de la base vers le bout de pale pour que le pas **reste constant sur toute la longueur de la pale.**
- Donc quand le rayon R_i augmente, α doit diminuer

Simulation de calcul avec des pales plates

Calculons le pas à deux endroits de l'hélice ayant des pâles plates.

- Prenons par exemple :
 - $\alpha = 45^\circ$ ($\text{Tan}(45^\circ) = 1$)
 - $R = 10 \text{ cm}$ et $d = 70 \text{ cm}$
- Calcul du pas au niveau du moyeu: $R=10$
 - $\text{Pas} = 2\pi \cdot d \cdot \text{Tan}(\alpha) = 62,8 \text{ cm}$
- Calcul du pas au niveau du bout de pale: $D=70$
 - $\text{Pas} = 2\pi \cdot d \cdot \text{Tan}(\alpha) = 440 \text{ cm}$

Que pensez vous de ces résultats?

Auteur : Philippe LOUSSOUARN

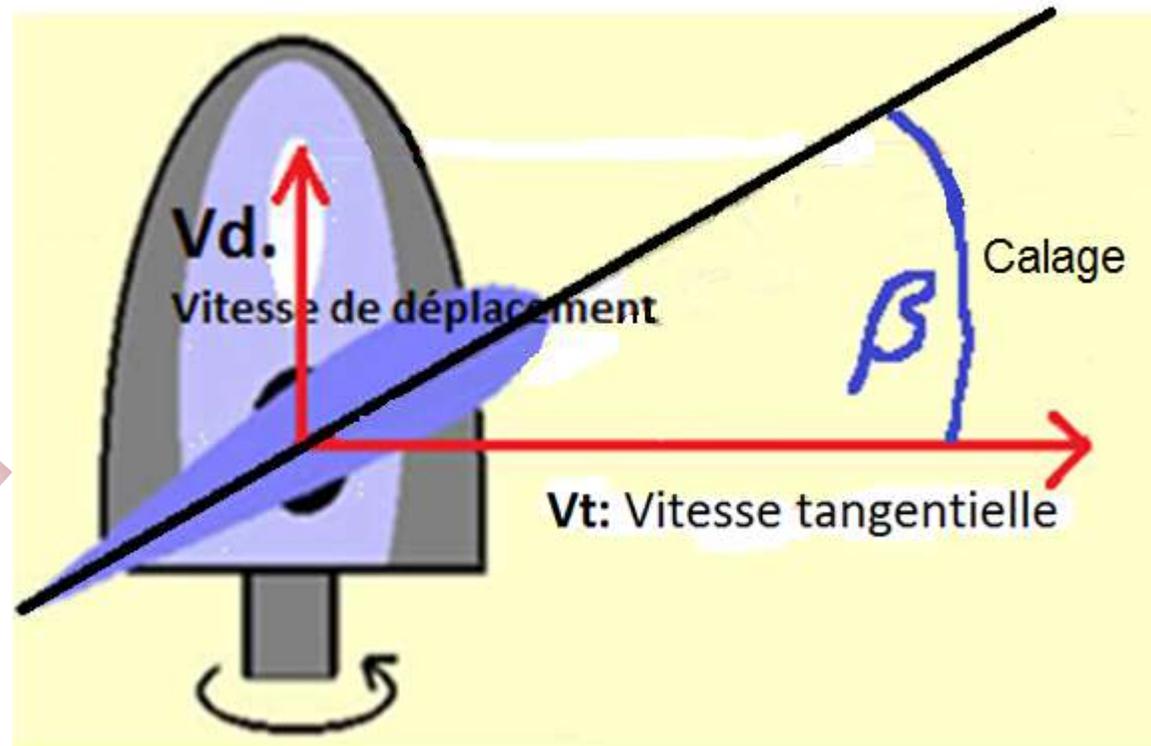
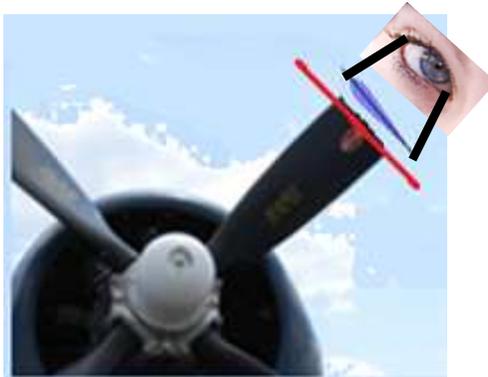
Groupes motopropulseurs

- Hélices et rotors
 - Principe
 - Pas d'une hélice
 - Calage
 - fixe
 - variable
 - Couple gyroscopique et souffle hélicoïdal



Le calage

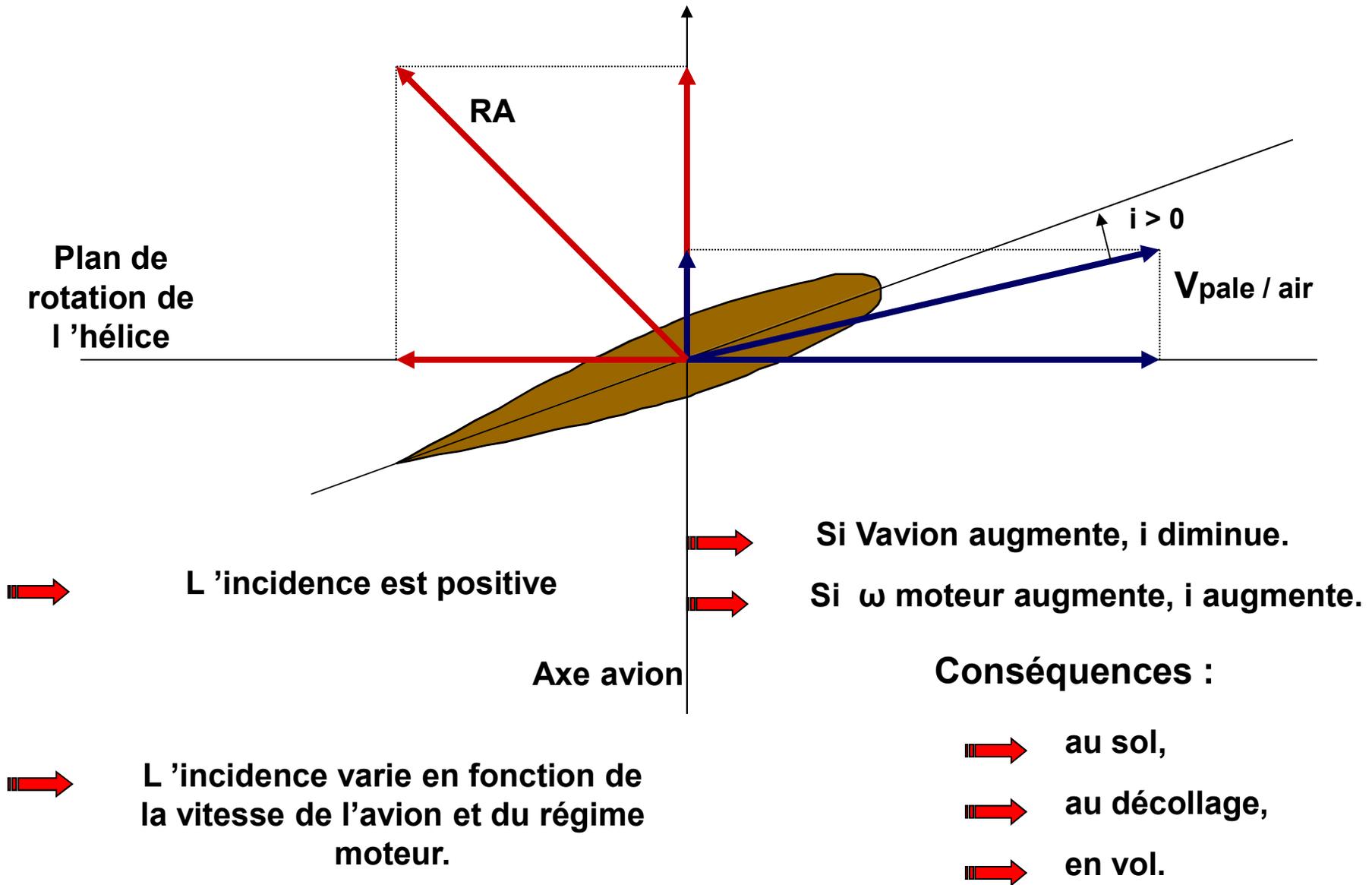
On prend comme référence de calage, la valeur du calage à 70% du bord de fuite de la pale.



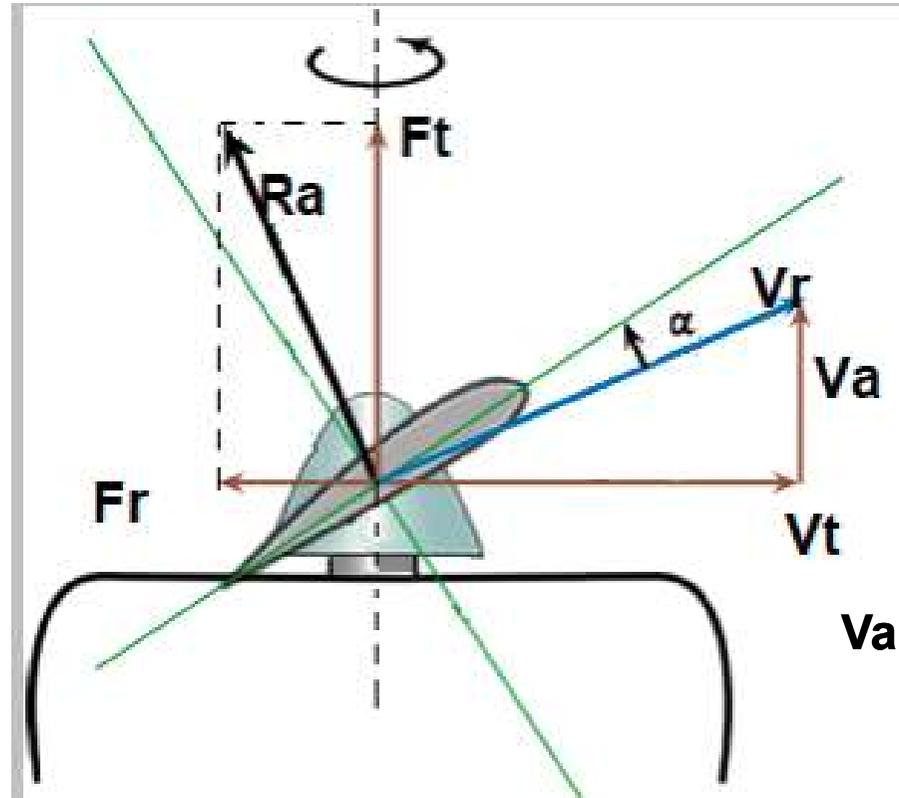
$$V_t = 2 \pi r.n \text{ (n vitesse de rotation en tours/s, r = rayon)}$$

β : Angle de calage de l'hélice. Angle entre la corde du profil de l'hélice et le plan de rotation de l'hélice.

Étude aérodynamique



Étude aérodynamique - situation standard



V_t : vitesse tangentielle de l'hélice
 V_a : vitesse d'avancement de l'avion
 V_r : vitesse résultante de la pale/air, =
"vent" relatif pour la pale

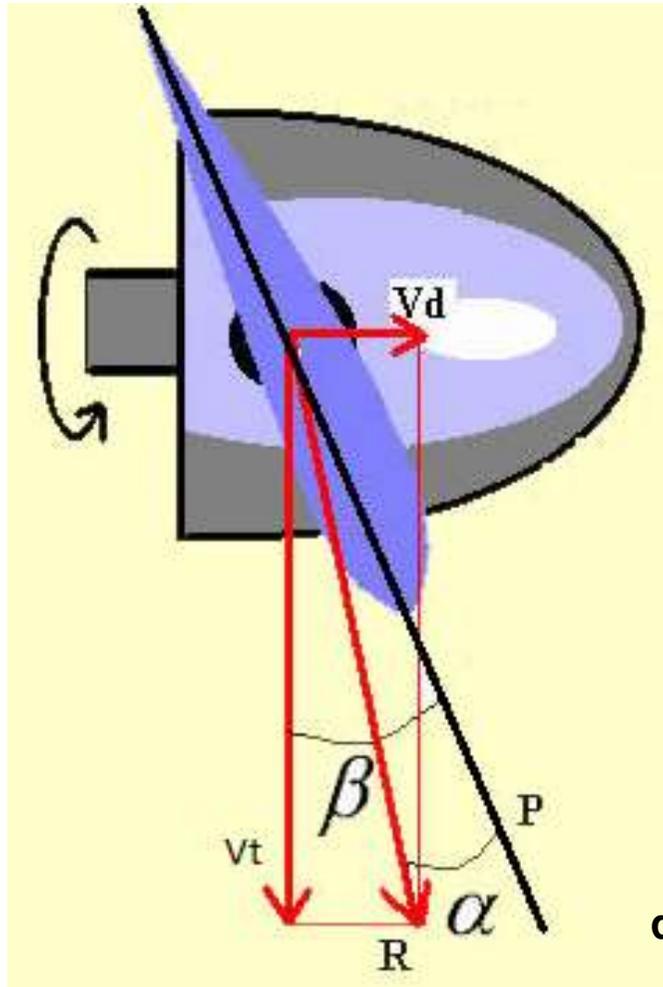
R_a : résultante aérodynamique,
perpendiculaire à V_r , se décomposant en F_t
(traction) et F_r (force centrifuge)

Quand V avion croît,
l'incidence α diminue, la
traction aussi.

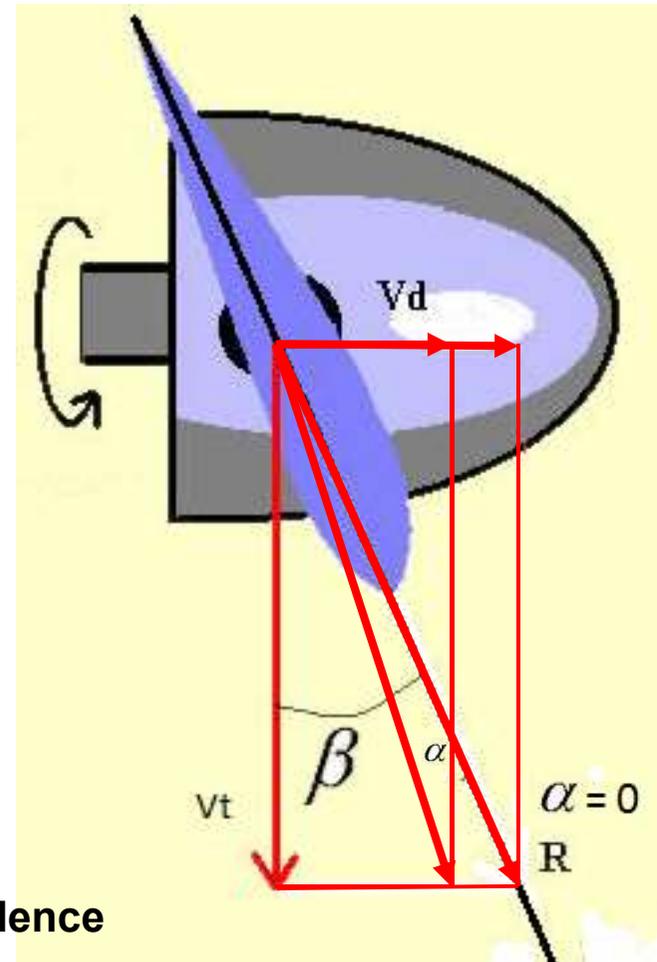
A faible vitesse, l'incidence
de l'hélice est très forte, elle peut
décrocher. Le couple sur le moteur
est très fort (il est freiné).

Le calage de l'hélice à pas fixe est donc un compromis !

Étude aérodynamique - situation «standard»



α : angle d'incidence



Vitesse déplacement faible.

Vitesse déplacement plus grande.

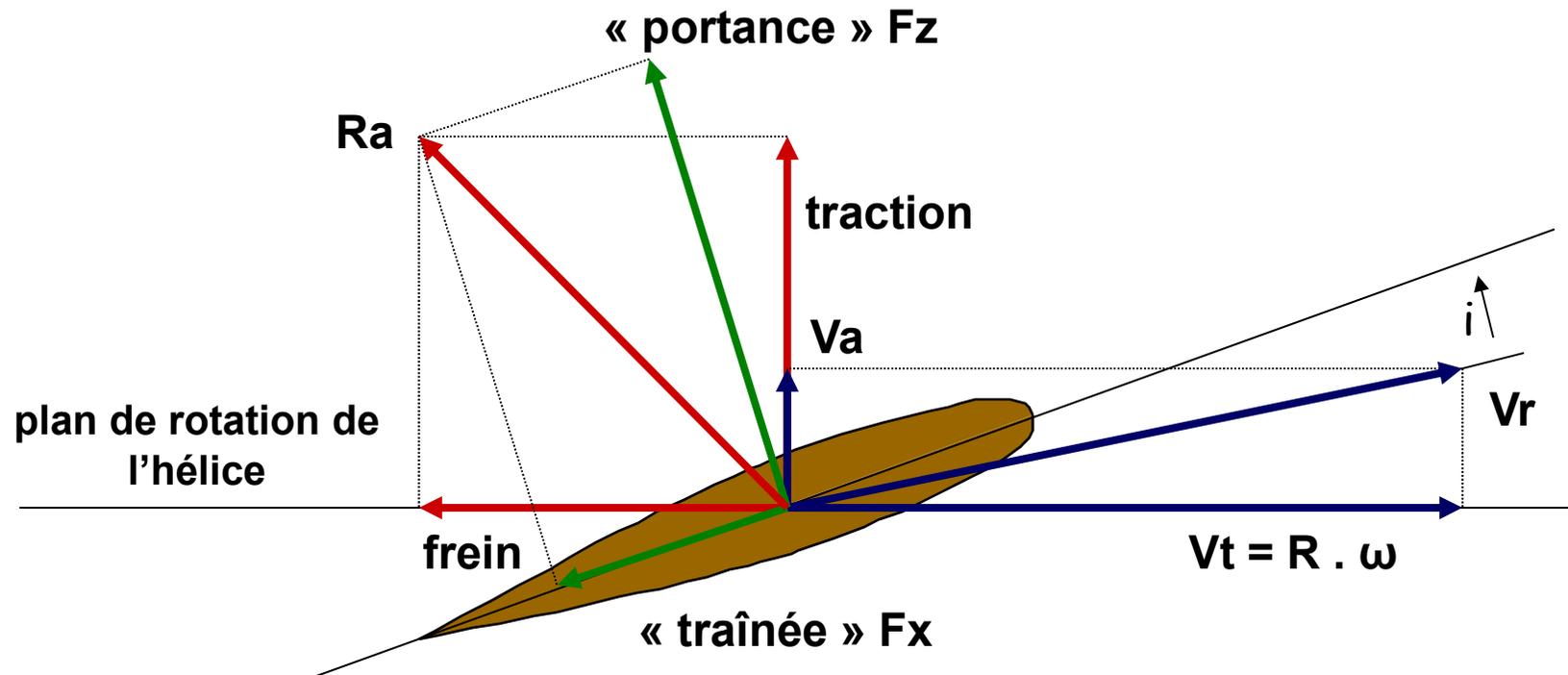
vitesse tangentielle et calage identiques

Étude aérodynamique

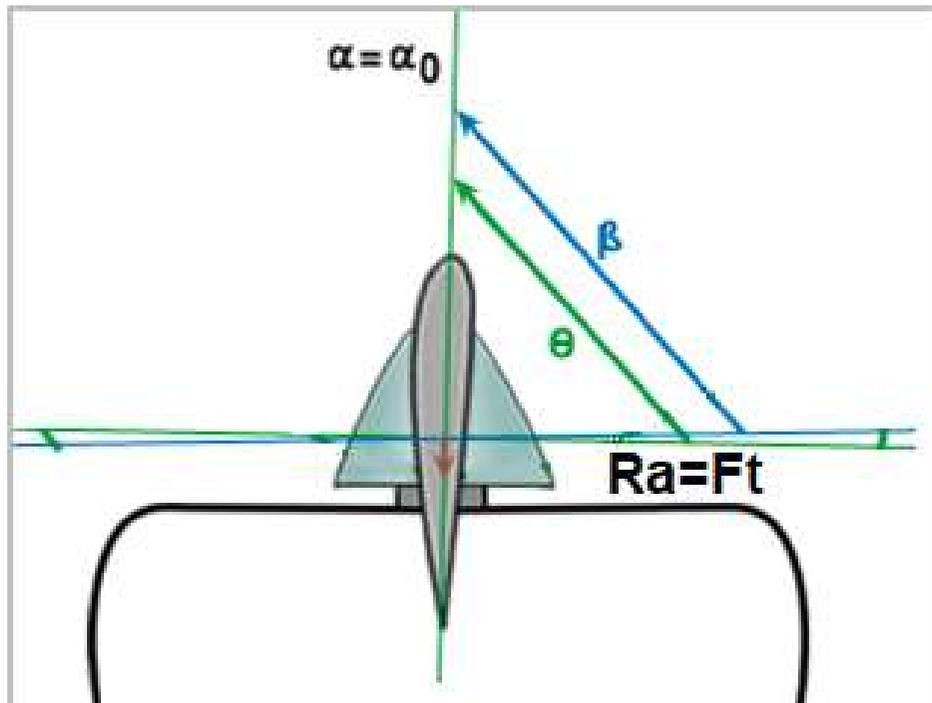
Fonctionnement normal (traction)

V_t : vitesse tangentielle de l'hélice
 V_a : vitesse d'avancement de l'avion
 V_r : vitesse résultante de la pale/air, =
"vent" relatif à la pale

R_a : résultante aérodynamique,
perpendiculaire à V_r , se décomposant en F_t
(traction) et F_r (force centrifuge)



Étude aérodynamique - hélice en drapeau



La pale est dans le lit du vent relatif

Le couple sur le moteur est nul
La traction est très faible

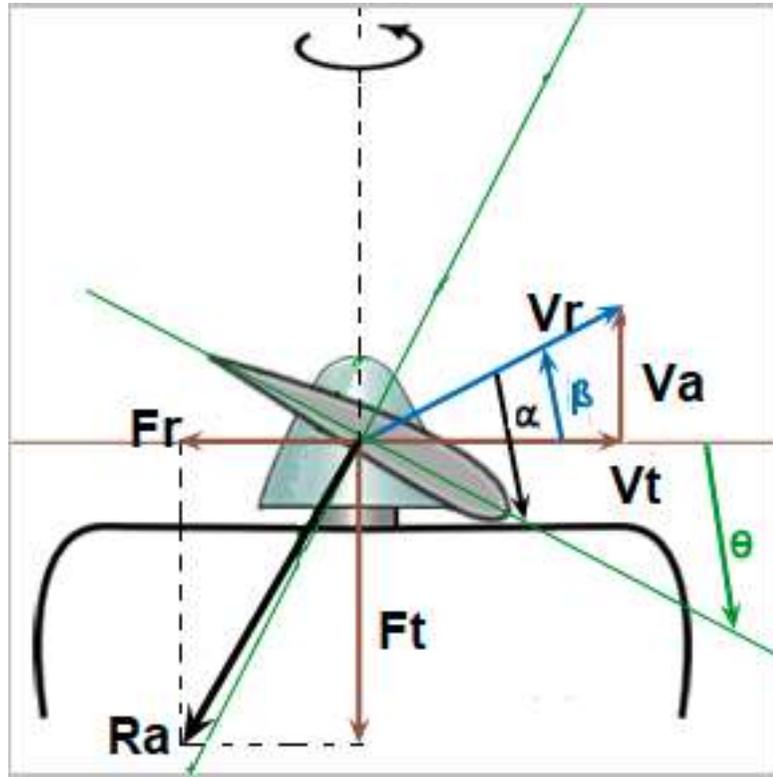
Étude aérodynamique : « drapeau »

Fonctionnement **hélice en drapeau**

- Le calage vaut 90° :
 - la pale est parallèle à l'écoulement de l'air, son incidence est nulle.
 - c'est la position qui provoque le moins de traîne. Préférable à l'arrêt moteur.



Étude aérodynamique - hélice en position "reverse"



incidence très négative →

$$F_t < 0$$

$$F_r > 0$$

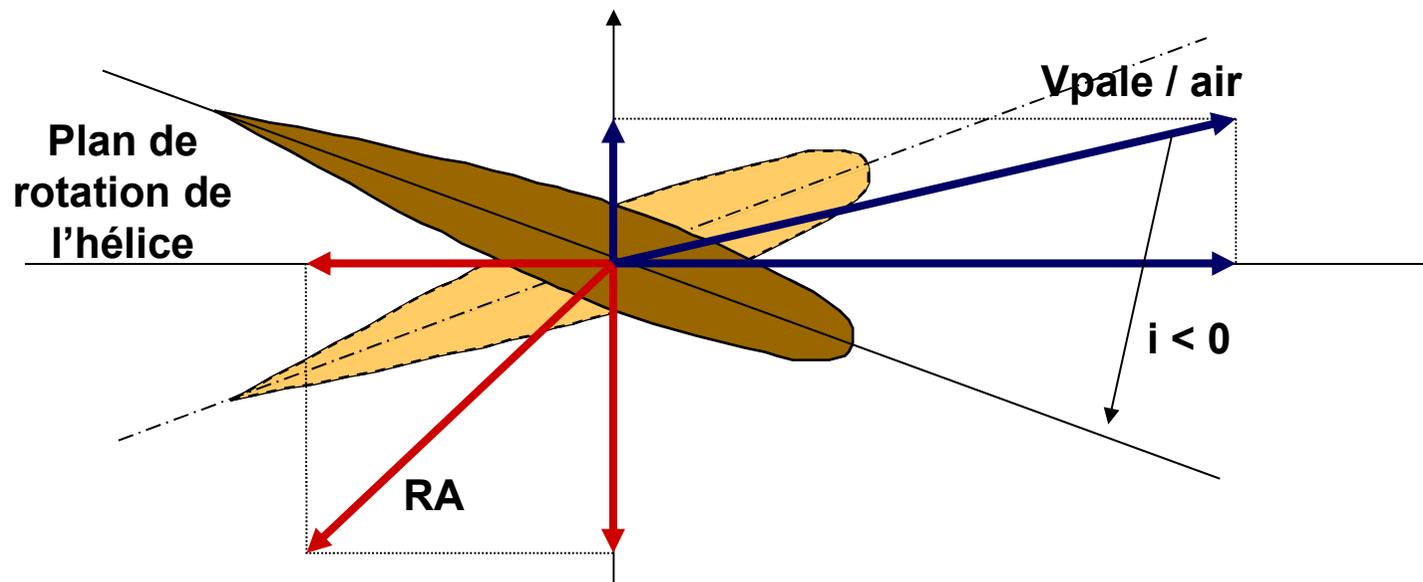
Utilisé pour les
manœuvres au sol

Fonctionnement « reverse »

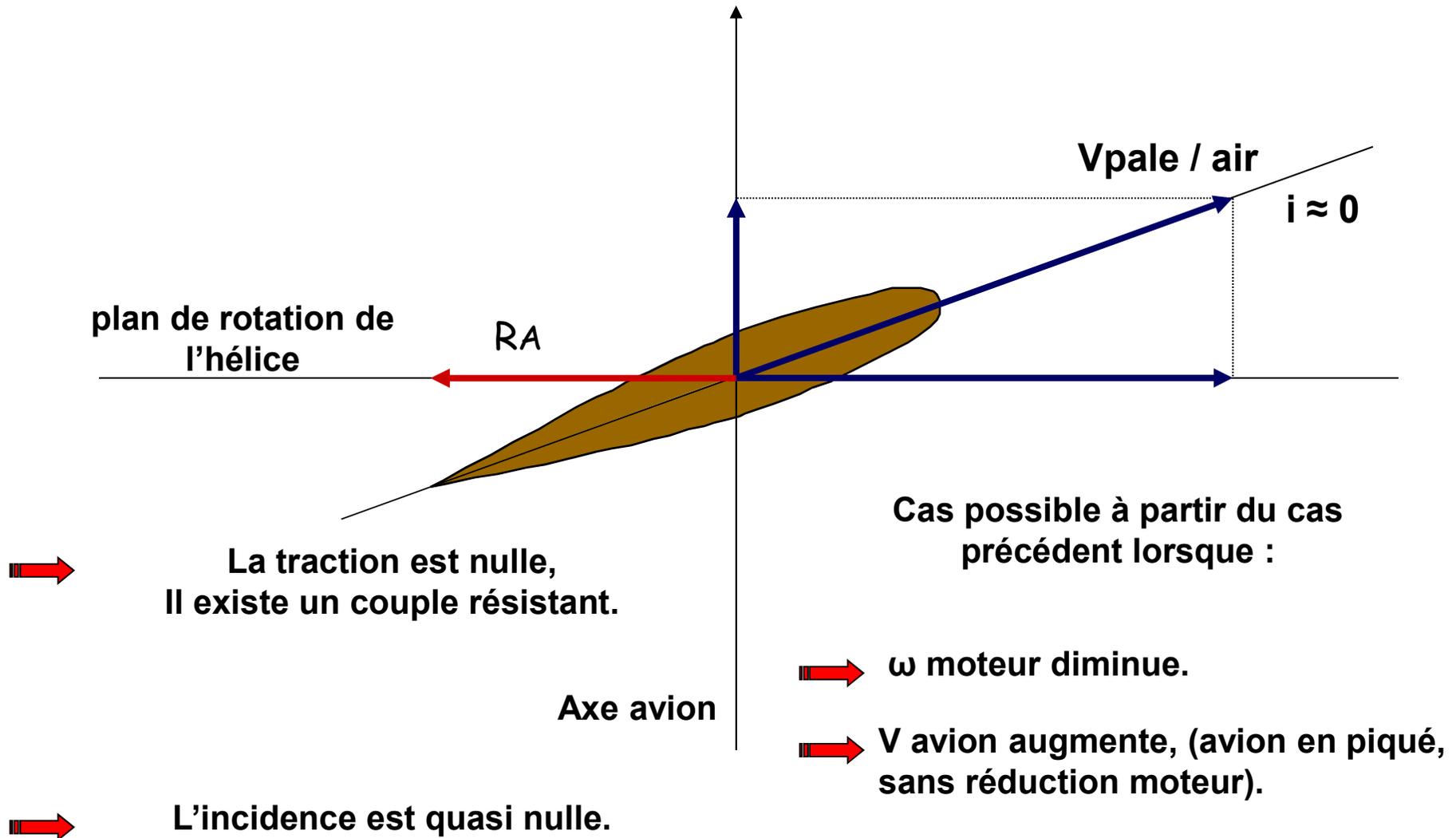
Étude aérodynamique : « inversion de poussée »

Calage négatif suffisamment important:

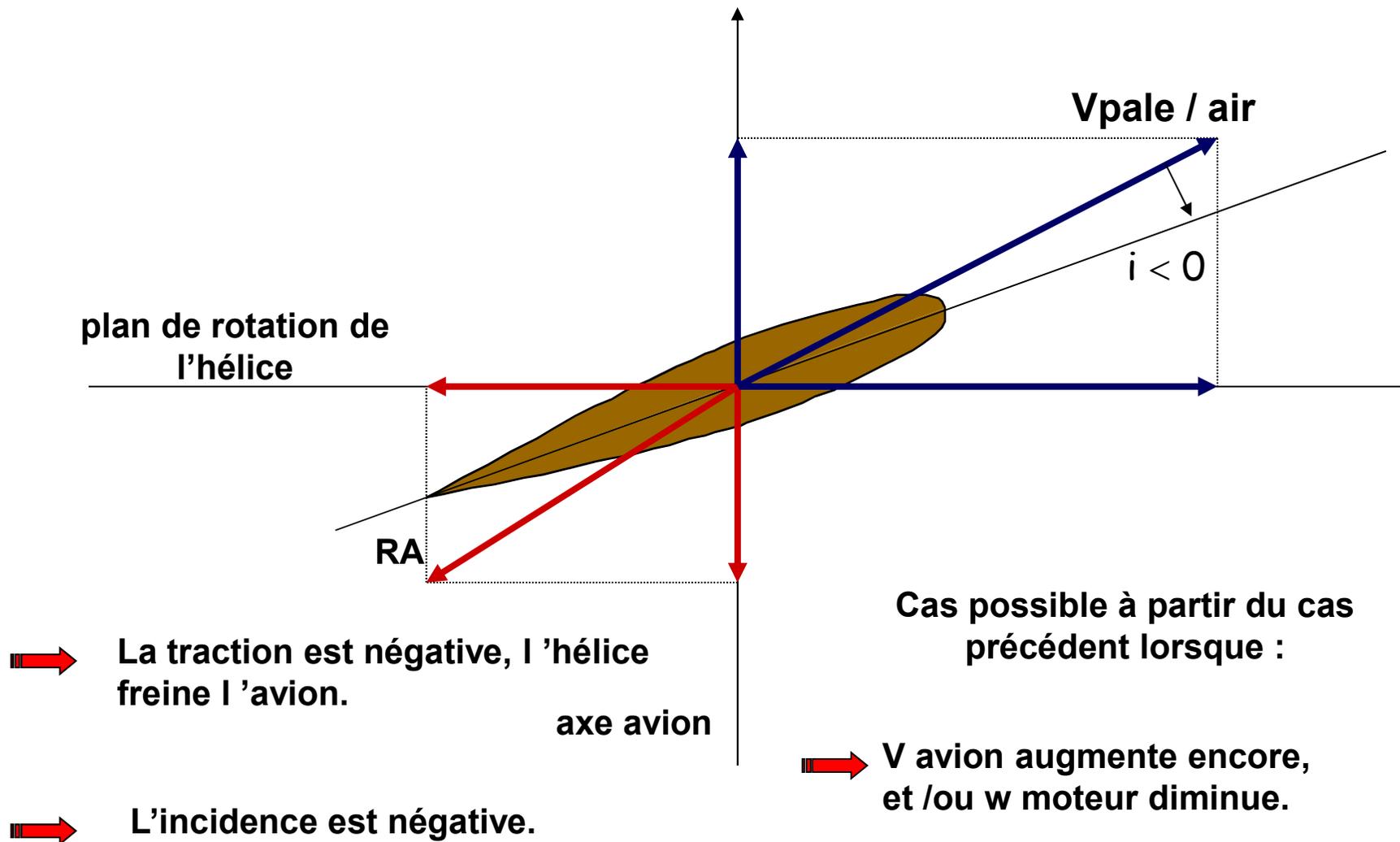
- l'hélice fournit une traction négative importante.
- utilisée pour le ralentissement de l'hélice et de l'avion à l'atterrissage.



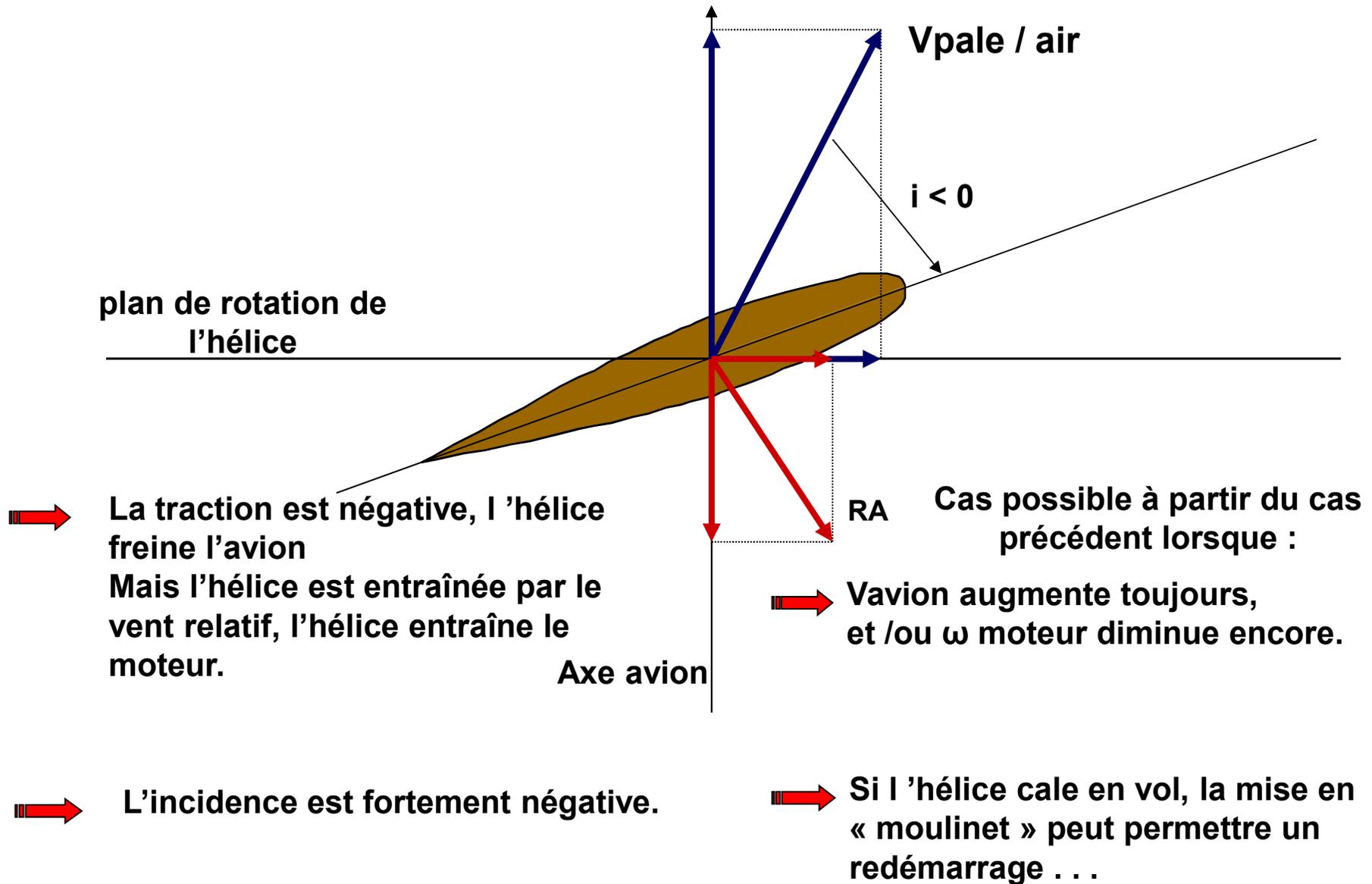
Étude aérodynamique - transparence



Étude aérodynamique - transparence



Étude aérodynamique - moulinet



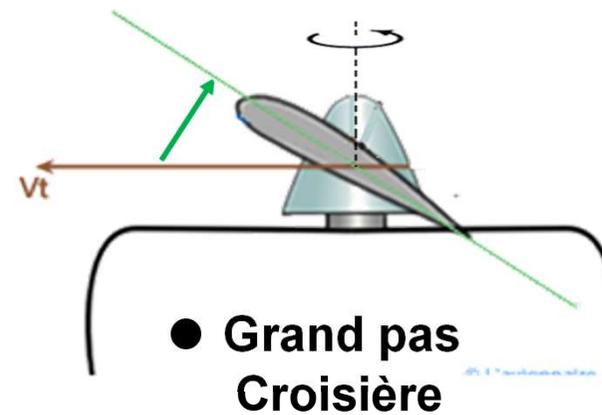
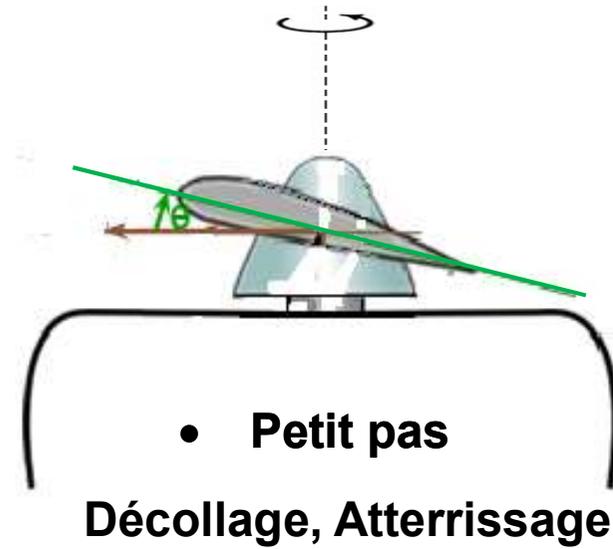
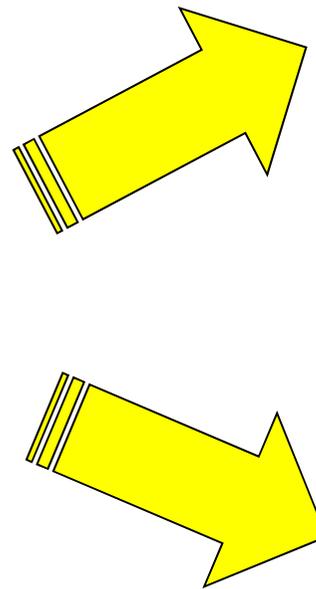
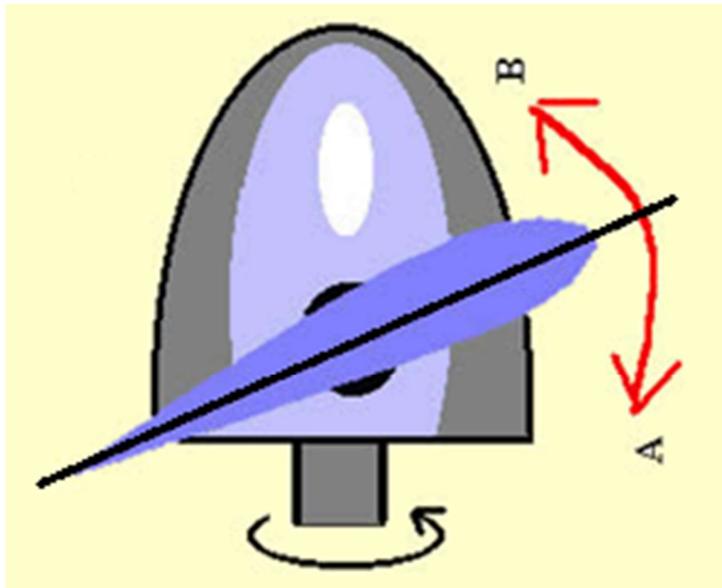
Hélice à calage variable

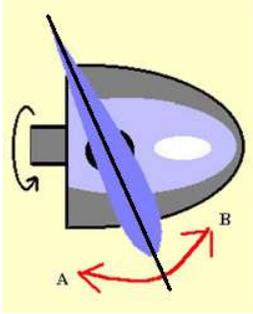
- **L'efficacité de l'hélice à une vitesse donnée varie en fonction du calage.**
- **Le calage des pales n'est optimal que pour une vitesse et un régime moteur donnés**

Pour optimiser l'efficacité de l'hélice à toutes les vitesses et régime moteur de l'avion :

on choisit un calage optimisé pour chaque configuration du vol, en utilisant un calage réglable en vol (= pas variable)

Hélice à calage variable

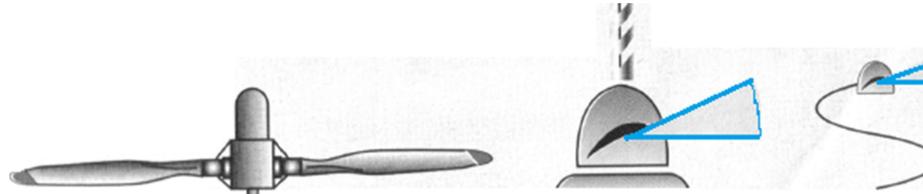




Hélice à calage variable

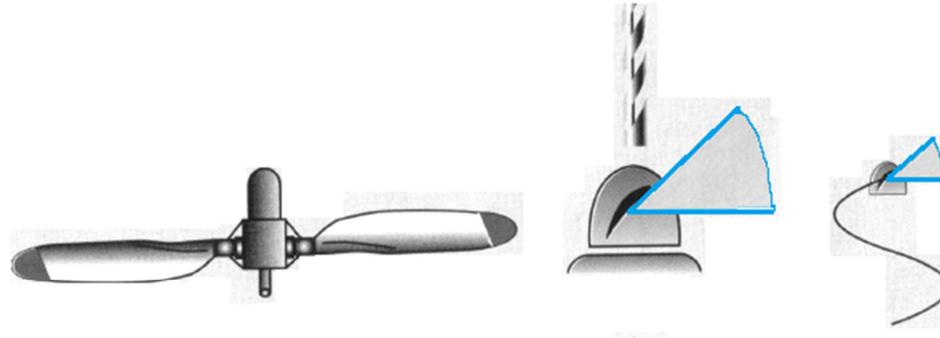
- au **décollage** et à l'**atterrissage**, la vitesse est faible mais la puissance demandée est importante

=> petit pas



- en **croisière**, la vitesse est élevée et on cherche à minimiser la puissance moteur demandée

=> grand pas



Hélice à calage variable

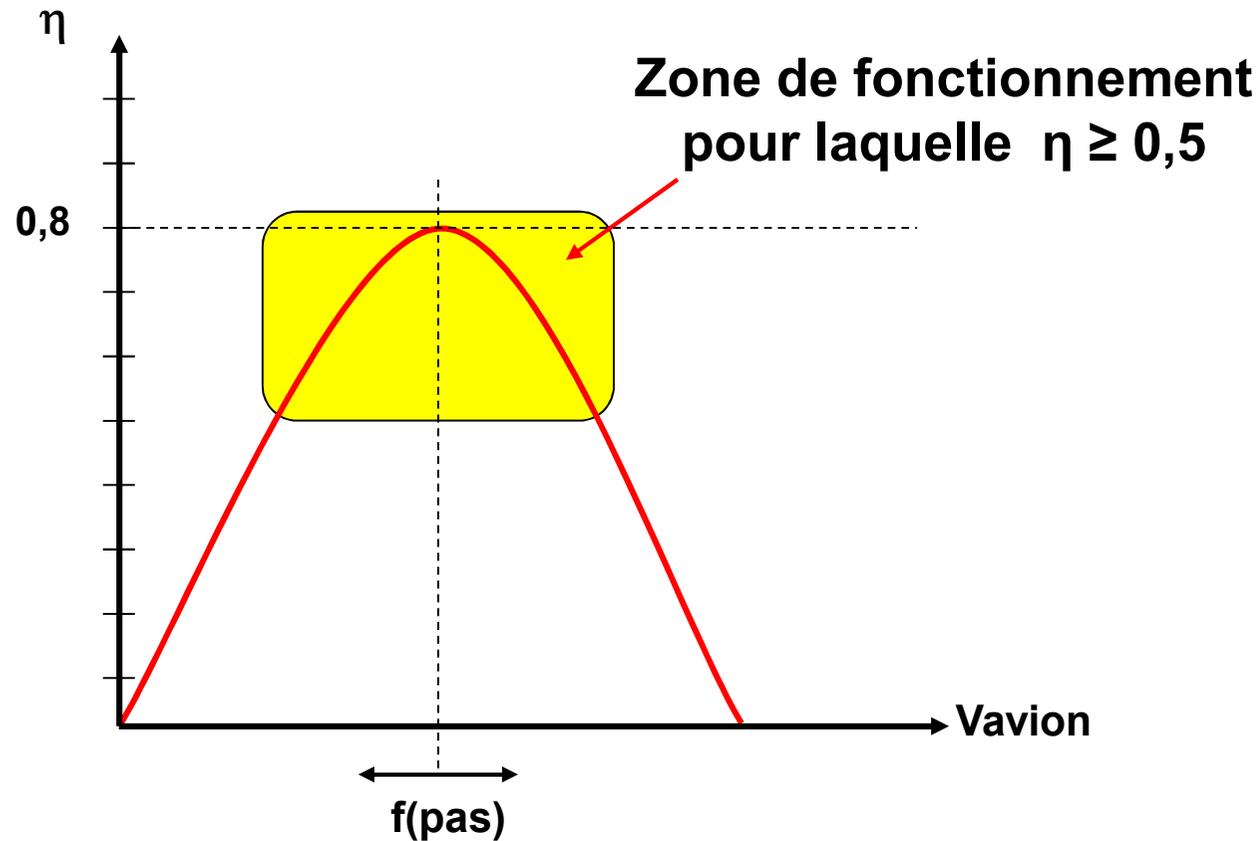
- Le pilotage du moteur devient plus exigeant.
 - On ne pilote plus la puissance avec le régime moteur seul.
 - Il faut afficher des paramètres de **pression d'admission (PA)** et de **régime**
 - Par analogie avec la voiture:
 - PA = pédale d'accélérateur
 - Régime = boîte à vitesse



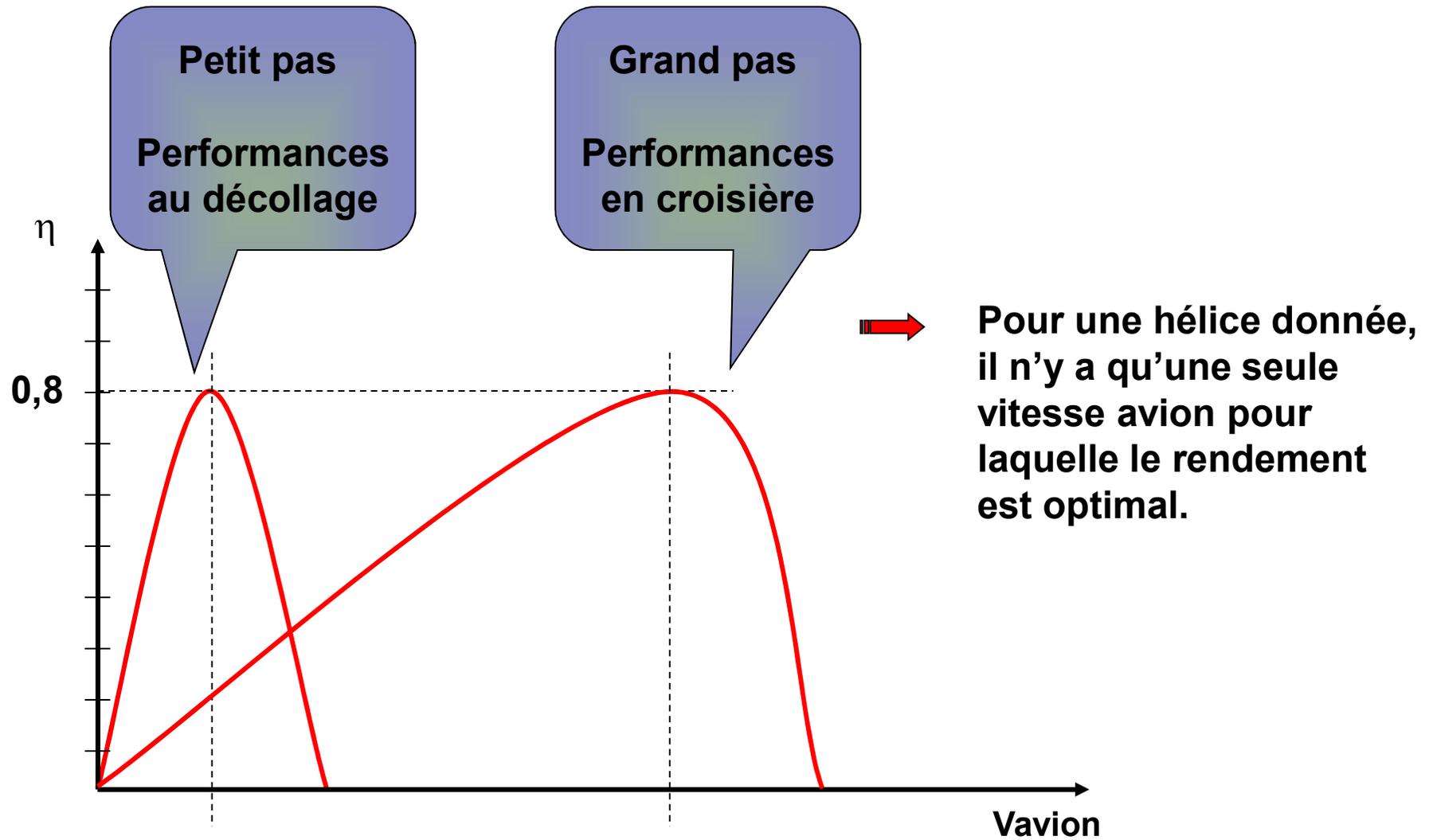
Étude aérodynamique : « rendement »

⇒ Rendement = $\frac{\text{puissance restituée}}{\text{puissance absorbée}}$

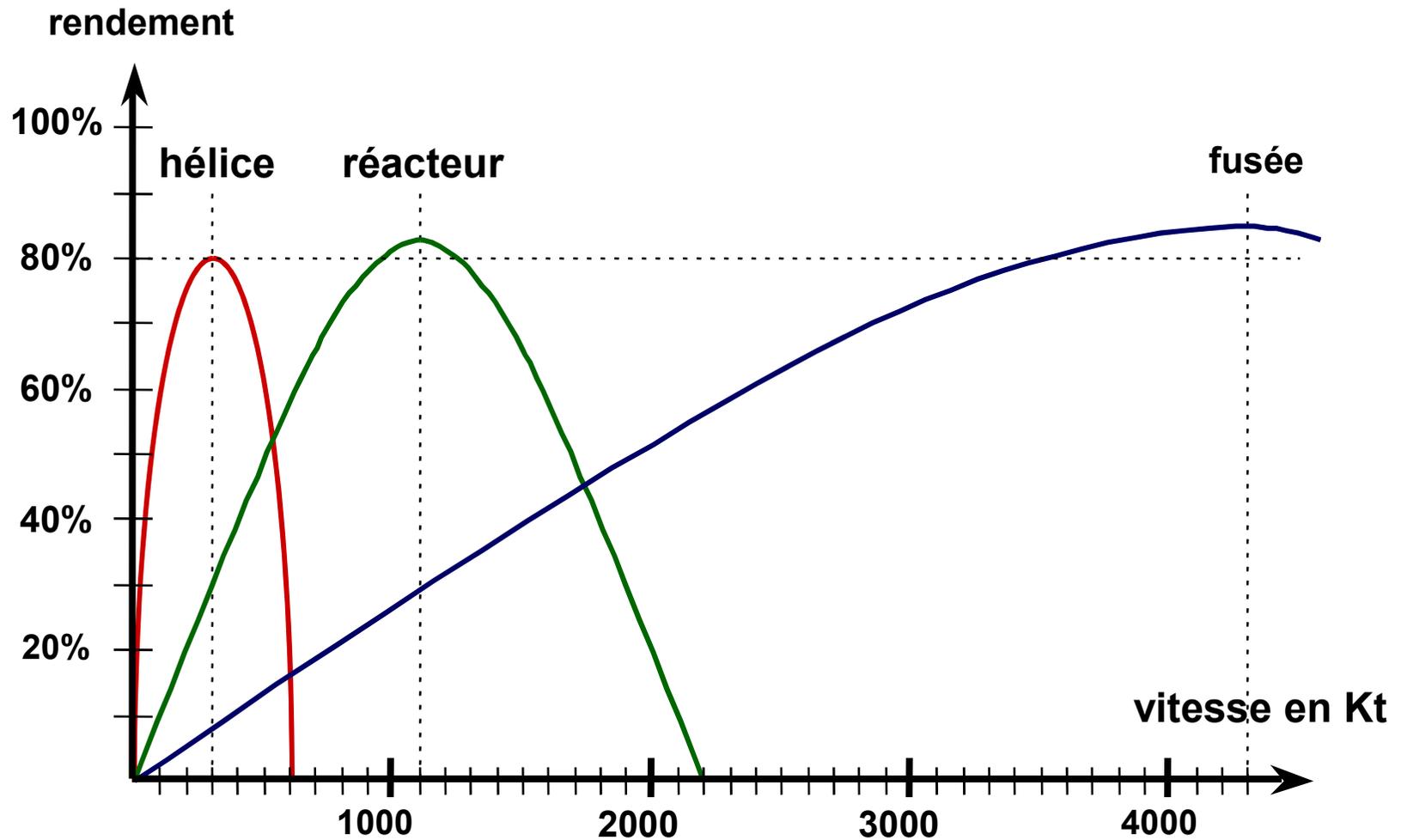
Pour une hélice à calage fixe :



Rendement petit et grand pas



Pourquoi utilise-t'on encore des hélices ?



rendement (<1) = puissance restituée / puissance absorbée

Hélice tractive ou propulsive ?

- Selon le calage de l'hélice, elle peut produire une force motrice dans un sens ou dans l'autre.
- Quand l'hélice est placée en avant de l'avion, elle est **tractive**.
- Quand elle est en arrière, elle est **propulsive**.
- La modification du calage après l'atterrissage permet de réaliser une **inversion** de l'action des hélices pour freiner un appareil sur la piste.

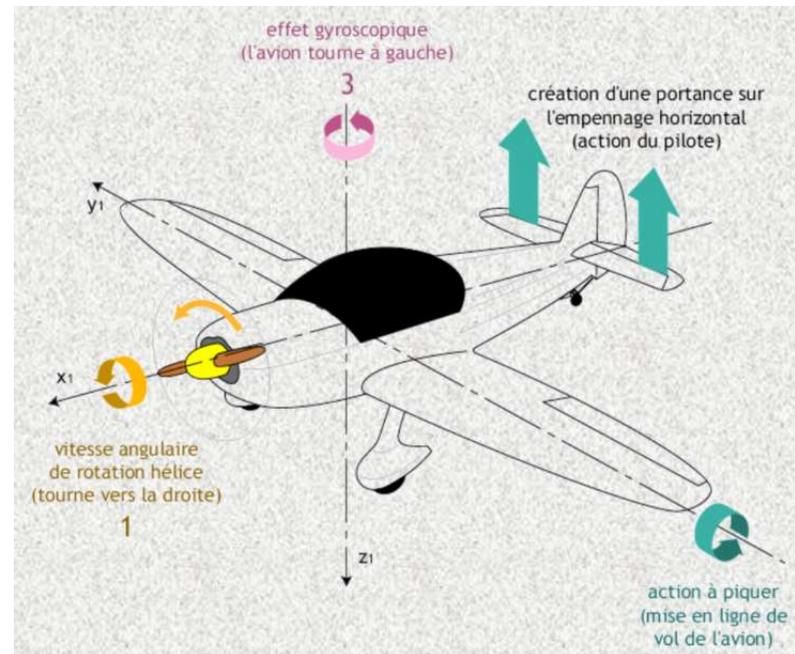
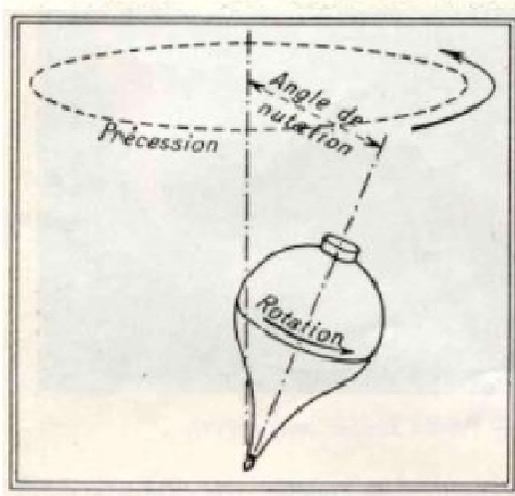


Cessna Skymaster

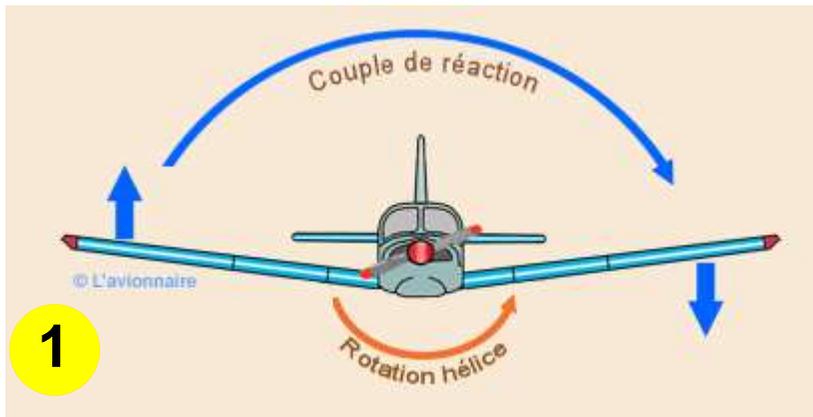
Par Kogo — Travail personnel, GFDL 1.2

Couple gyroscopique d'une hélice

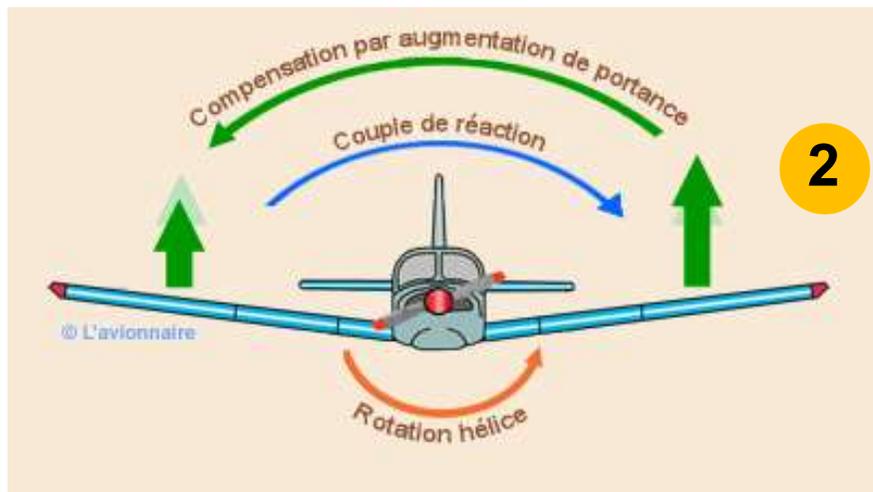
- L'hélice en rotation présente les mêmes caractéristiques qu'un gyroscope.
- La précession gyroscopique se manifeste, sur un avion monomoteur à train d'atterrissage classique, lors de la mise en ligne de vol au roulage pour le décollage.



Effets de la rotation de l'hélice : couple de l'hélice

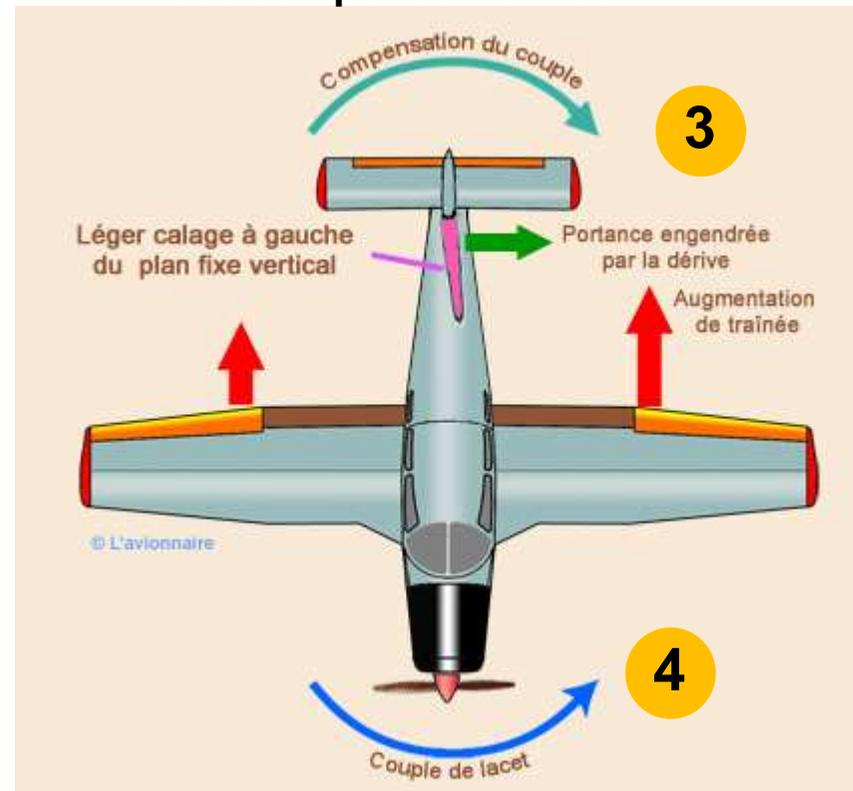


1
Rotation hélice => couple de réaction
Pour compenser : augmentation de la portance sur une aile

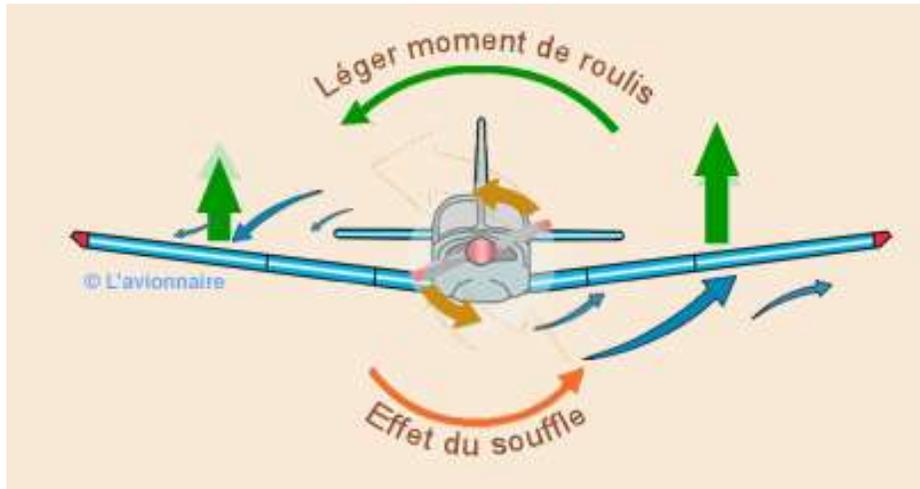


2
Crédit: « L'avionnaire »

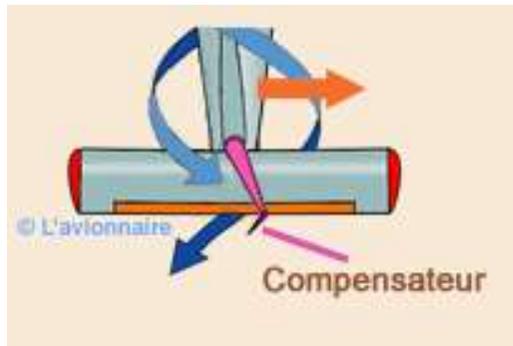
- 2 augmentation de la portance sur une aile → ? **augmentation de la traînée sur cette aile**
- 3 augmentation de la traînée sur une aile → ? **lacet**
- il faut compenser le lacet



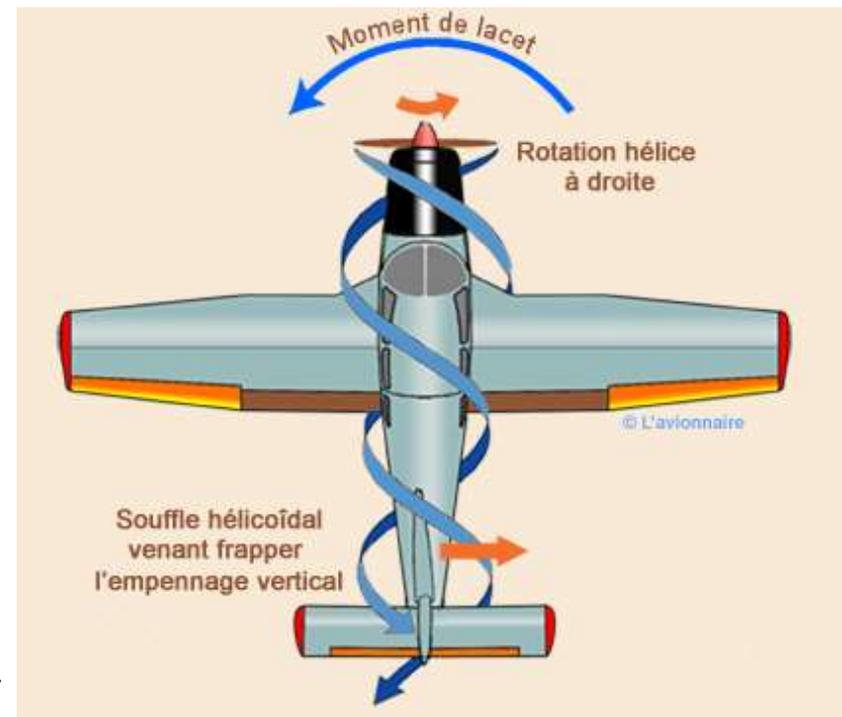
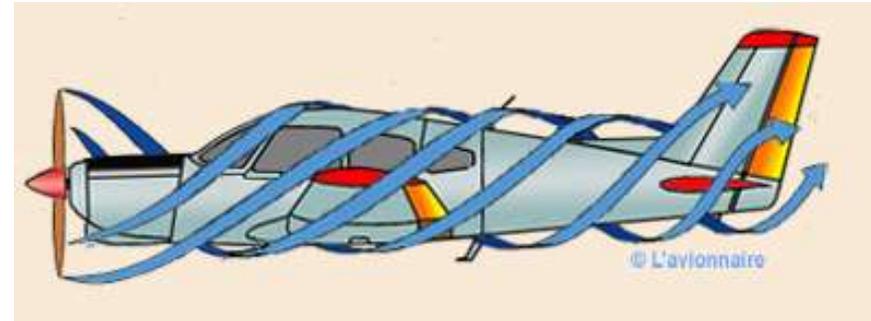
Effets de la rotation de l'hélice : **souffle hélicoïdal**



Il faut compenser le lacet à gauche

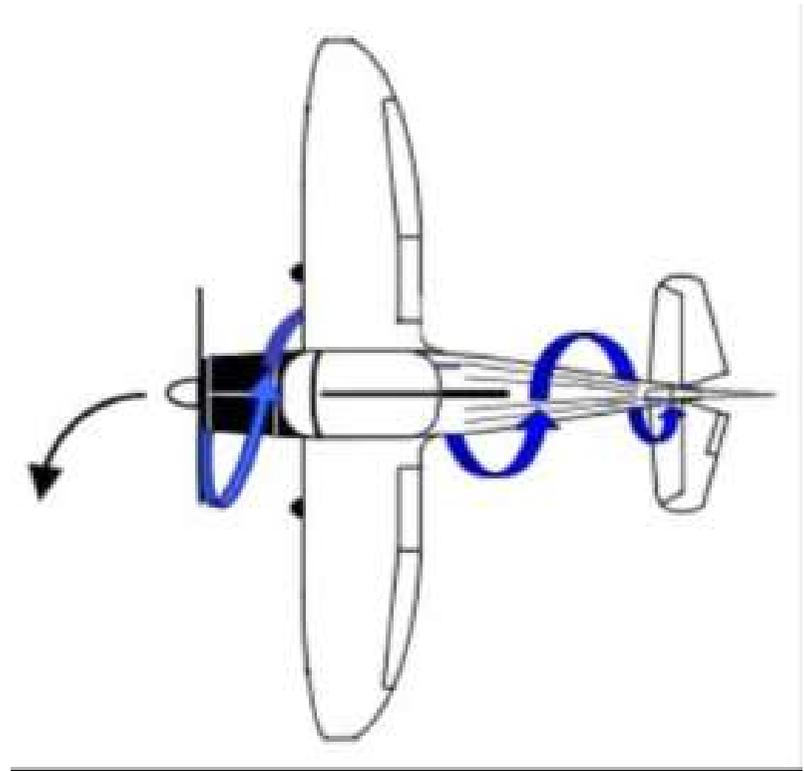


Crédit: « L'avionnaire »



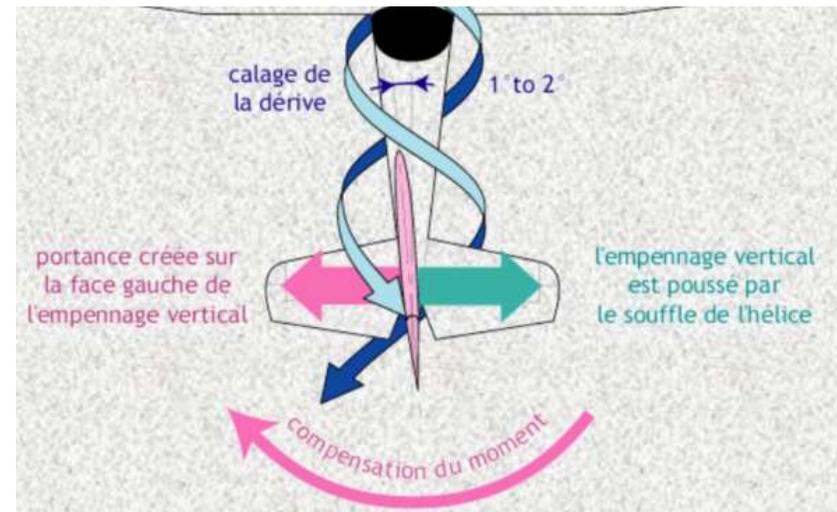
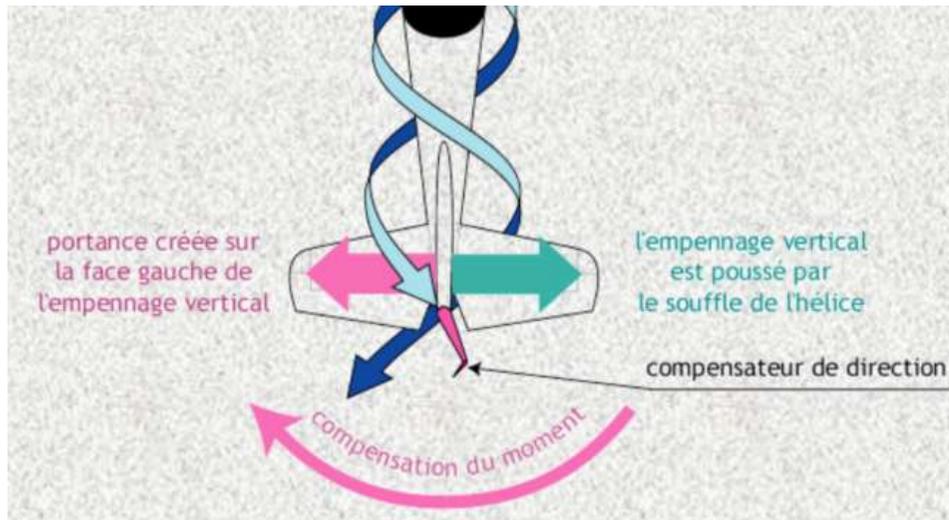
Effets de la rotation de l'hélice : **souffle hélicoïdal**

- La rotation de l'hélice produit un courant d'air qui s'enroule autour du fuselage et qui vient «frapper» l'empennage vertical du côté de la pale montante.
- L'intensité dépend de:
 - La vitesse de vol
 - Du régime de rotation de l'hélice
 - plus intense pour une vitesse faible et un régime moteur élevé : décollage et montée.

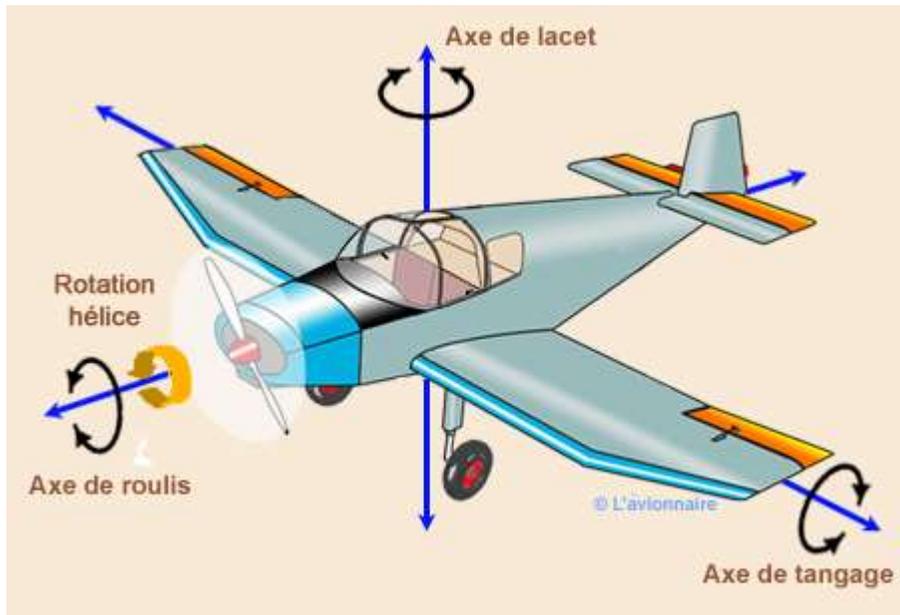


Effets de la rotation de l'hélice : remèdes

- Le lacet à gauche induit par le souffle hélicoïdal est de même sens que celui induit par l'effet de couple moteur. Les remèdes seront donc les mêmes :
 - léger calage à gauche de la dérive
 - braquage de la gouverne de direction



Rotation de l'hélice et du moteur : effet gyroscopique

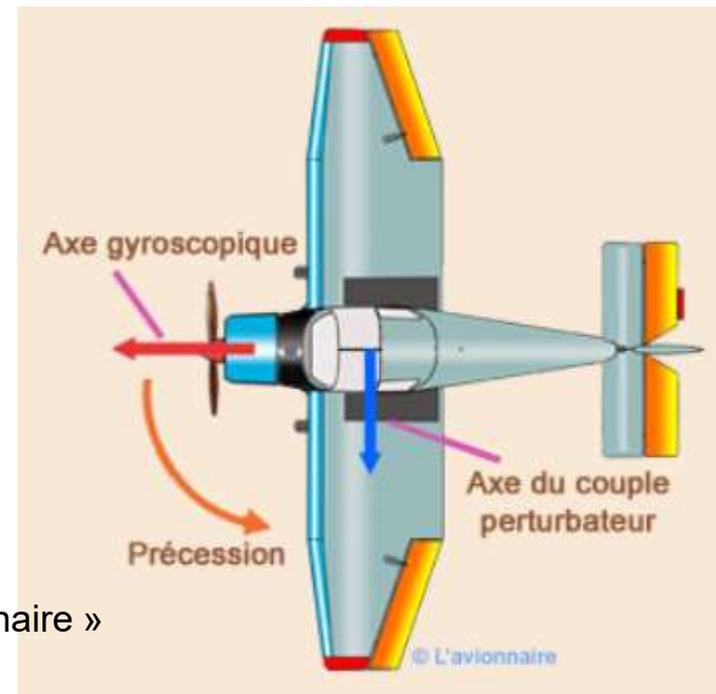


Toute sollicitation de mouvement autour de l'un des deux axes (lacet ou tangage) perpendiculaire à l'axe de rotation de l'hélice (axe longitudinal de l'avion), aura pour effet une tendance à aligner cet axe sur l'axe perturbateur.



Un exemple de perturbation autour de l'axe de tangage : avion train classique au décollage . Quand on soulève la roulette arrière, rotation autour de l'axe de tangage → l'avion embarque à gauche. Compensé par « du pied à droite » !

Crédit: « L'avionnaire »



Remèdes au couple gyroscopique d'une hélice

Pour annuler l'effet gyroscopique de l'hélice sur un avion monomoteur, il faudrait utiliser deux hélices contrarotatives.



Des exemples de QCM d'examen sur la partie de cours qui précède

Sur une hélice à pas variable, le “ plein petit pas ” est utilisé pour le :	
a)	vol en croisière.
b)	vol à haute altitude.
c)	vol à grande vitesse.
d)	décollage.

Le petit pas de l'hélice à pas variable est utilisé pour :

- a) l'atterrissage uniquement
- b) le décollage uniquement
- c) le décollage et l'atterrissage
- d) le vol de croisière

Le rendement d'une hélice est :

- a) nul lorsque le moteur tourne à plein régime et que l'avion est immobilisé.
- b) maximal lorsque l'avion effectue un “ piqué ” et que le moteur est au ralenti.
- c) maximal lorsque l'avion effectue un “ piqué ” et que le moteur tourne à plein régime.
- d) aucune des réponses ci-dessus n'est exacte.

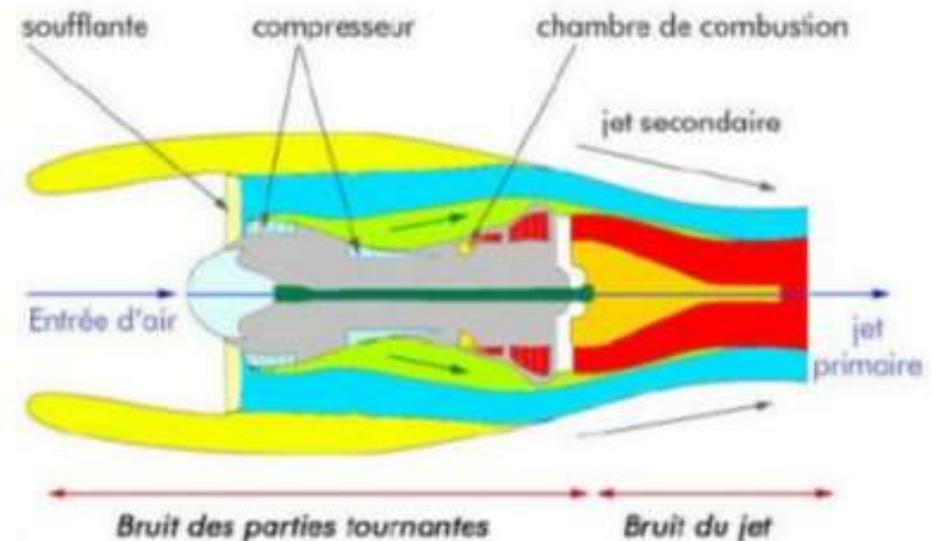
3. Etude des aéronefs et des engins spatiaux

3.2 Les groupes motopropulseurs

- Moteur à pistons
- Propulseurs à réaction
 - Turboréacteur
 - Turbopropulseur
 - Statoréacteur
 - Moteur fusées
- Motorisation électrique
- Hélices et Rotors
 - Principe
 - Rendement
 - Calage
 - Rotation de l'hélice : souffle hélicoïdal, effet gyroscopique
- **Contraintes liées au développement durable**
 - **Bruit**
 - **Optimisation énergétique**

Contraintes liées au développement durable

- Origine du bruit
 - Bruit aérodynamique
 - Bruit moteur
 - Bruit hélice
- Les avions sont classés en fonction de leur performance acoustiques.



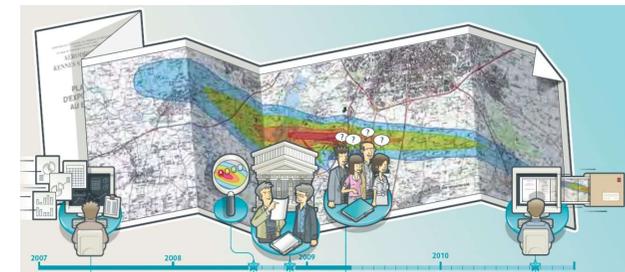
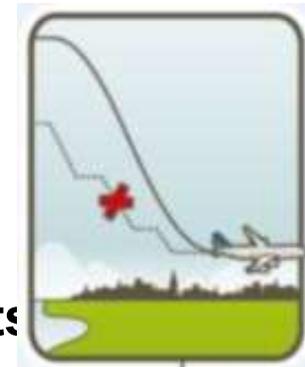
Contraintes liées au développement durable

Le bruit

- **Propagation du bruit**
 - **Influencée par:**
 - **La distance entre la source et le point d'observation qui est lié aux trajectoires**
 - **Les conditions météorologiques (vent, humidité, température)**
- **Ce qui compte dans le bruit n'est pas uniquement de le réduire à la source mais plus de supprimer ou réduire la gêne supportée par les humains.**
 - **Il faut donc se préoccuper des critères de gêne et de perception.**
- **Depuis 1960 les bruit de avions a été réduit de 25 EPNdB**
 - **L'ONERA a crée un département d'aéro-acoustique pour prendre en charge cette problématique.**

Contraintes liées au développement durable

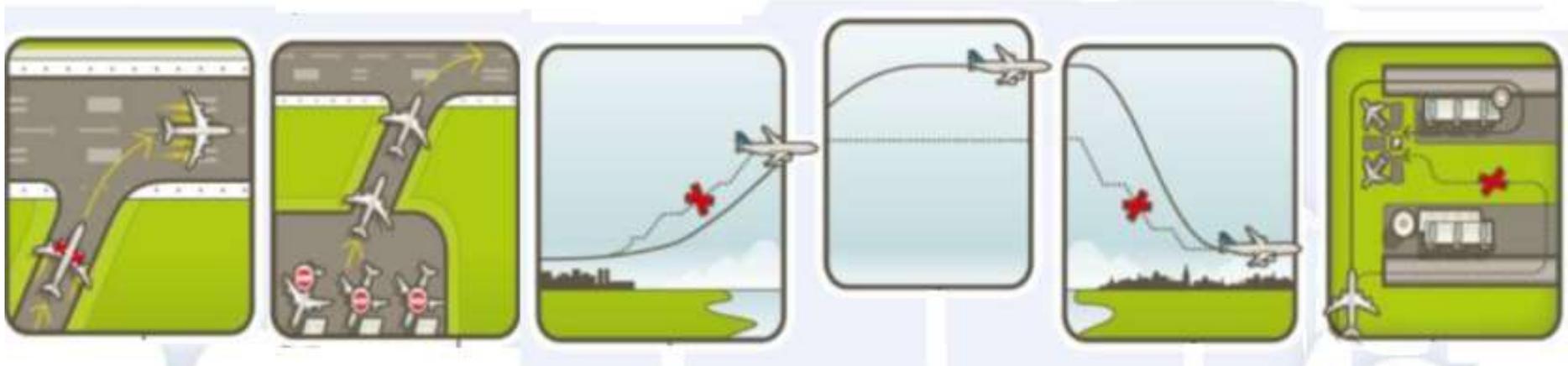
- OACI a édicté des recommandations autour de 4 piliers pour réduire le bruit:
 - Réduction des bruits à la source
 - Nouvelle hélices multi pales
 - Taux de dilution des réacteurs
 - Procédures de moindre bruit
 - Descente continue.
 - Relèvement des altitudes d'arrivée
 - Management des territoires autour des aéroports
 - Zone non constructible (PEB)
 - Restrictions des opérations
 - Limitations du trafic d'hélicoptères
 - Au Versoud charte avec les riverains
 - Procédure décollages, atterrissages
 - Voltige: Hauteur minimum et horaires



Contraintes liées au développement durable

Optimisation énergétique:

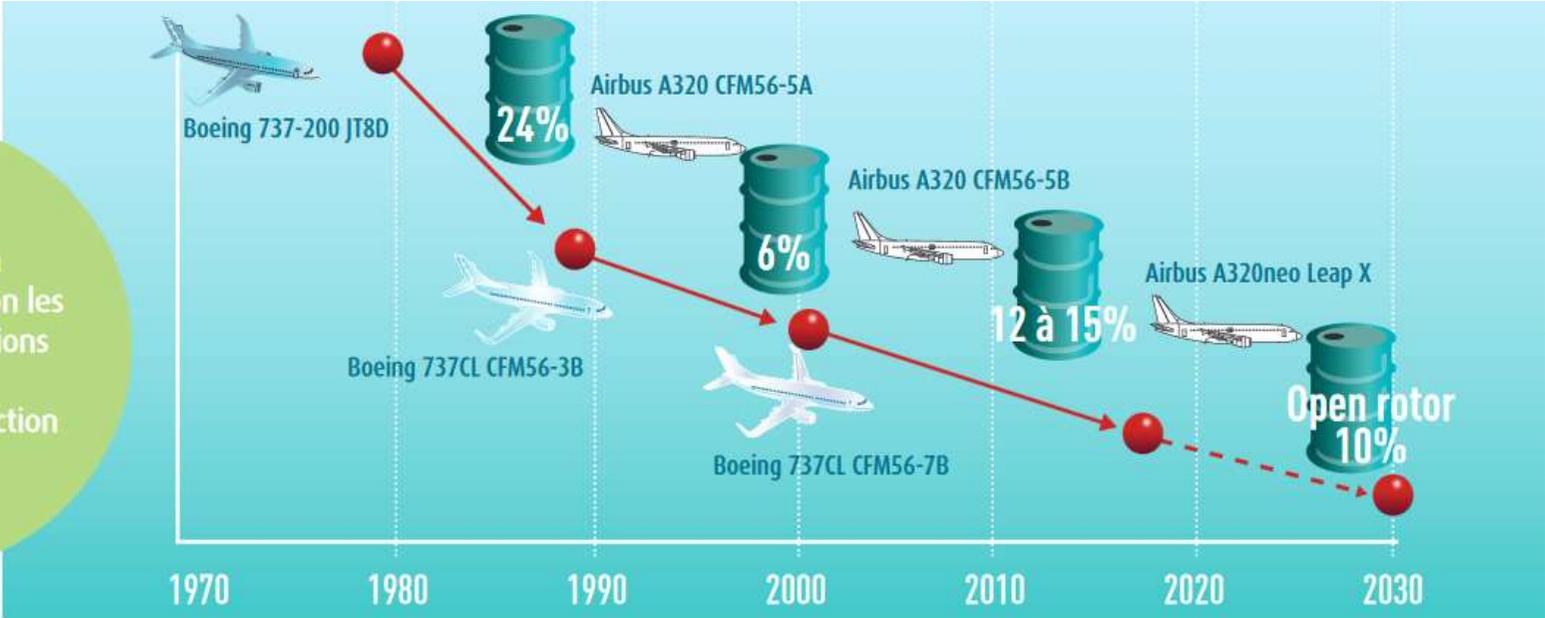
- Réduction de la consommation en carburant
- Comment ?



- Green Taxi pour les avions
- Utilisation de bio carburant
- Taux de dilution des turboréacteurs
- Diminution de l'émission de NOx et CO2

Le ciel de demain

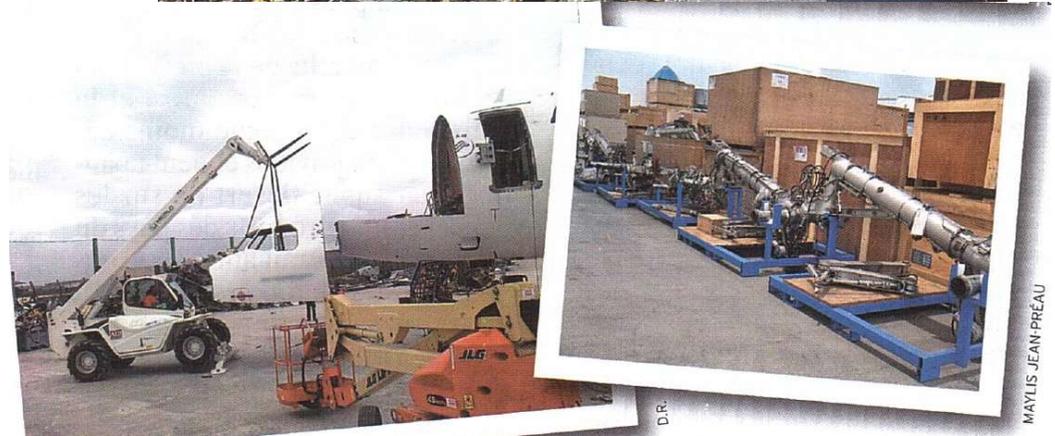
Réduction de la consommation de carburant selon les générations d'avions depuis 1970 et objectifs de réduction d'ici à 2030



Contraintes liées au développement durable

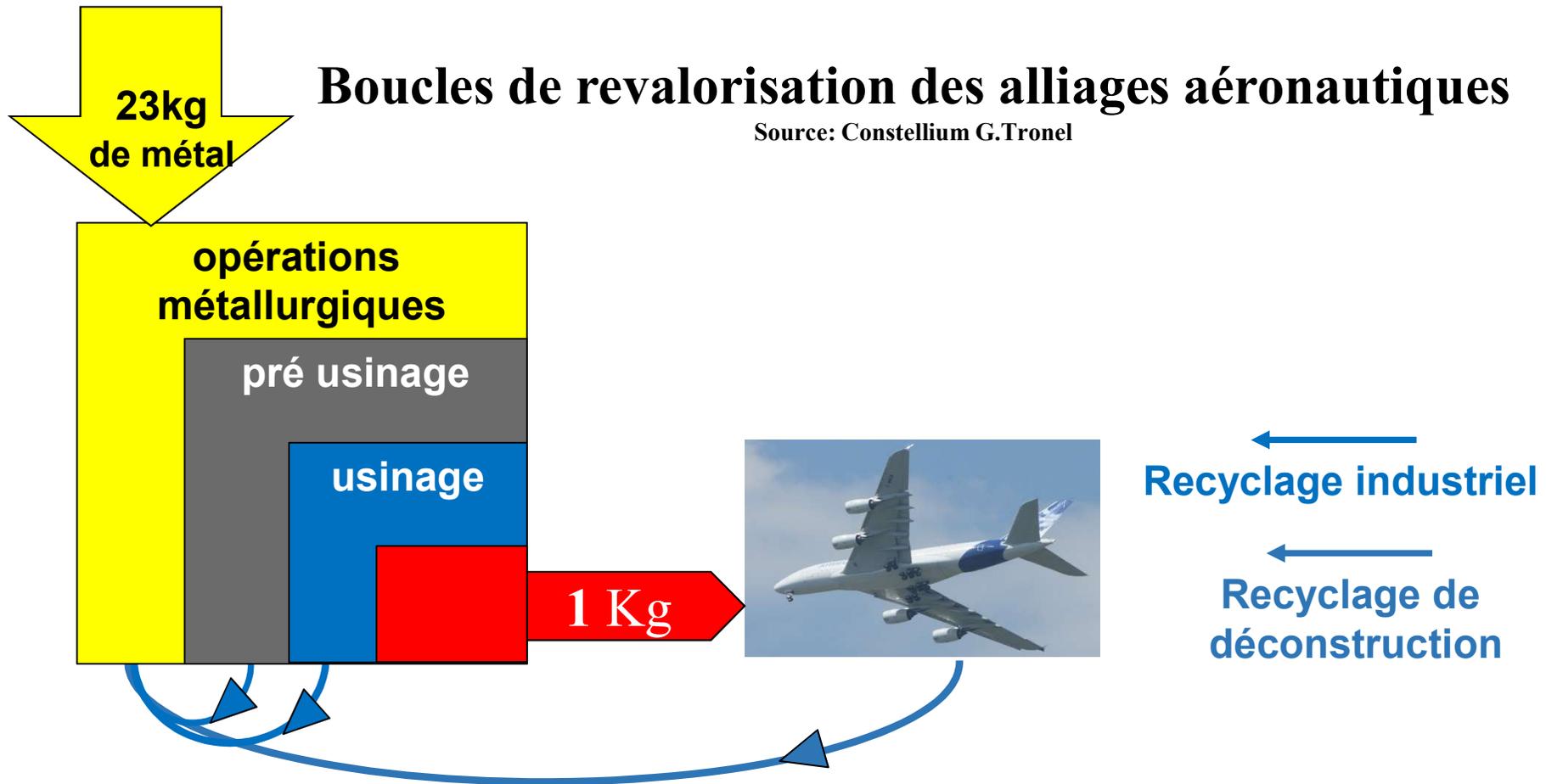
Optimisation énergétique: Recyclage

- Un avion est recyclé à 75% et le sera bientôt à 95%.
 - Les métaux serviront à fabriquer des canettes ou des vélos ou ...
 - Revente de pièces sur le marché de l'occasion.
 - Revente moteur: 500 000\$ à 1,5 m\$
- Coût d'une déconstruction:
 - 60 000 à 80 000 US\$



Contraintes liées au développement durable

- Chaîne de production éco-efficente:
 - But: 80% d 'Aluminium recyclé en 2015
 - Pour avoir 10 kg d'alliage intégrés dans un avion il faut mettre en œuvre 230 kg d'alliage.

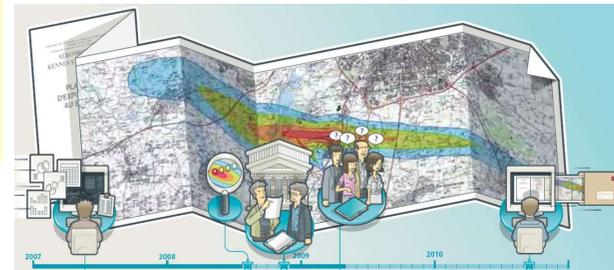
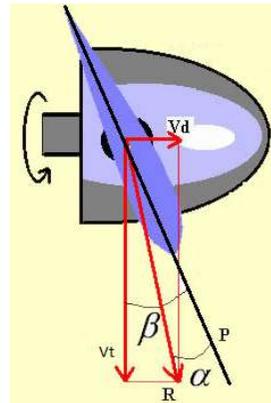
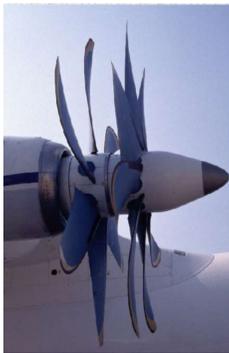




3. Etude des aéronefs et des engins spatiaux

3.2.2 Groupes motopropulseurs Hélices et Rotors

Contraintes liées au développement durable



Bibliographie

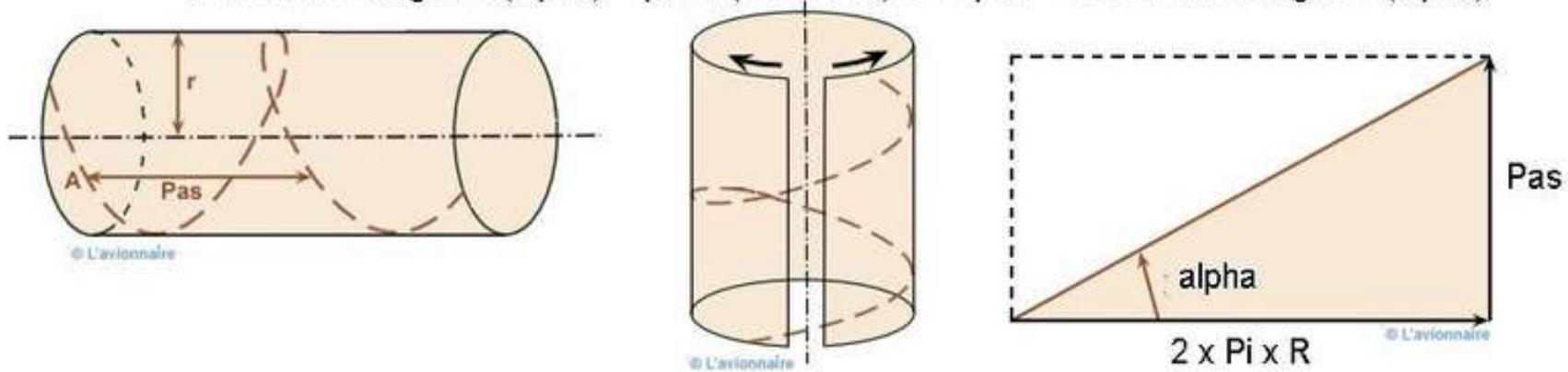
- *Véronique SALMON-LEGAGNEUR et Eric SAVATTEO. Hélice Avionneur*
- *Wikipedia: <https://fr.wikipedia.org/>*
- *Site FFA*
- *F. Willot cours BIA*
- *Jean Luc Philippe. Hélice aériennes*
- *Site Internet de : GE, SAFRAN; Dassault*
- *La chronique de Michel Barry: le choix d'une hélice*
- *Philippe LOUSSOUARN*
- *Air & Cosmos*
- *Philippe Raguin 2012*
- *<http://spaceconquest.pagesperso-orange.fr/Propulsion.htm>*
- *Site DGAC*
- *<http://www.developpement-durable.gouv.fr/>*
- *www.nasa.gov/images/*

**Pour aller au-delà du
programme BIA sur
la compréhension
des groupes
motopropulseurs
Hélices.**

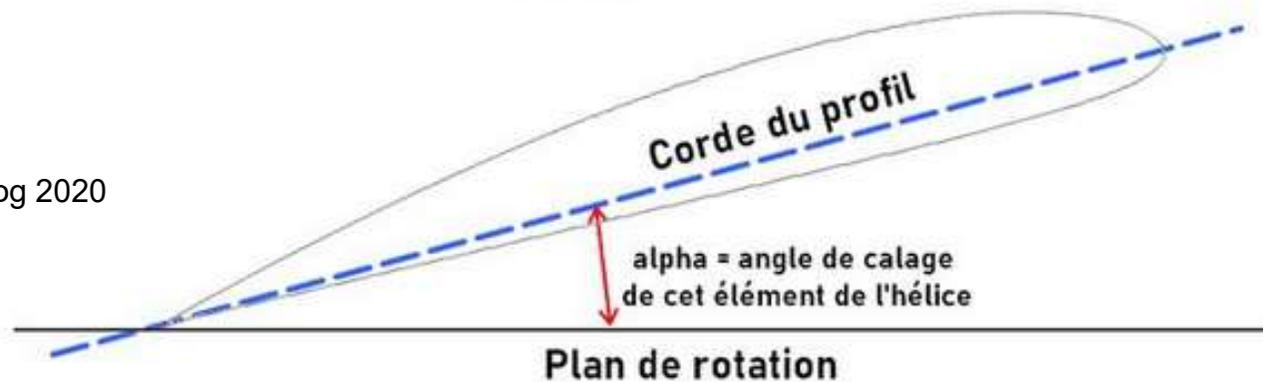
Le pas de l'hélice

Si on "déroule" le cylindre et qu'on le met à plat, on obtient un triangle rectangle dont la base a pour longueur $2 \times \text{Pi} \times R$ (R est la distance séparant l'élément de pale dont on calcule le pas de l'axe de rotation) et de hauteur égale au pas. L'angle entre la base et l'hypothénuse est égal à l'angle entre la corde du profil et le plan de rotation de l'hélice.

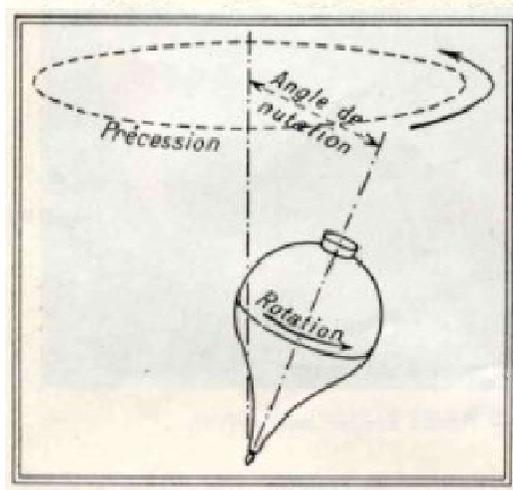
On a donc : $\tan(\alpha) = \text{pas} / (2 \times \text{Pi} \times R)$ d'où $\text{pas} = 2 \times \text{Pi} \times R \times \tan(\alpha)$



in : OverBlog 2020



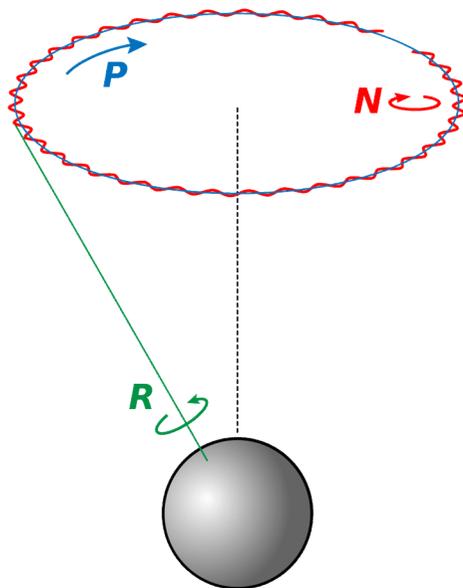
Effet gyroscopique



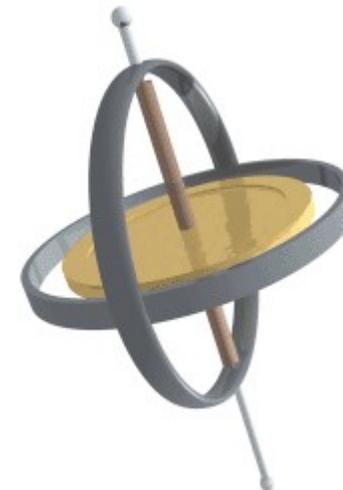
Le moteur qui tourne forme **un gyroscope**.
Comme pour une toupie qui tourne, il y a des effets de bascule de l'avion

Effet giroscopique : exemple de la Terre

Précession : changement graduel d'orientation de l'axe de rotation d'un objet quand un couple lui est appliqué. Pour la Terre (couple car axe inclinée sur le plan de rotation autour du Soleil), cône de $23^{\circ}5$ parcouru en 27500 ans

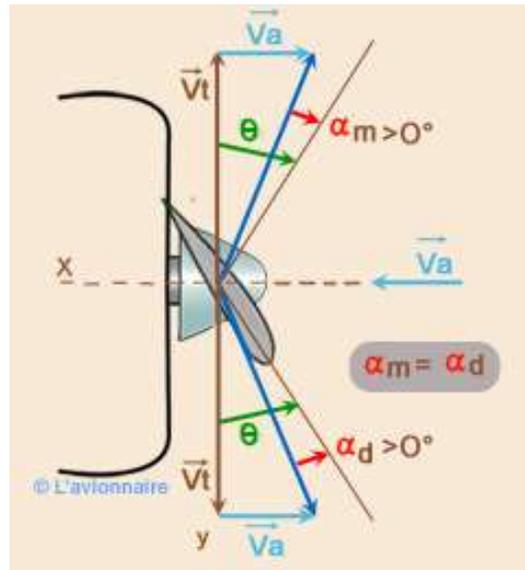


Nutation : mouvement supplémentaire de rotation donnant un dessin « en feston » du cône de précession

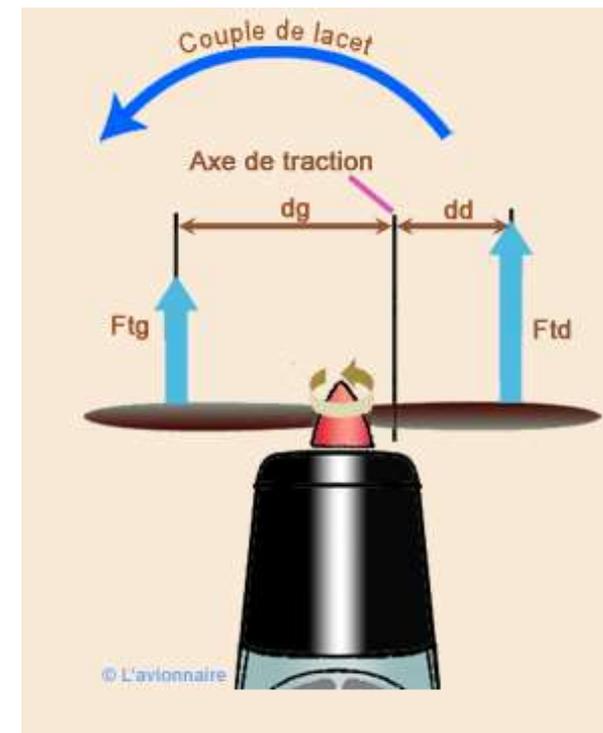
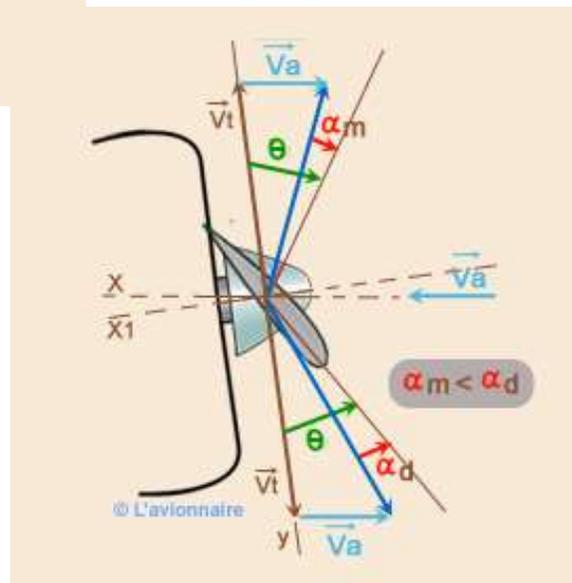


aller plus loin

Effets de l'hélice à incidence élevée (traction dissymétrique)



L'axe de rotation de l'hélice n'est plus confondu avec la direction du vent relatif. L'angle α de la pale descendante est supérieur à l'angle α de la pale montante.



Force de traction droite $F_{td} >$ force de traction gauche F_{tg}

extrait de « L'avionnaire »