

Conférences du département Training: LES HÉLICOPTÈRES ET LEUR UTILISATION

OBJ: Appréhender le fonctionnement de l'hélicoptère



NOTRE SOMMAIRE:

PARTIE 1:

I) Les éléments constitutifs de l'hélicoptère

II) Comment l'hélicoptère vole-t-il ?

PARTIE 2:

III) Le pilotage et les procédures opérationnelles



Un peu d'histoire avant de commencer.....

1486: Léonard
de Vinci
(dessin)

1907: Giroplane
de Breguet et
Richet

1907: 1^{er}
Hélicoptère de
Cornu

1919:
hélicoptères
coaxiaux

1923: tenue du
stationnaire et
évolutions
corrects

1945: 1^{ere}
utilisation
militaire pour
un convoi naval

1955: posé au
sommet du Mont
Blanc par Mr Moine
en Bell

2005: posé au
sommet de
l'Everest par
Delsalle en
AS350B3

2021: 1^{er} vol non
habité d'un
hélicoptère sur
Mars

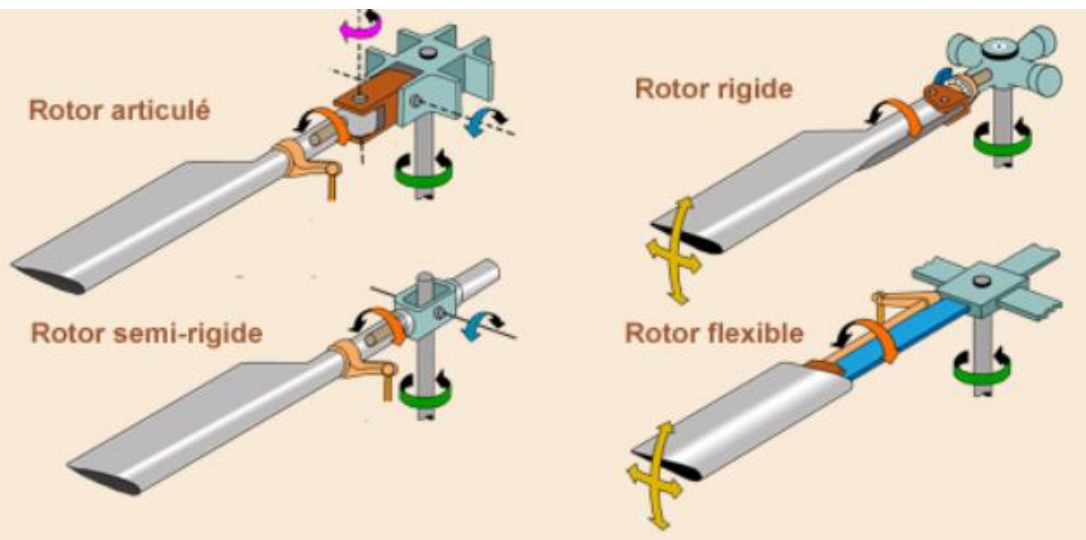
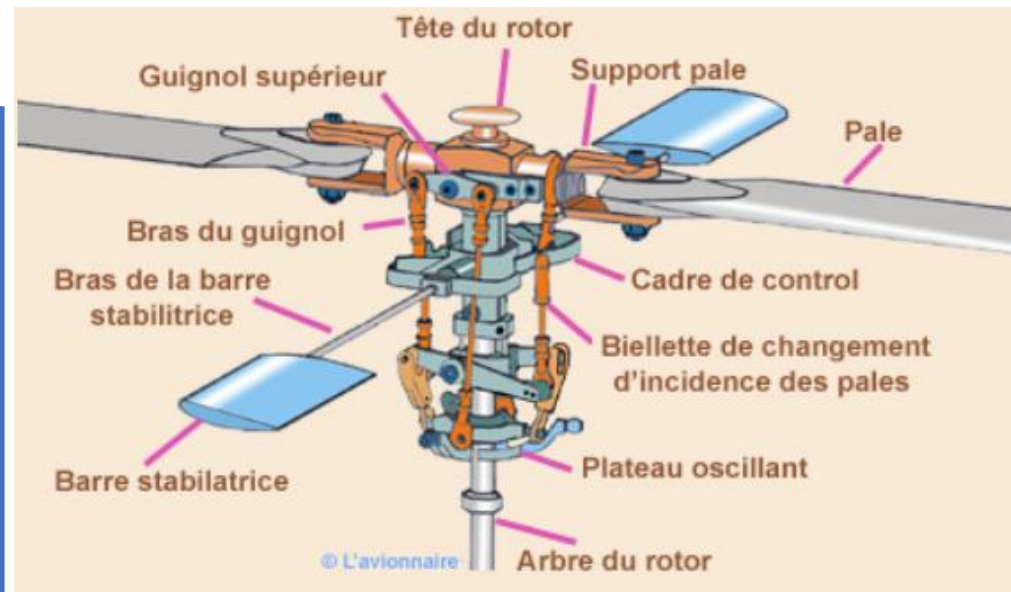


I. A.: Les rotors principaux

Le rotor principal est la partie rotative d'un hélicoptère qui génère la portance. Le rotor se compose d'un mât, d'un moyeu et de pales de rotor.

Le moyeu est un arbre métallique cylindrique creux qui s'étend vers le haut à partir de la transmission et est entraîné et parfois supporté par celle-ci.

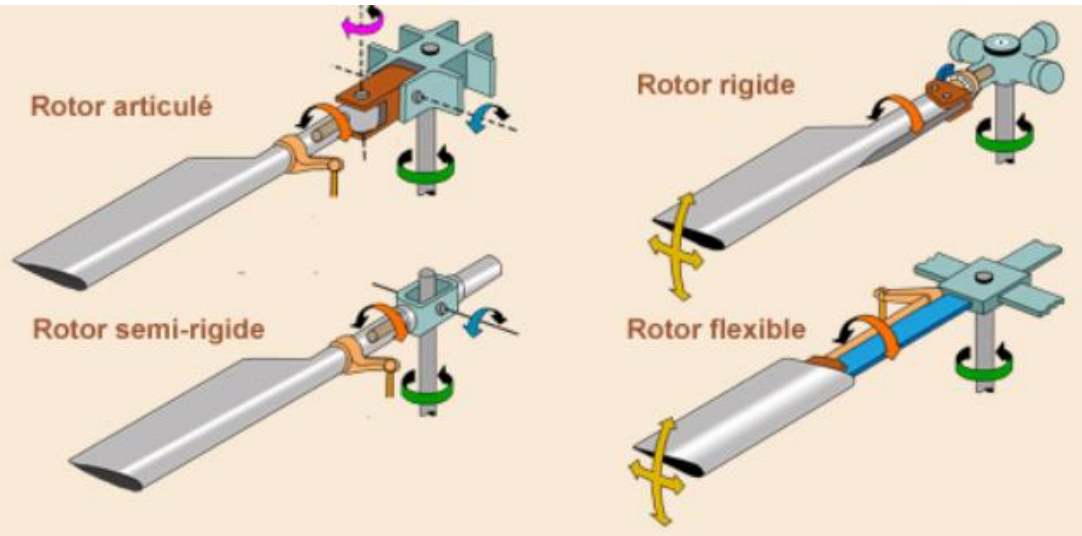
Le mât est un arbre métallique cylindrique creux qui s'étend vers le haut à partir de la transmission et est entraîné et parfois supporté par celle-ci.



En haut du mât se trouve le point de fixation des pales du rotor appelé le moyeu. Les pales du rotor sont ensuite fixées au moyeu par différentes méthodes.

Le rotor principal peut être composé de 2 à 5 pales selon les appareils.

I. A.: Les rotors principaux: les différentes constructions



Chaque rotor doit pouvoir bouger selon deux axes:

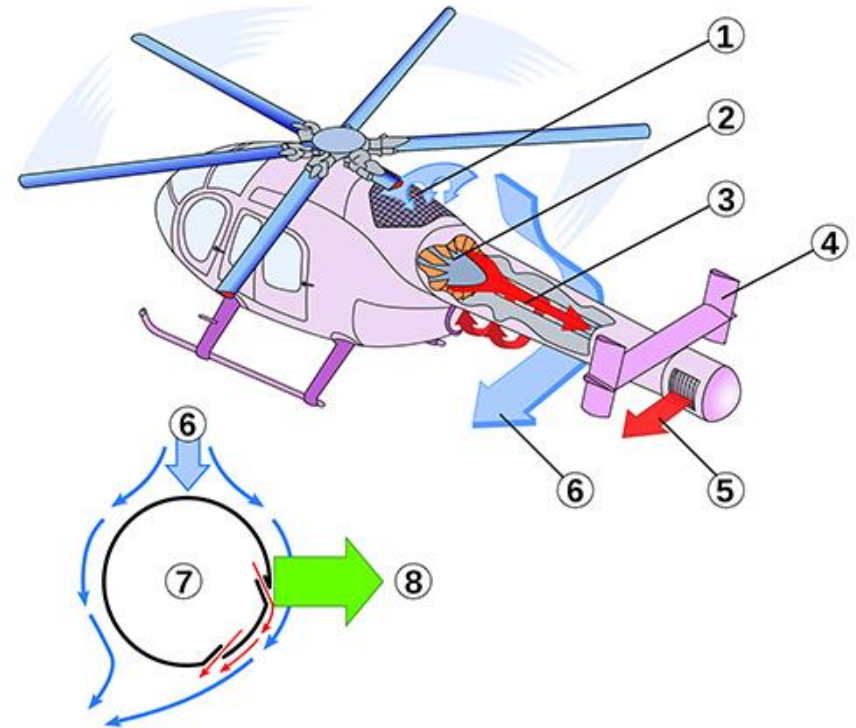
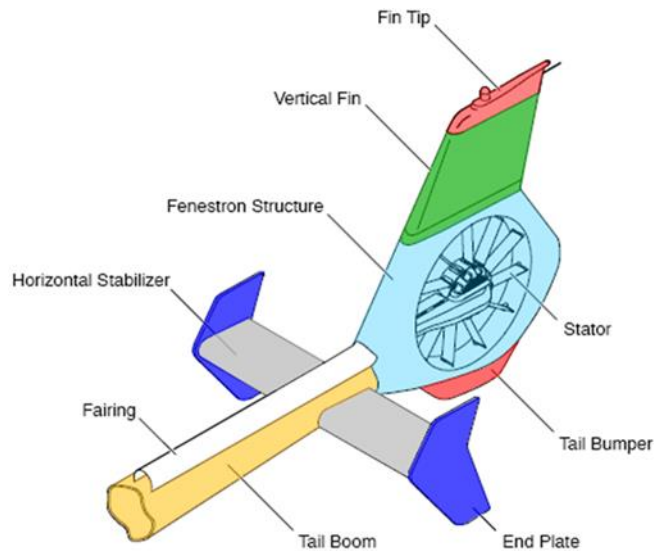
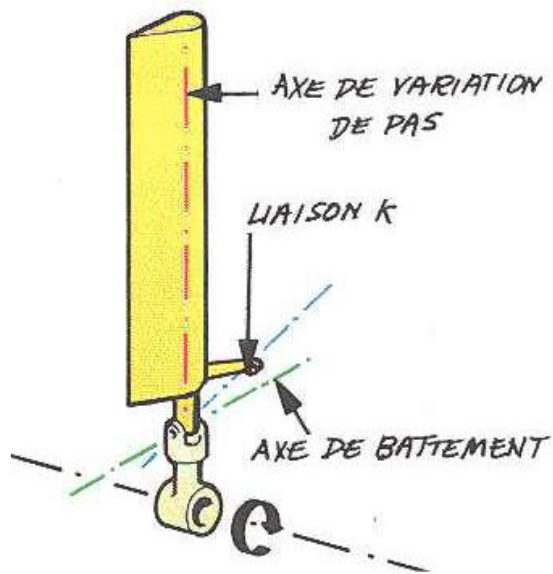
- Vertical (ou axe de battement) pour permettre à la pale de monter et descendre (articulation horizontale)
- Horizontal (ou axe de trainée) pour permettre à la pale d'avancer ou de reculer dans son plan de rotation (articulation verticale)

L'articulation de changement de pas assure la variation de l'angle de pas de la pale.

En fonction du type de rotor ces libertés de mouvement sont permises :

- Par l'ajout d'articulation spécifique avec ajout d'amortisseurs (types amortisseurs de trainée) = réglage complexe (rotor articulé)
- Par la construction du rotor en lui-même et la fixation des pales sur le moyeu rotor (rotor sémi-rigide et à balancier ou flexible)
- Par la composition même des pales qui permettent et facilitent les mouvements (rotor rigide)

I. B.: Les systèmes anti-couple: les différentes constructions



I. B.: Les systèmes anti-couple: les différentes constructions



Les 2 rotors peuvent être montés en tandem, comme sur le CH47 Chinook



Ou en coaxial (sur le même axe), comme ici sur le KAMOV KA32



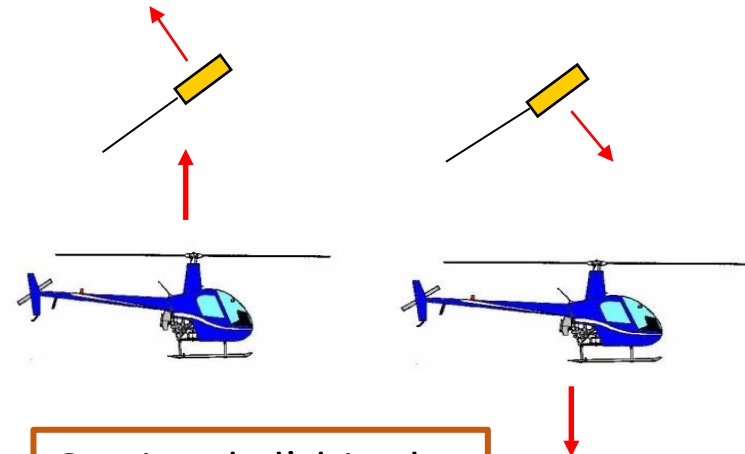
Ou sur 2 axes rapprochés, comme ici sur le KAMAN KMAX1200. On parle de rotors engrenant.



Ou par éjection des gaz en bout de pale comme sur le Djinn

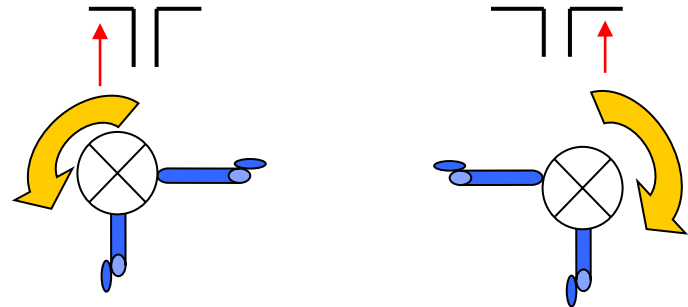
I. C.: Les commandes de vol

Le pas général / pas collectif: monter / descendre



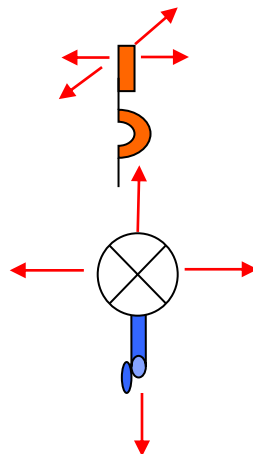
Gestion de l'altitude

Les palonniers: (axe de lacet)



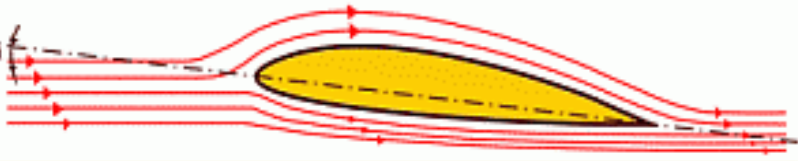
Gestion de la direction à faible vitesse et de la symétrie du vol en vitesse

Le cyclique: (axe de roulis et tangage)



Gestion de la vitesse de déplacement et gestion de la direction en vitesse

II. A.: La répartition inégale de la portance sur une pale: analogie de l'avion



Le flux d'air arrive et se sépare en deux au niveau du bord d'attaque



Le flux d'air séparé se rejoint en même temps au bord de fuite

La distance est plus grande en passant par l'extrados que par l'intrados



Le temps de parcours est le même en passant par l'extrados et l'intrados



La vitesse du flux d'air de l'extrados est donc plus rapide



II. A.: La répartition inégale de la portance sur une pale: analogie de l'avion

Formule de la pression dynamique: $Pd = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$

Formule de la pression totale: $Pt = Pd + Ps$

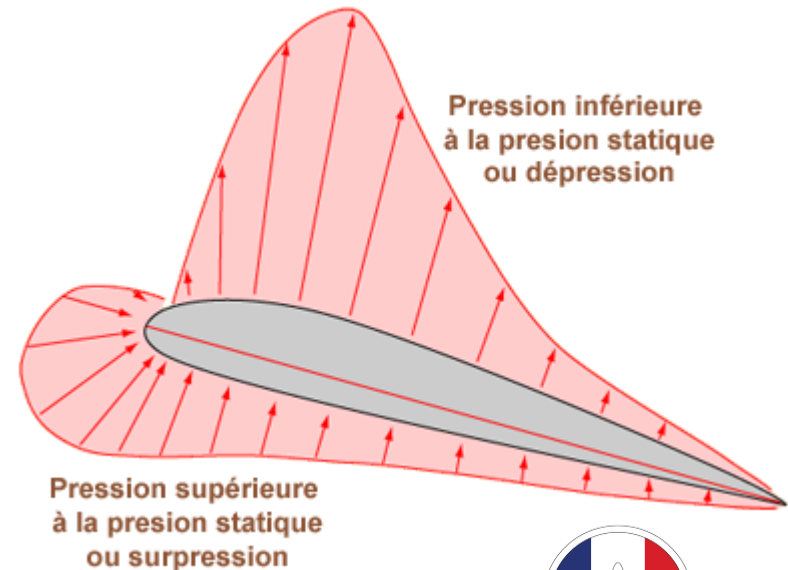
$$Pt = Pd_{EXTRADOS} + Ps_{EXTRADOS} = Pd_{INTRADOS} + Ps_{INTRADOS}$$

Or:

$$* Pd_{EXTRADOS} > Pd_{INTRADOS}$$

$$\text{car } v_{EXTRADOS} > v_{INTRADOS}$$

$$\text{donc } Ps_{EXTRADOS} < Ps_{INTRADOS}$$



II. B.: La répartition inégale de la portance sur une pale: la dissymétrie de portance

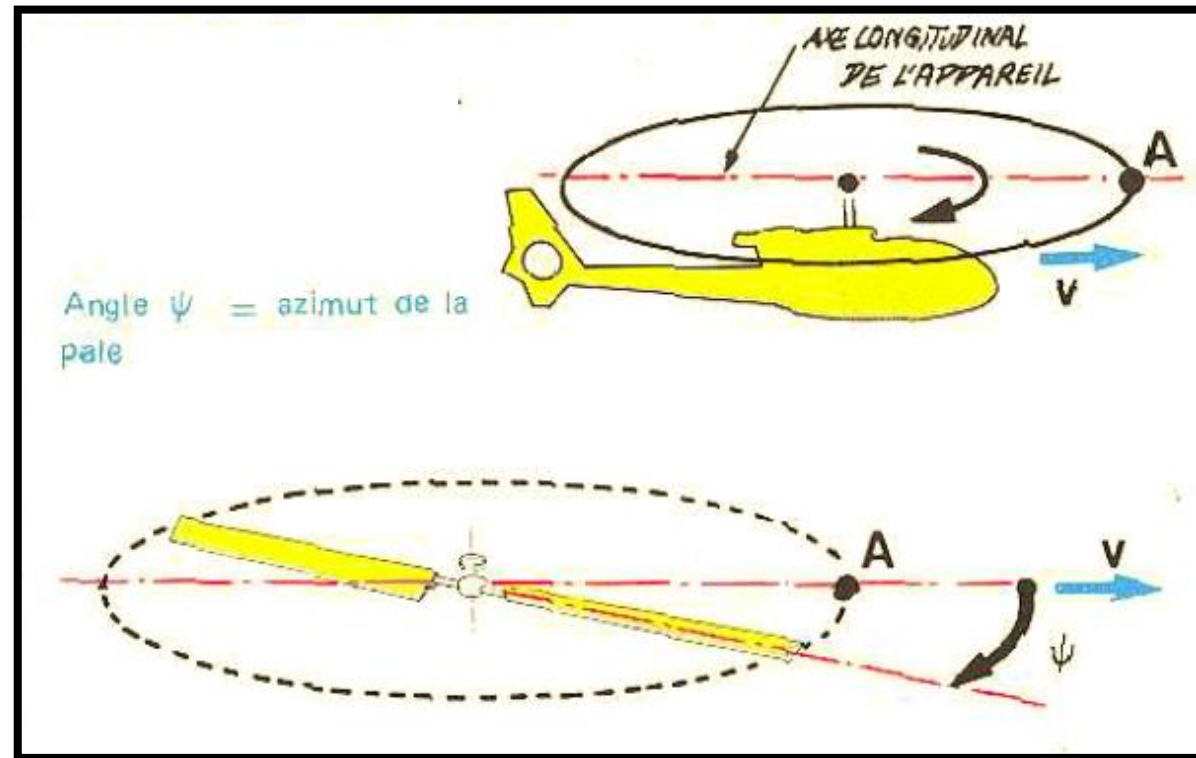
Considérons 2 points:

- Le point A: situé à l'extrémité d'une pale
- Le point B: situé à l'emplanture de cette même pale.

(Rappel: portance: $\vec{F}_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \vec{C}_z$ et la trainée: $\vec{F}_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \vec{C}_x$)

Le point A et le point B décrivent 2 cercles concentriques de centre «centre de rotation du disque rotor ».

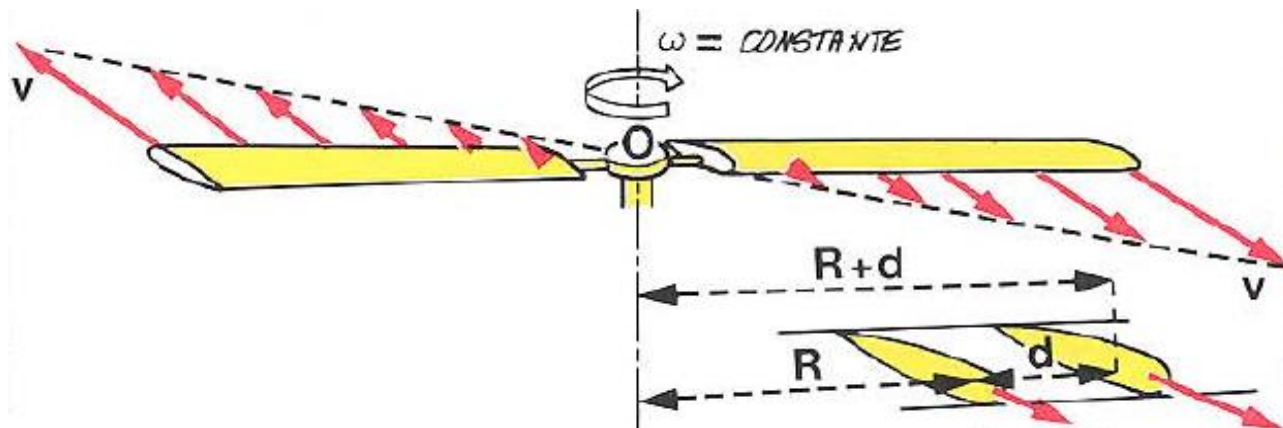
Donc la distance parcourue par le point A est plus importante que la distance parcourue par le point B pour un même temps de parcours !!



II. B.: La répartition inégale de la portance sur une pale: la dissymétrie de portance

Notre fameuse formule: $V = \frac{D}{T}$ avec V = vitesse, D = distance et T = Temps de parcours

$$\begin{aligned} D_{en\ B} &< D_{en\ A} \\ \Leftrightarrow \frac{D_{en\ B}}{T} &< \frac{D_{en\ A}}{T} \text{ car } T > 0 \\ \Leftrightarrow V_{en\ B} &< V_{en\ A} \\ \Leftrightarrow \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (V_{en\ B})^2 \cdot C_{z\ en\ B} &< \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (V_{en\ A})^2 \cdot C_{z\ en\ A} \\ \Leftrightarrow F_{z\ en\ B} &< F_{z\ en\ A} \end{aligned}$$

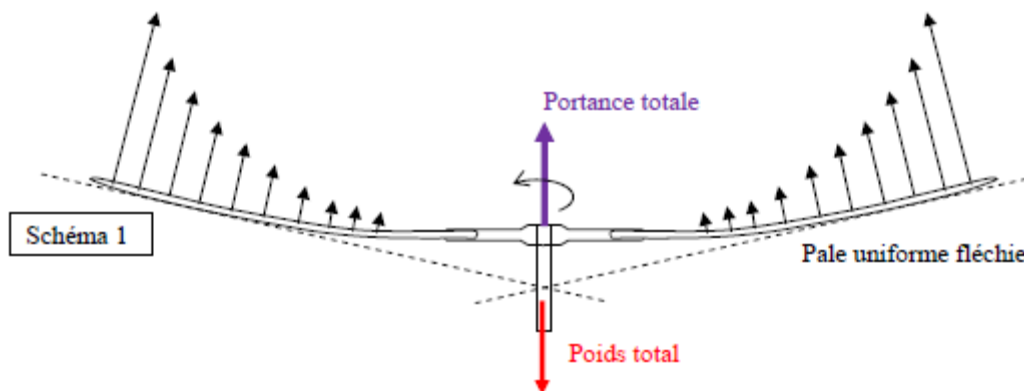


II. B.: La répartition inégale de la portance sur une pale: la dissymétrie de portance

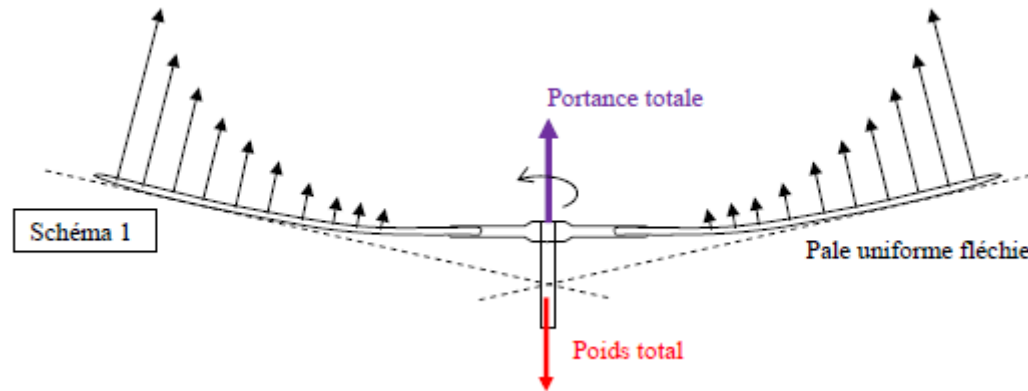
Expression des vitesses dans un mouvement circulaire:

- La vitesse angulaire: $\omega(\text{rad/s}) = \frac{2\pi N}{60} = \frac{\pi N}{30}$ où $N = nb \text{ tours}$
- La vitesse circonférentielle: $v(\text{m/s}) = \omega R$ où $R = \text{Rayon}$

On observe donc une répartition inégale de la portance le long de notre pale. En effet plus on s'éloigne de l'emplanture de la pale, plus la vitesse augmente.



II. B.: La répartition inégale de la portance sur une pale: la dissymétrie de portance

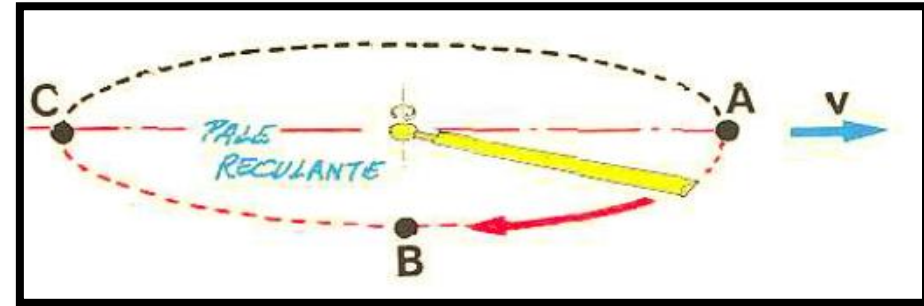
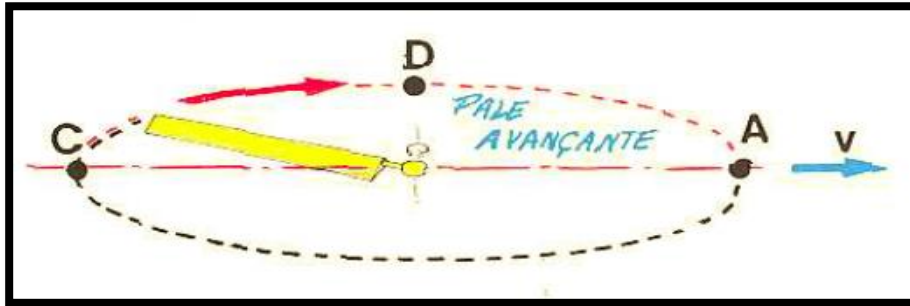


La répartition inégale de la portance sur la pale (*pour rappel la portance augmente à mesure qu'on s'éloigne de l'emplanture*) crée une contrainte importante.

En effet, l'extrémité de la pale subit un fléchissement tel que les pales ne sont pas assez rigides pour pouvoir supporter ces contraintes.

Cet effort « démesuré » peut conduire à la rupture des pales.

II. B.: La répartition inégale de la portance sur une pale: l'asymétrie de portance

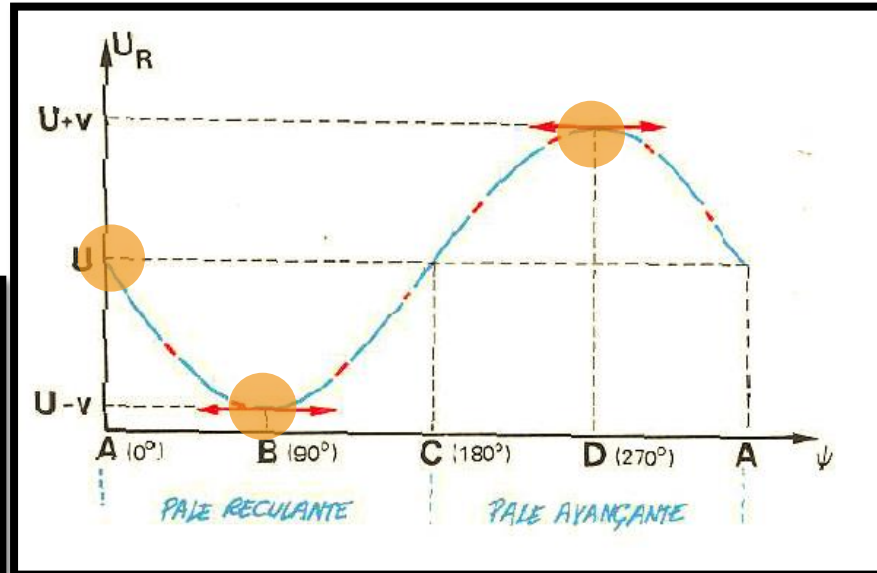
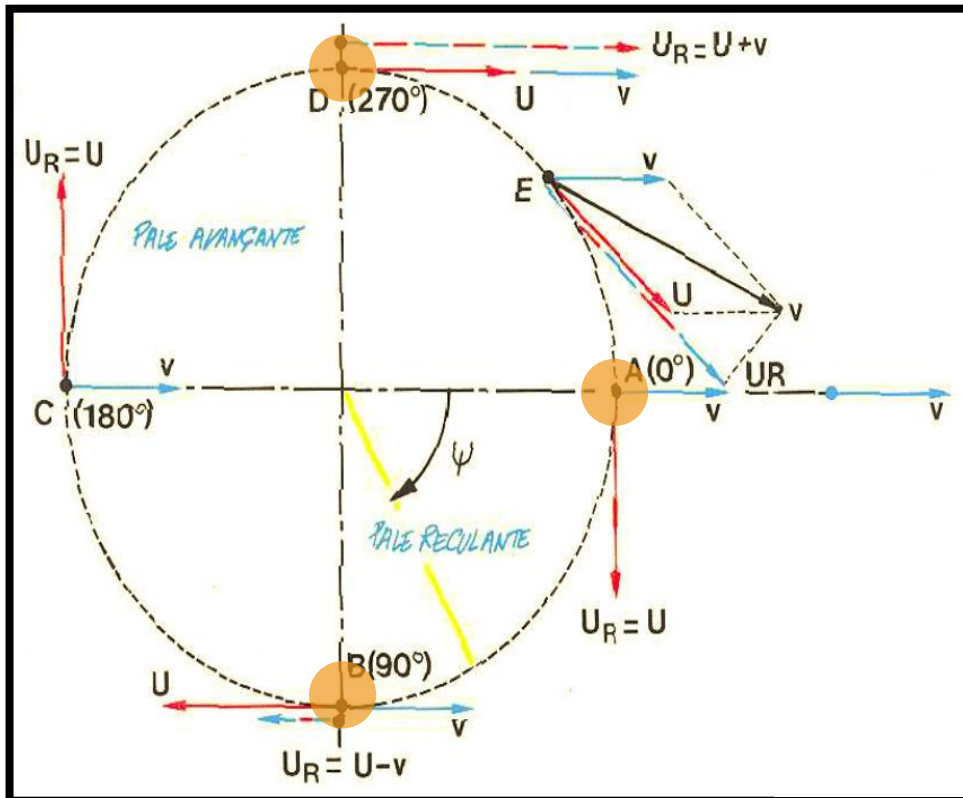


Notion de pale avançante et de pale reculante:

- La pale est dite « avançante » lorsque celle-ci parcourt le trajet du point C vers A dans le même sens d'avancement que l'hélicoptère.
- La pale est dite « reculante » lorsque celle-ci parcourt le trajet de point A vers C dans le sens inverse au sens d'avancement de l'hélicoptère.

II. B.: La répartition inégale de la portance sur une pale: l'asymétrie de portance

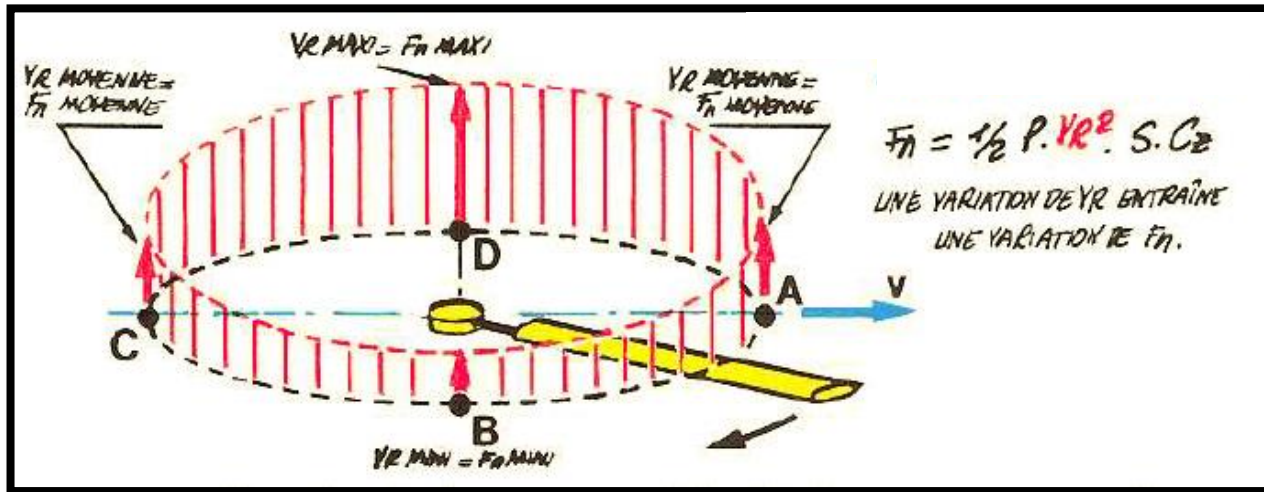
La vitesse relative (U_R) est la vitesse de la pale ($U = \text{constante}$) + vitesse de translation de l'hélicoptère (V).



De A vers B, la U_R décroît pour atteindre son minimum en B (pale reculante).

De B vers D, la U_R augmente pour atteindre son maximum en D (pale avançante).

II. B.: La répartition inégale de la portance sur une pale: l'asymétrie de portance



$$F_z = \frac{1}{2} P. U_r^2. S. C_z$$

En B, on a une U_R minimale donc une F_z minimale !

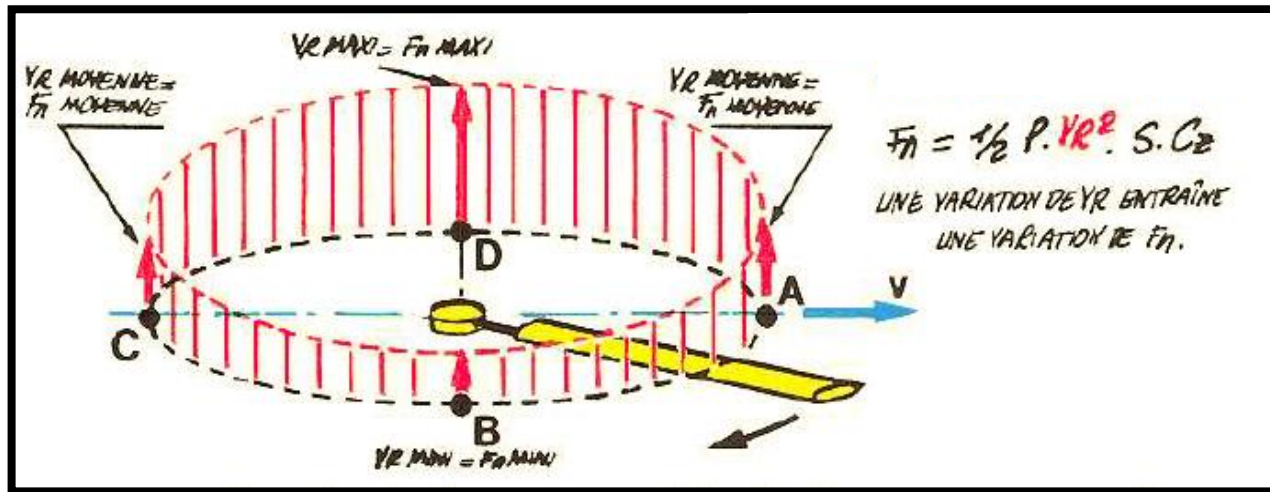
En C et A, on a une U_R moyenne (égale à U) donc une F_z moyenne !

En D, on a une U_R maximale donc une F_z maximale !

On observe donc une répartition inégale de la portance tout autour du disque rotor. En effet du côté de la pale avançante la portance augmente. A l'inverse du côté de la pale reculante, la portance diminue.



II. B.: La répartition inégale de la portance sur une pale: l'asymétrie de portance



La répartition inégale de la portance sur le disque rotor (*pour rappel la portance est maximale du côté de la pale avançante quand elle est perpendiculaire au sens d'avancement et inversement*) crée une contrainte asymétrique importante. En effet, la portance totale est alors décentrée de l'axe de rotation. La conséquence dramatique est alors un mouvement en roulis résultant d'un basculement latéral de l'hélicoptère. Une autre conséquence est une fatigue des matériaux accélérée à l'emplanture.

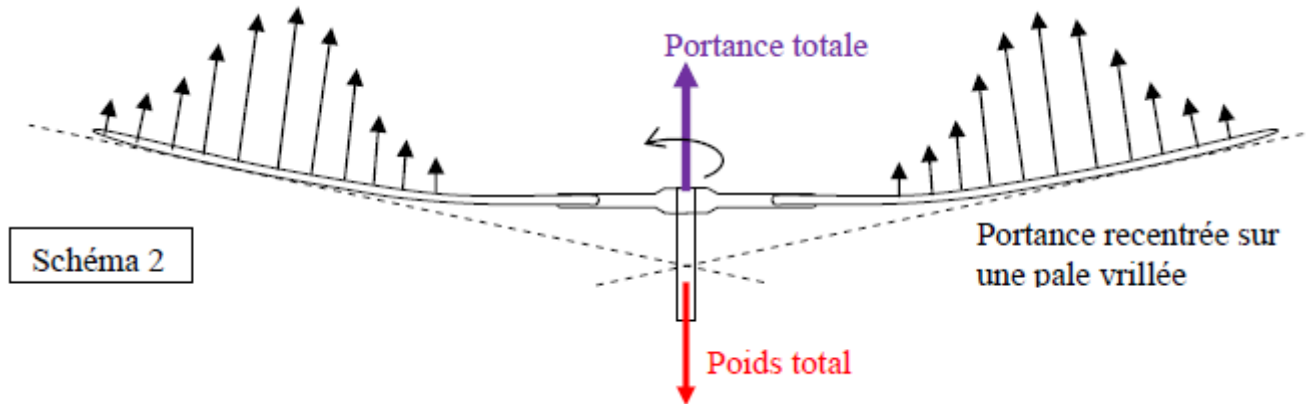
II. C.: La répartition inégale de la portance sur une pale: les solutions

- *Mais comment un hélicoptère peut-il voler dans ces conditions ?*



II. C.: La répartition inégale de la portance sur une pale: les solutions

Les constructeurs ont trouvé la solution de vriller volontairement les pales !!
En effet, les nouveaux matériaux sont assez flexibles pour pouvoir subir cette vrille.



Le but est d'augmenter la surface de pression au centre de la pale et de diminuer cette surface de pression en extrémité de pale pour recentrer la résultante de la portance et ainsi diminuer les contraintes dues aux fléchissements.

II. C.: La répartition inégale de la portance sur une pale: les solutions

La précession gyroscopique: « tout effet à une réaction à 90° » !

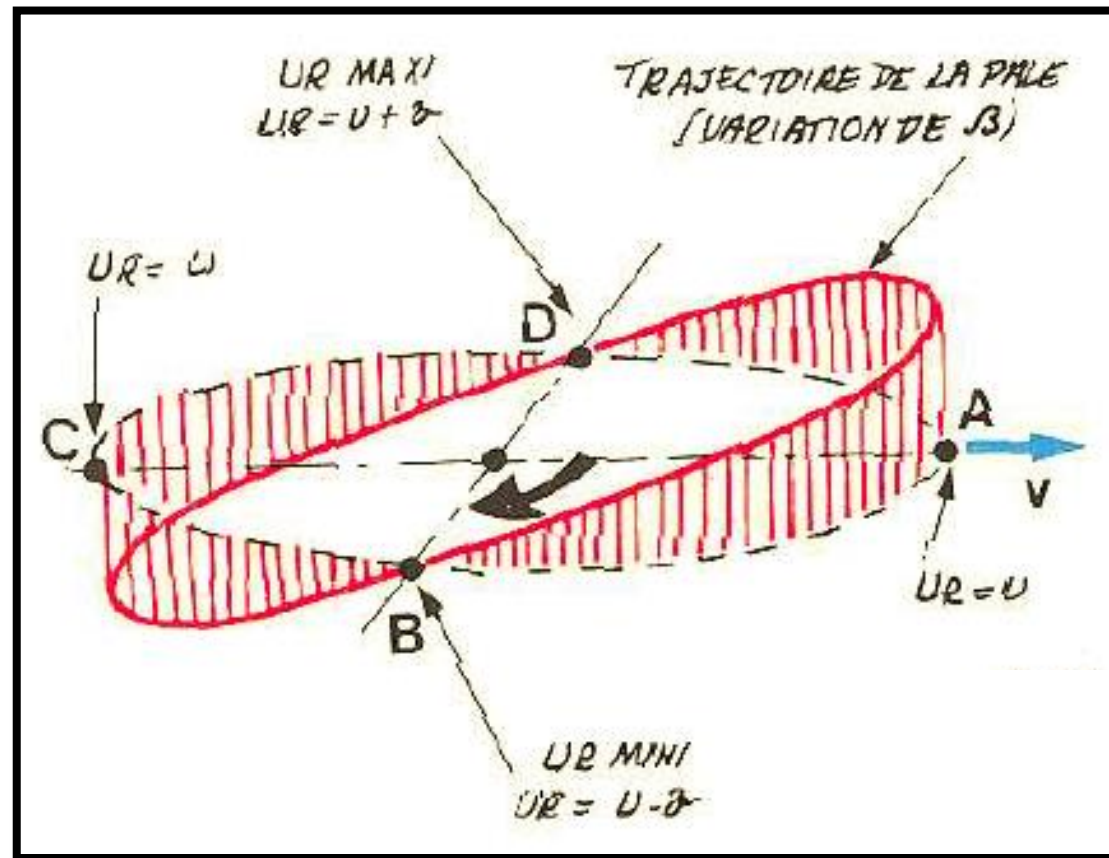
On a vu que:

- La vitesse relative de la pale est maximale en D
- La vitesse relative de la pale est minimale en B
- La vitesse croît de B en D
- La vitesse décroît de D en B

Donc la pale va subir un mouvement dans son plan de rotation:

- Un point haut en A
- Un point bas en C
- Va monter de C vers A
- Va descendre de A vers C

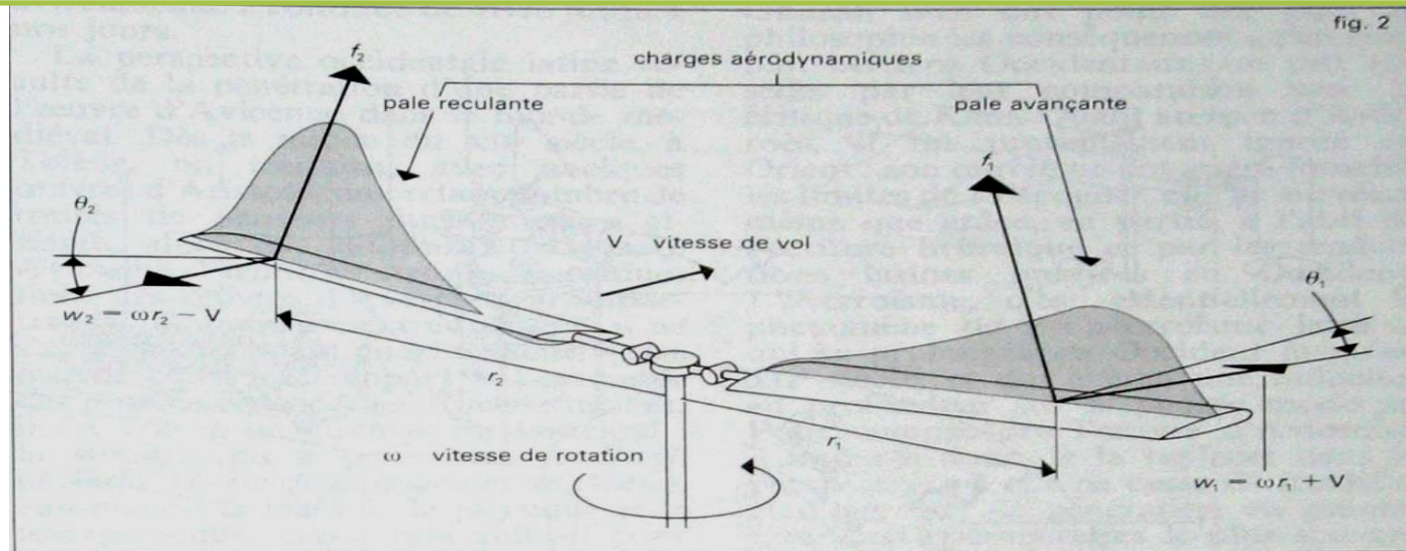
L'effet réagit 90° après !



II. C.: La répartition inégale de la portance sur une pale: les solutions

Ainsi grâce à l'angle de battement les contraintes à l'emplanture sont diminuées. De plus, l'angle d'incidence est maximal lorsque la vitesse relative de la pale est minimale.

Et l'angle d'incidence est minimal lorsque la vitesse relative de la pale est maximal.



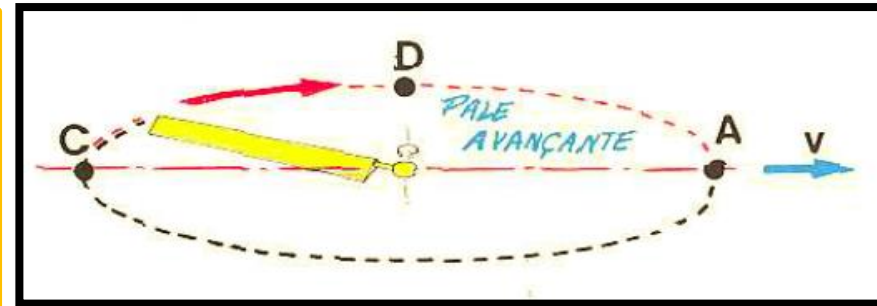
Le but est de diminuer la portance de la pale avançante en augmentant la portance de la pale reculante (grâce à la variation de l'angle d'incidence agissant sur la surface) pour trouver une valeur moyenne de portance.

Cette valeur moyenne de portance permet de recentrer la portance sur l'axe de rotation du rotor

II. C.: La répartition inégale de la portance sur une pale: la liberté des axes

La pale avançante de C vers A:

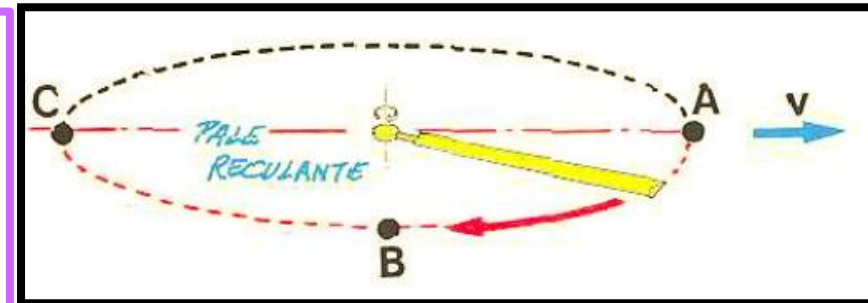
- A sa vitesse relative qui augmente
- Sa vitesse relative atteint son maximum en D
- La pale se soulève progressivement
- Atteint son angle de battement maximal en A
- Voit ses contraintes augmenter à l'emplanture pour atteindre leurs maximums en A



On dit que la pale avançante fuit et qu'elle est en avance.

La pale reculante de A vers C:

- A sa vitesse relative qui diminue
- Sa vitesse relative atteint son minimum en B
- La pale s'abaisse progressivement
- Atteint son angle de battement minimal en C
- Voit ses contraintes augmenter à l'emplanture pour atteindre leurs maximums en C



On dit que la pale reculante précipite et qu'elle est en retard.

Questions ?

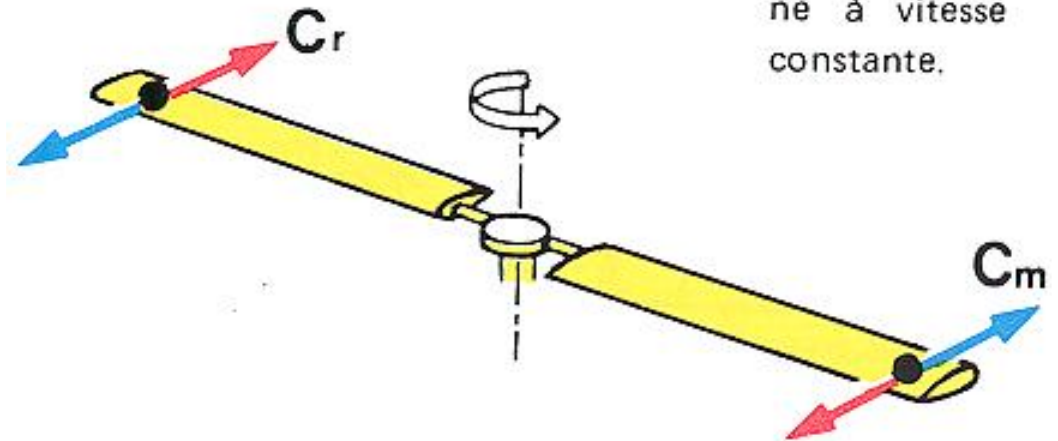


Partie 2..... À suivre.....Revenez vite avec nous



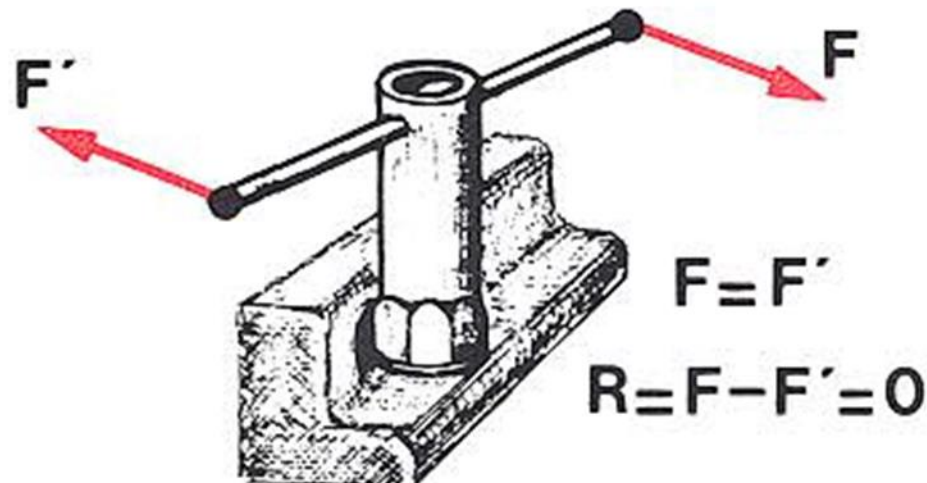
III. A.: Le pilotage de l'Hélicoptère

- *Couple*

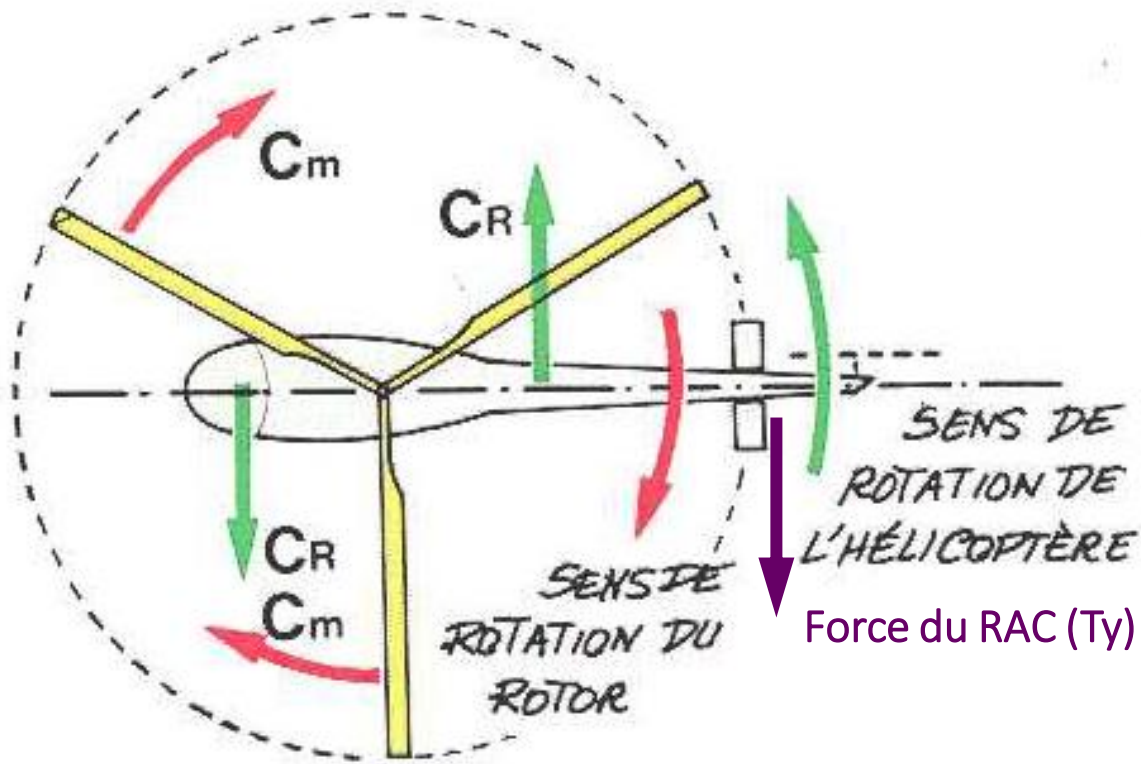


$C_m = C_r$.
Le rotor tourne à vitesse constante.

- *Lorsque deux forces égales et opposées ne s'appliquent pas au même point, cela forme un couple*



III.A.: Le pilotage de l'Hélicoptère



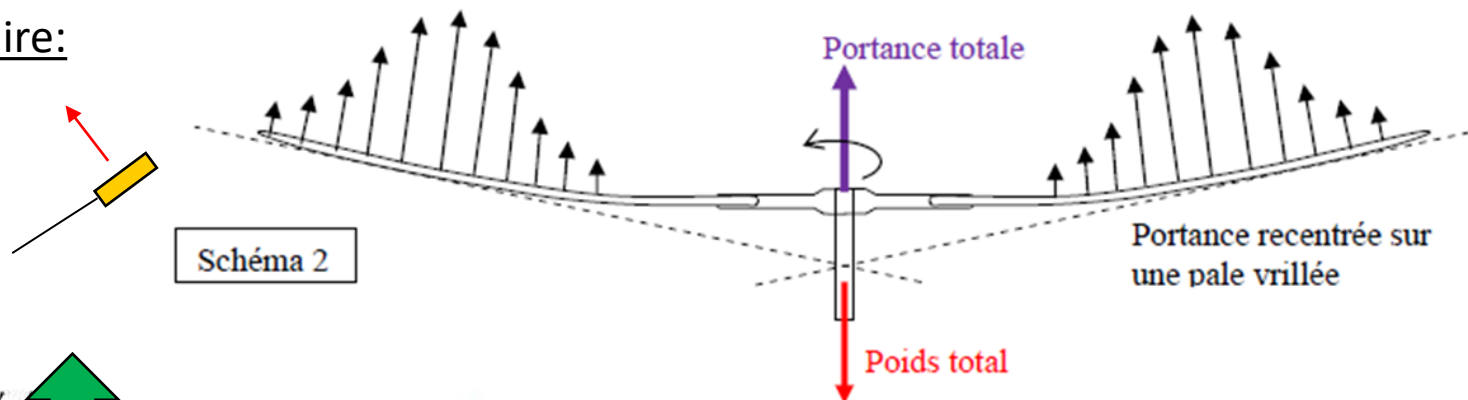
C_r : Couple de réaction

C_m : Couple moteur

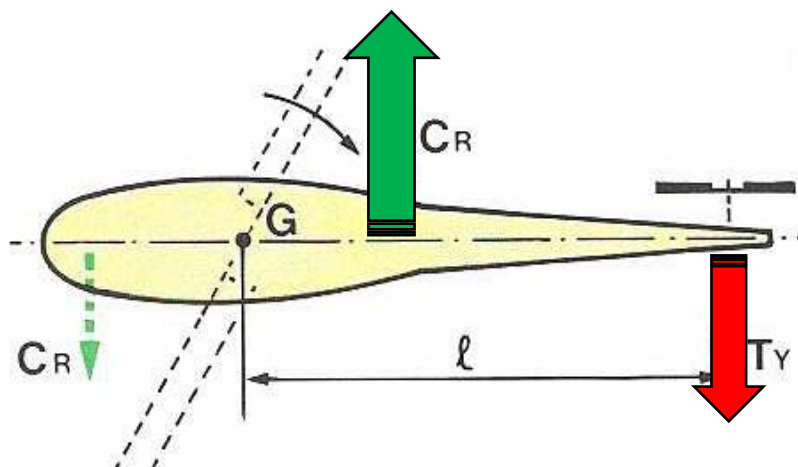
III. A.: Le pilotage de l'Hélicoptère

* La Mise en Stationnaire:

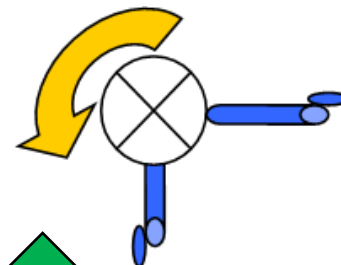
① « Léger patin »



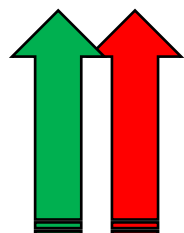
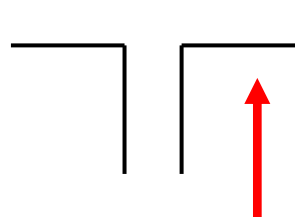
②



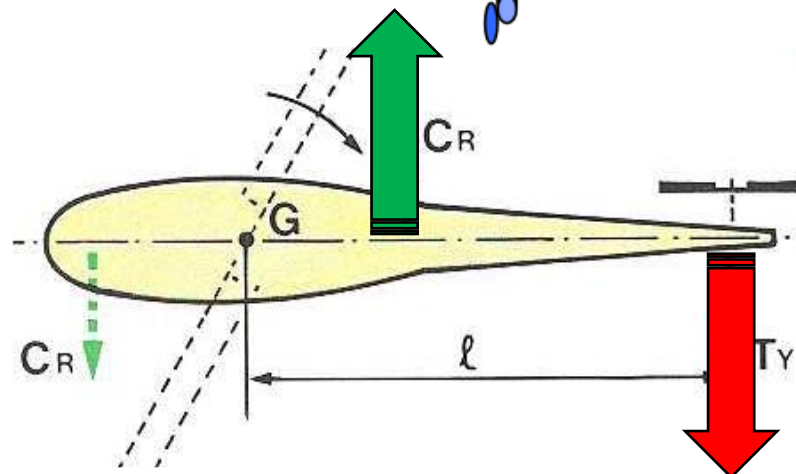
$$C_r < T_y \Rightarrow$$



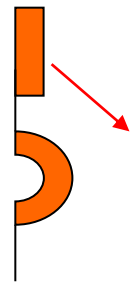
③



$$C_r = T_y$$

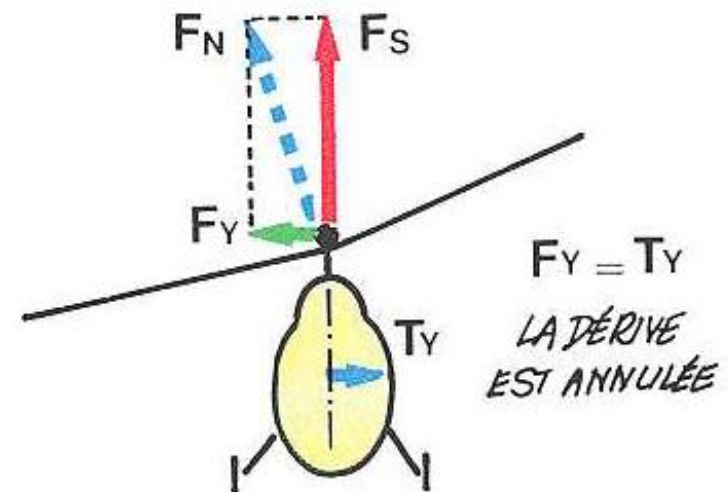
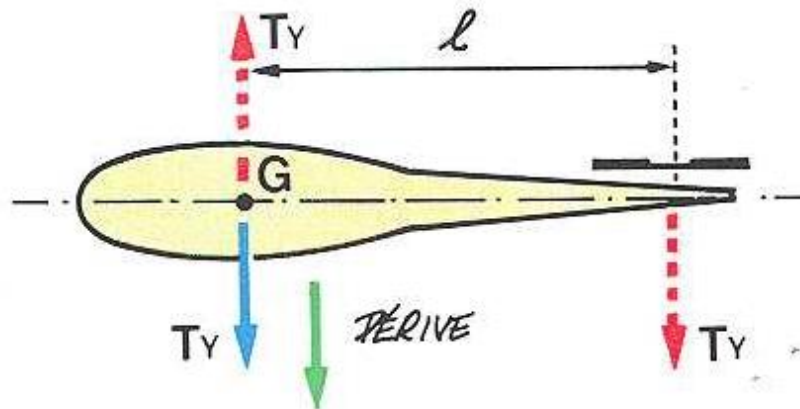


III. A.: Le pilotage de l'Hélicoptère



* La Mise en Stationnaire:

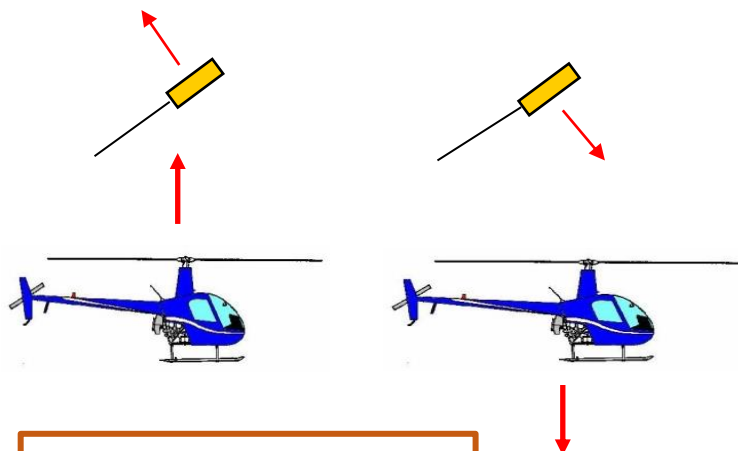
VOULOIR ÉQUILIBRER UN COUPLE PAR UNE FORCE
OU LES MÉFAITS DE LA POUSSEE T_Y DU ROTOR ARRIERE.



La poussée du rotor arrière équilibre le couple du rotor principal et génère une force latérale, appliquée au centre de gravité, qui fait dériver l'hélicoptère. Pour annuler cette dérive il faut appliquer une force égale en sens contraire. Ce résultat est atteint par inclinaison du disque rotor principal dans le sens opposé à la poussée rotor arrière.

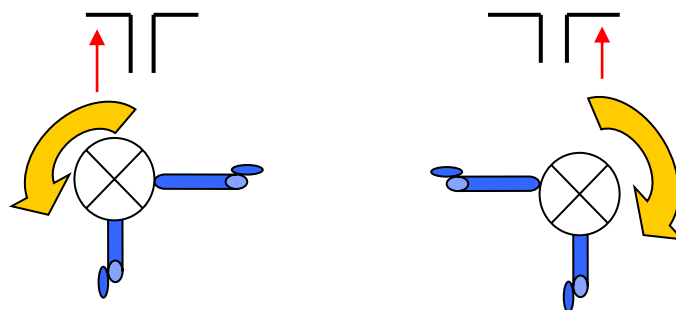
III. A.: Le pilotage de l'Hélicoptère: pour résumer

Le pas général / pas collectif: monter / descendre



Gestion de l'altitude

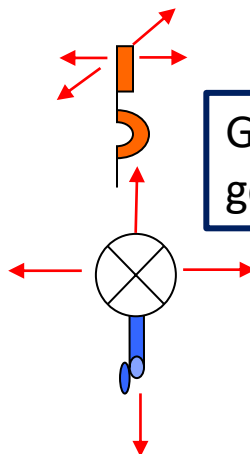
Les palonniers: (axe de lacet)



Gestion de la direction à faible vitesse et de la symétrie du vol en vitesse

Le cyclique: (axe de roulis et tangage)

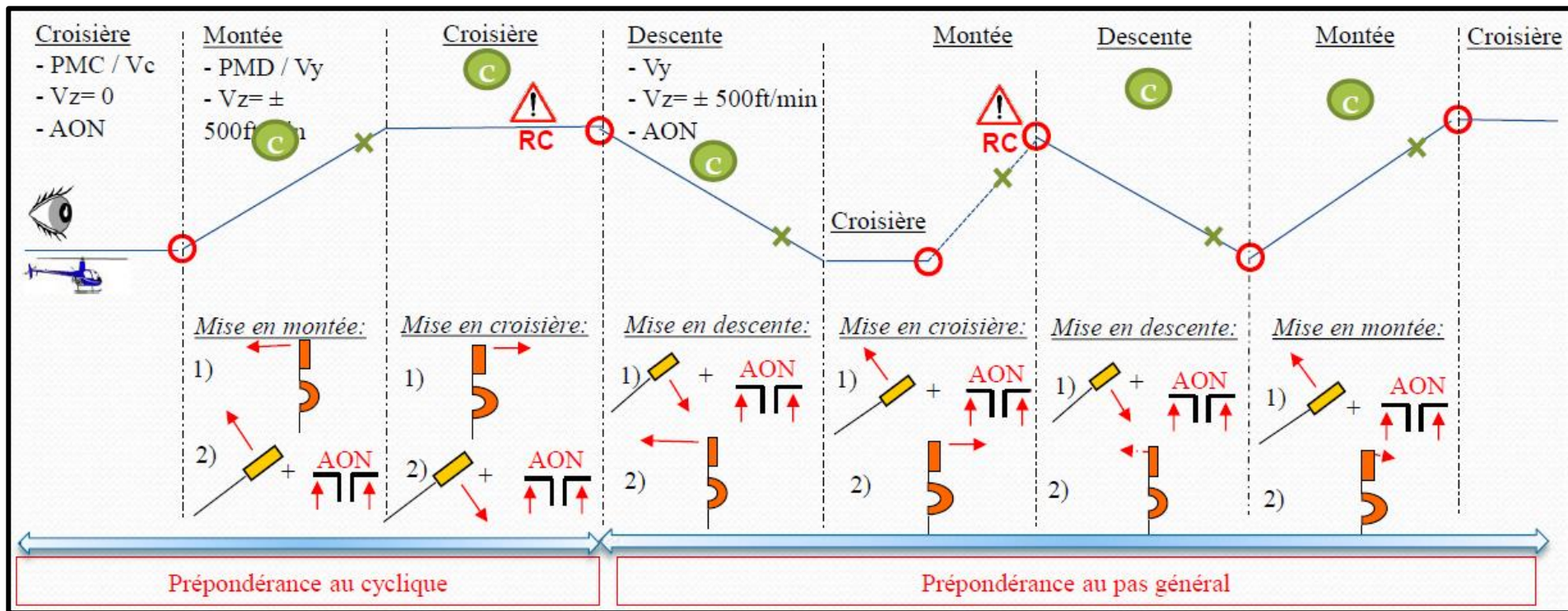
Agir sur une commande conduit à corriger les effets secondaires sur les deux autres commandes !



Gestion de la vitesse de déplacement et gestion de la direction en vitesse

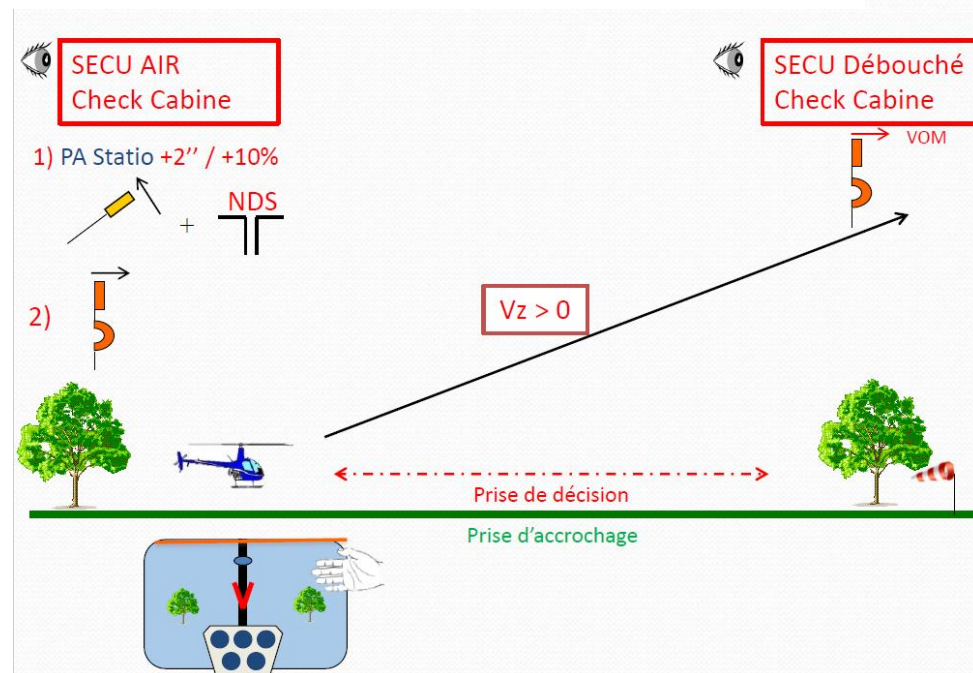
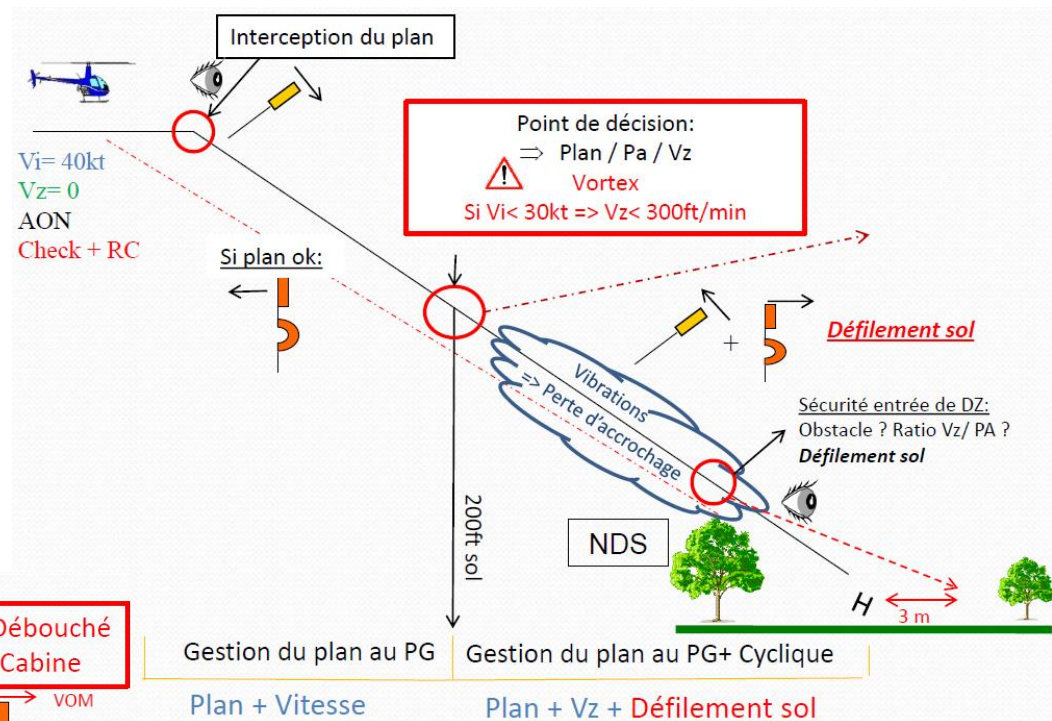
III. A.: Le pilotage de l'Hélicoptère: pour résumer

Agir sur une commande vous oblige à corriger sur les deux autres !

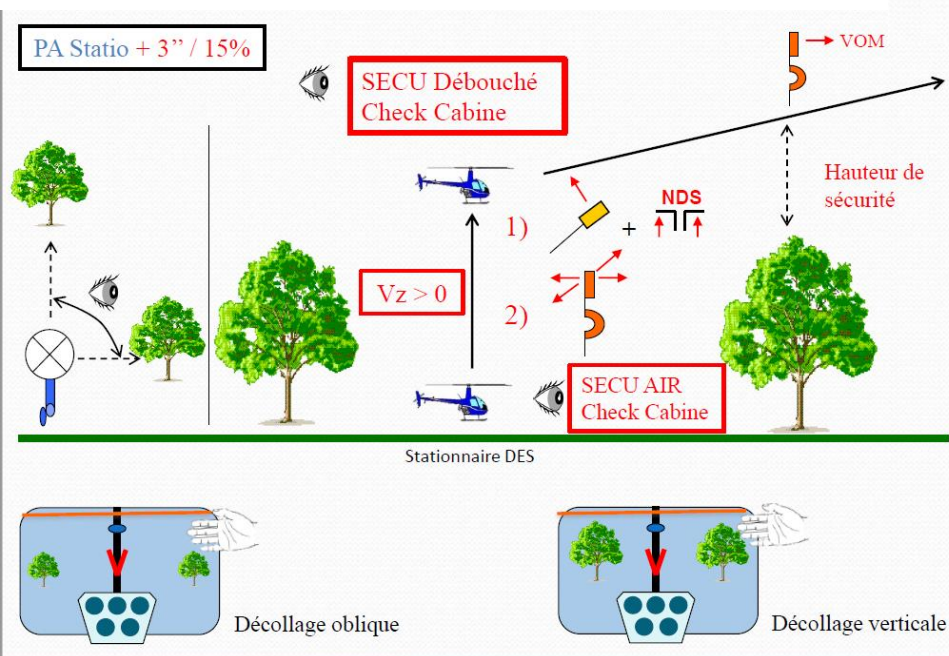
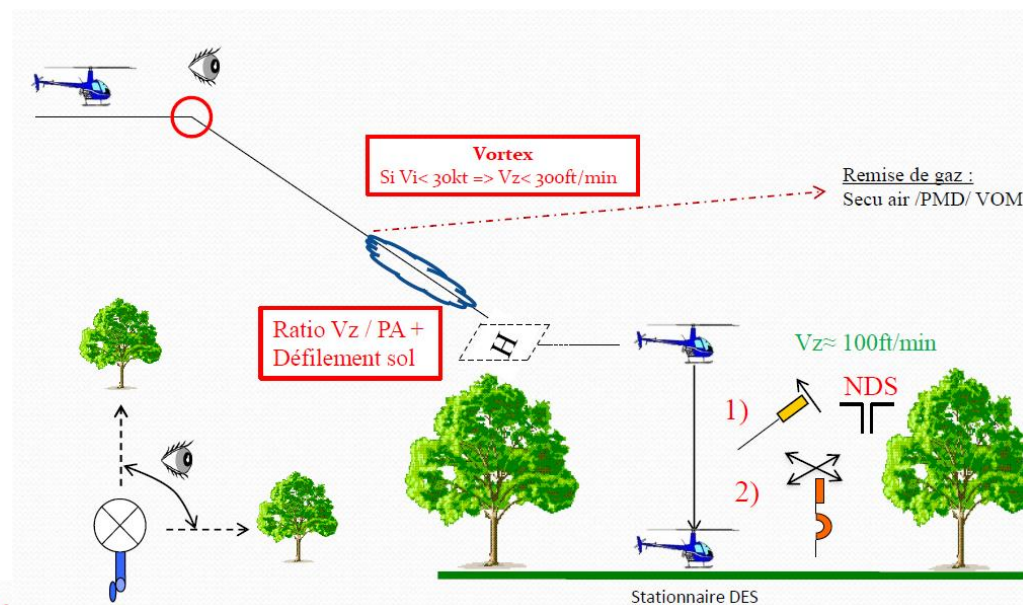


Le terme AON signifie: « Attaque Oblique Nulle » c'est-à-dire de garder la symétrie du vol à l'aide de la bille et/ou de ficelles placées sur le pare-brise.

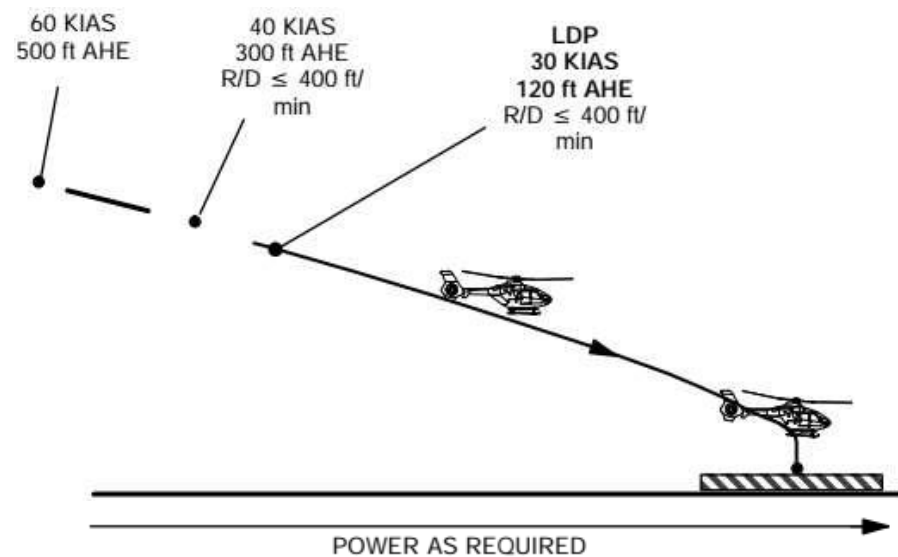
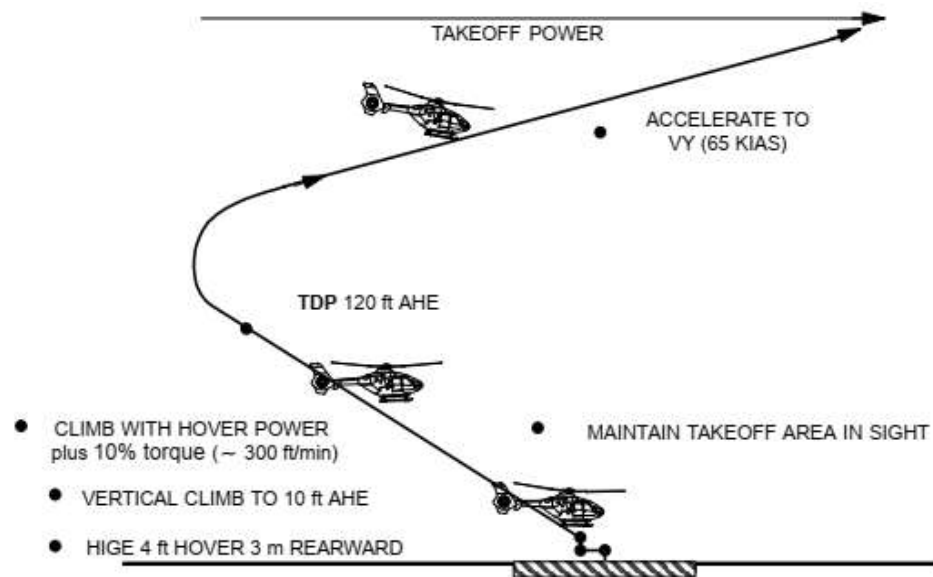
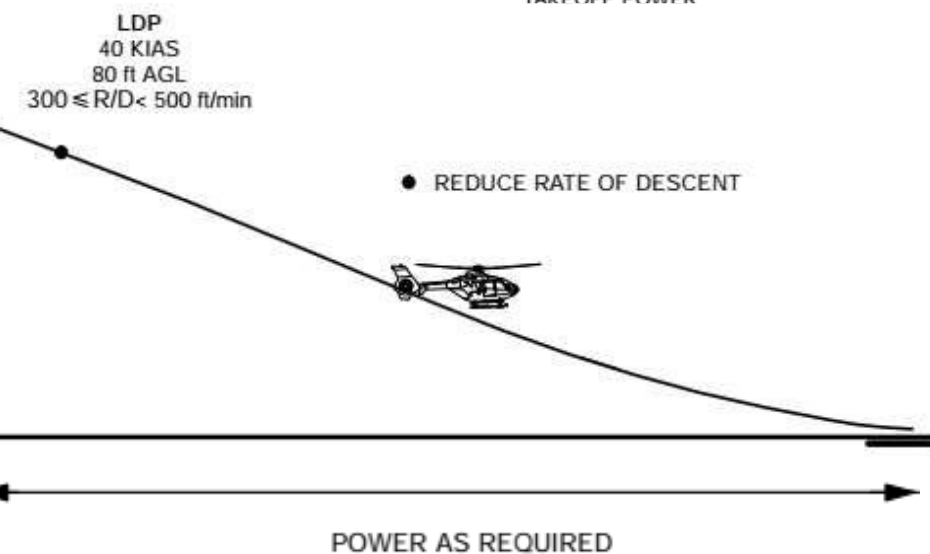
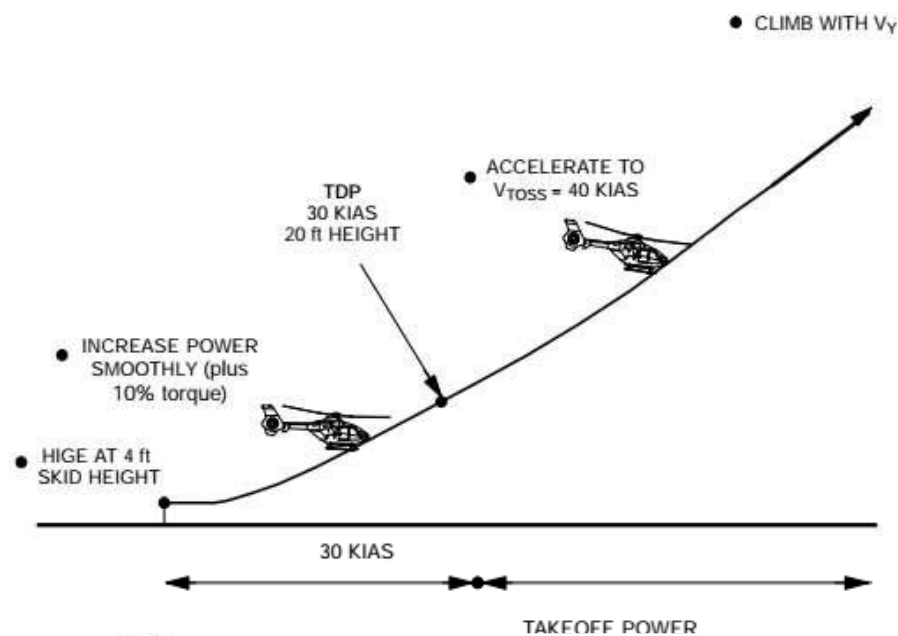
III. B.: Utilisation de l'hélicoptère: différence hélico/avion: techniques deco/atterro



III. B.: Utilisation de l'hélicoptère: différence hélico/avion: techniques deco/atterro



III. B.: Utilisation de l'hélicoptère: différence hélico/avion: bimoteur

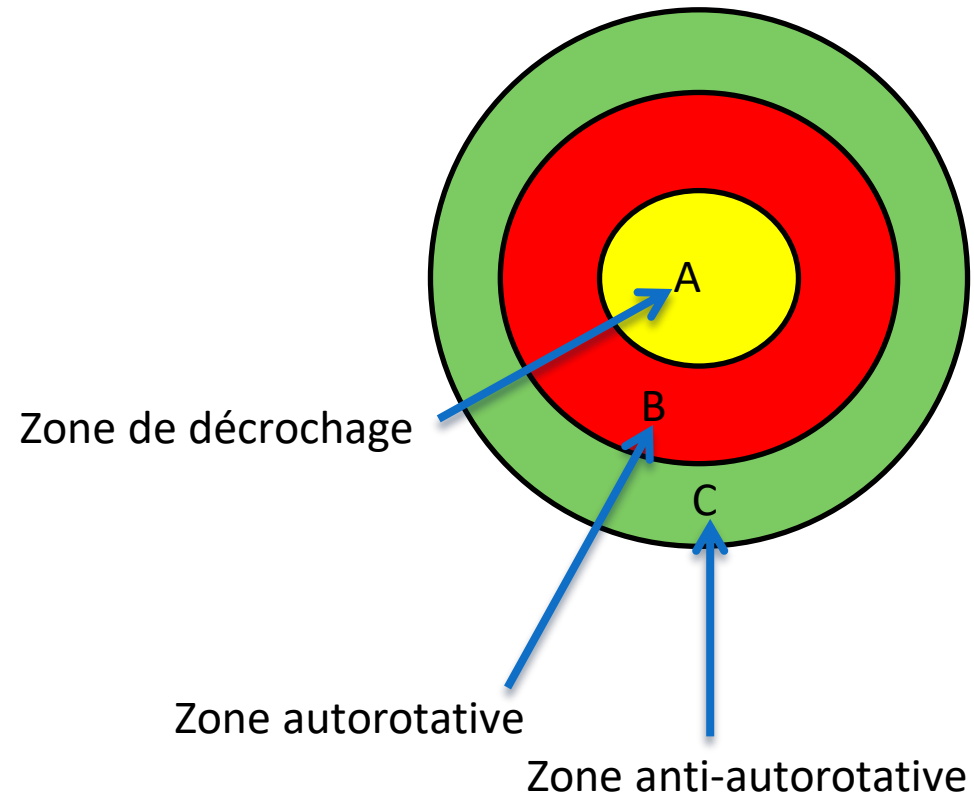
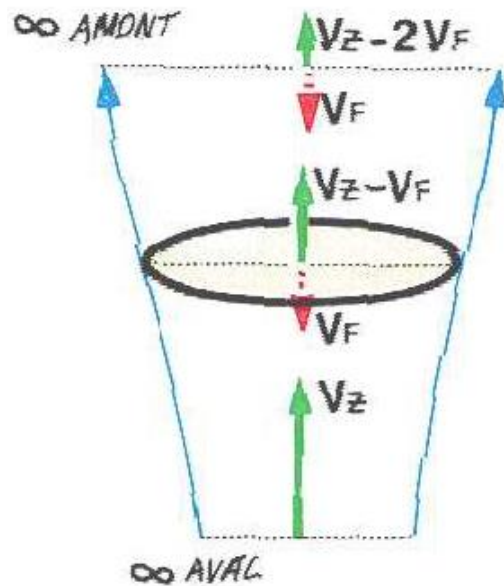
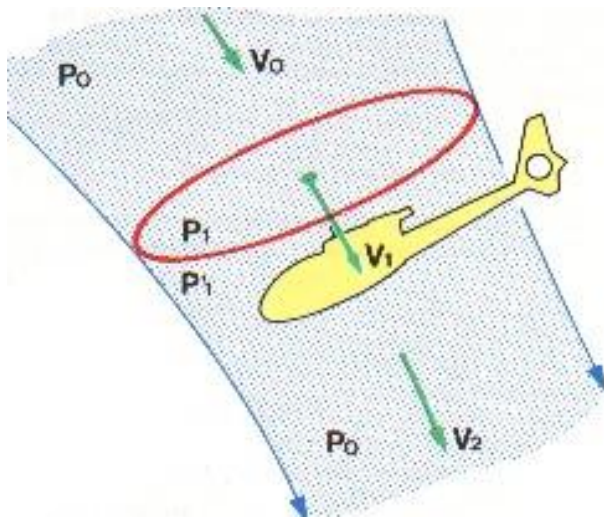


III. C.: Utilisation de l'hélicoptère: différence hélico/avion: procédures ops

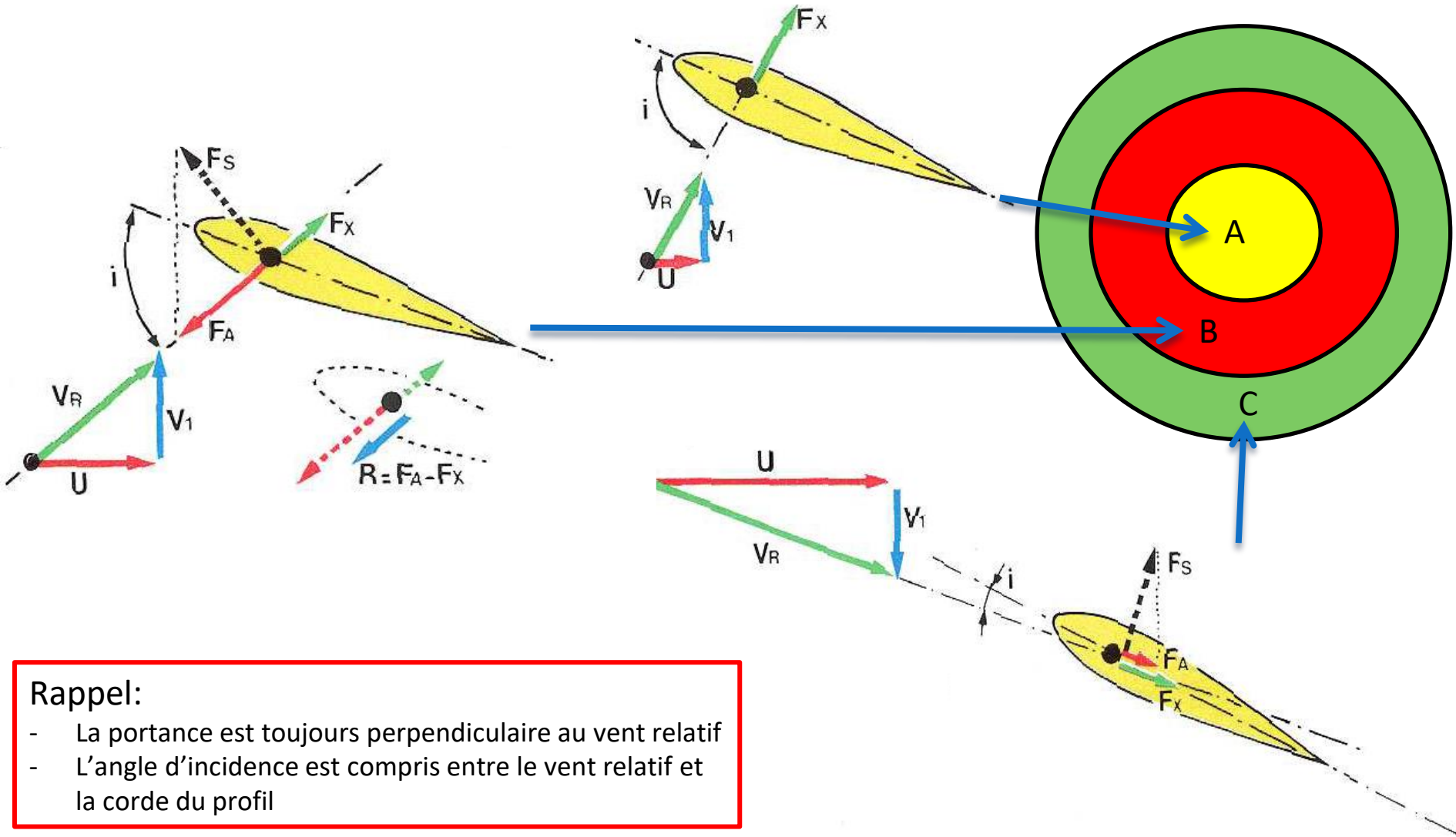
- ✓ Si un hélicoptère n'est pas équipé de roues celui-ci est obligé de se déplacer en vol le long du sol: **il translate**
- ✓ Un hélicoptère peut décoller et atterrir sur une piste comme un avion ou bien sur une aire spécialement aménagée: **une FATO: Final Approach and Take-Off**
- ✓ Selon le règlement NCO.OP.126(a)(1): la réserve finale est de **20 minutes** à la vitesse de meilleure distance franchissable (en VFR de jour.)



III. C.: Utilisation de l'hélicoptère: l'autorotation: la descente



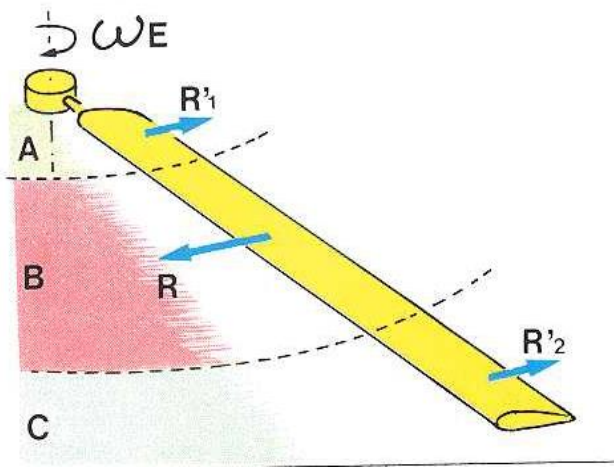
III. C.: Utilisation de l'hélicoptère: l'autorotation: la descente



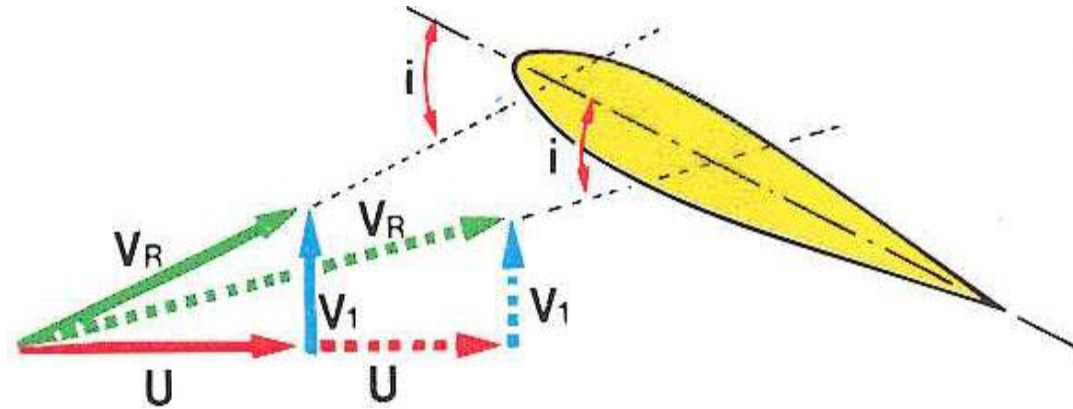
III. C.: Utilisation de l'hélicoptère: l'autorotation: la descente

Résumons:

- Il existe en régime autorotatif **3 zones** réparties sur notre disque rotor
- > **une zone de décrochage**: où l'incidence est telle que la partie de pale a décroché
- > **une zone autorotative**: qui permet de conserver l'inertie du rotor et fait tourner nos pâles
- > **une zone anti-autorotative**: qui a tendance à stopper l'inertie du rotor et freiner nos pâles



ω_E est appelé vitesse
« d'équilibre » de rotation du rotor
en régime d'autorotation où: $\vec{R} + \vec{R}'_1 + \vec{R}'_2 = \vec{0}$



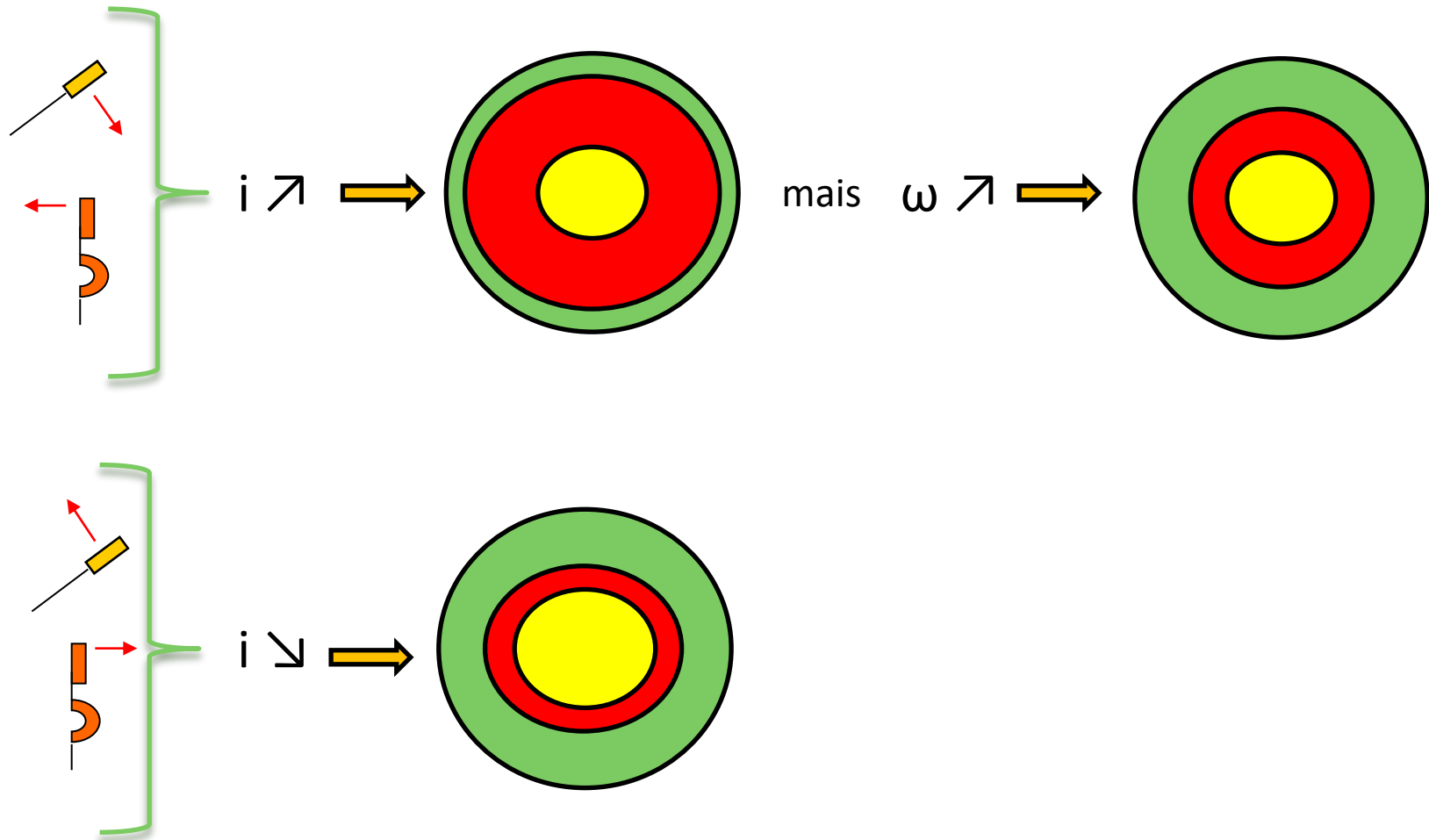
Si $\omega \nearrow$ alors :

- $U = \omega R \nearrow$ et $i \searrow$ alors zone anti-autorotative $\nearrow$

Si $\omega \searrow$ alors :

- $U = \omega R \searrow$ et $i \nearrow$ alors zone autorotative $\nearrow$

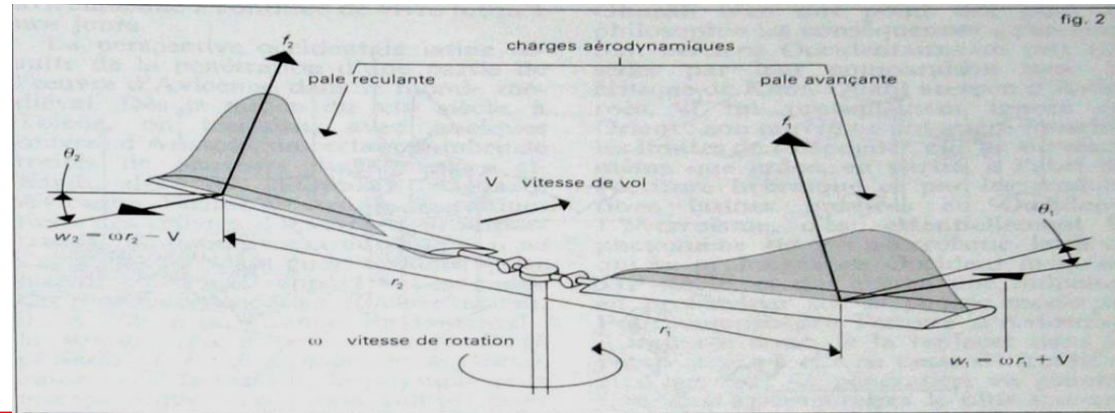
III. C.: Utilisation de l'hélicoptère: l'autorotation: effet des commandes



III. C.: Utilisation de l'hélicoptère: l'autorotation

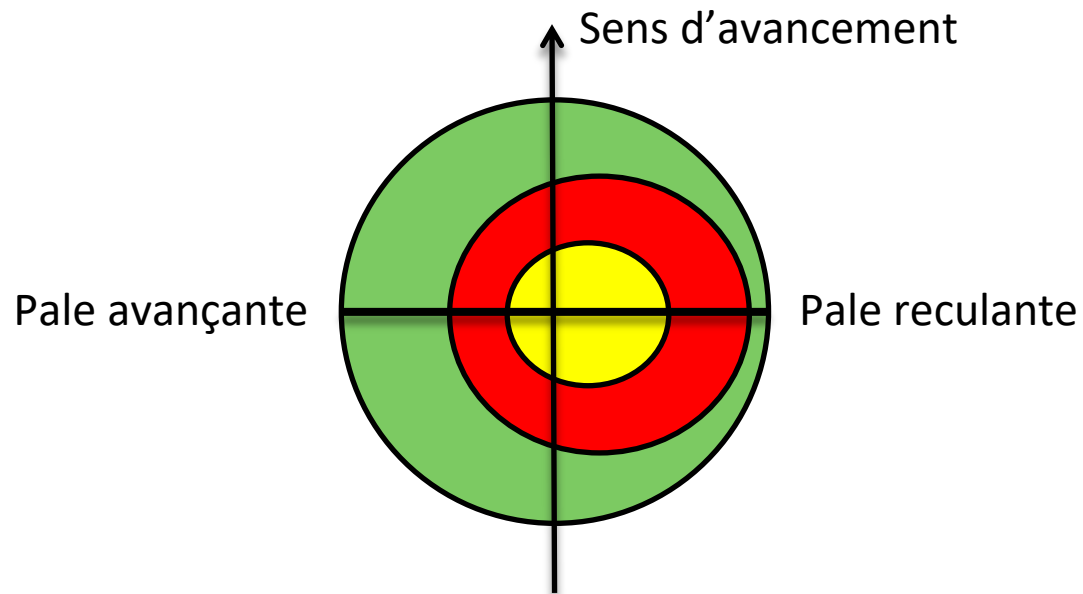
Pour rappel:

- Côté pale avançante: $i \searrow$
- Côté pale reculante: $i \nearrow$



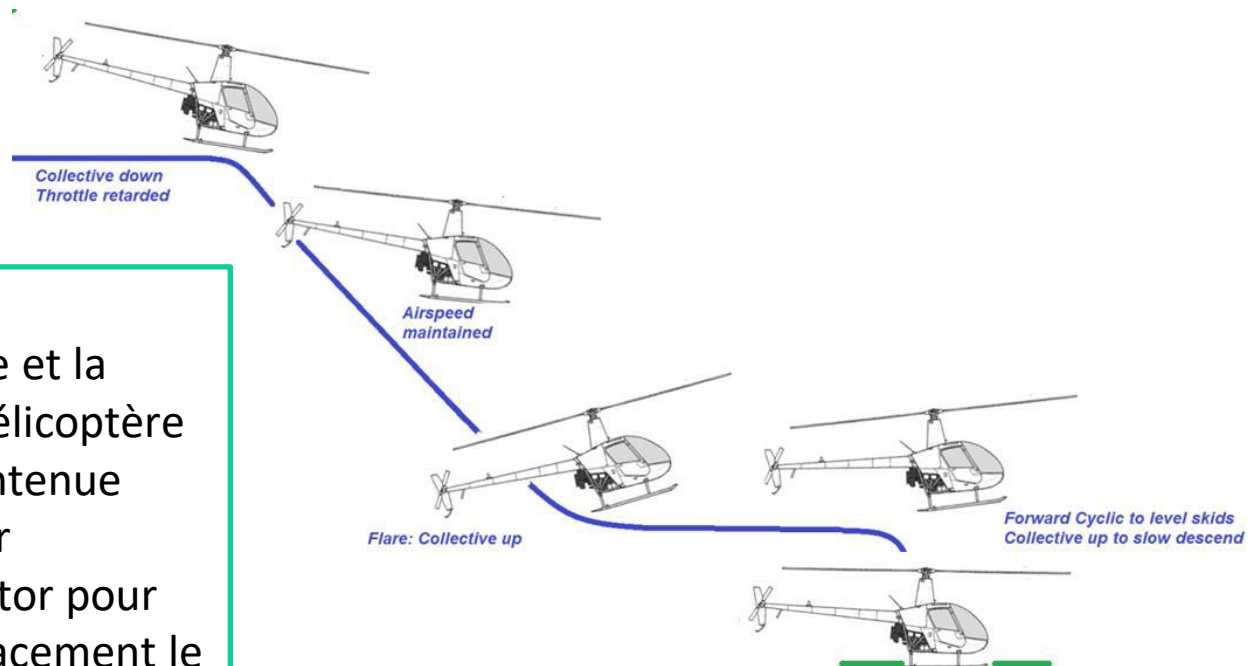
On a donc:

- Côté pale avançante: la zone autorotative diminue
- Côté pale reculante: la zone anti-autorotative diminue



III. C.: Utilisation de l'hélicoptère: l'autorotation: la finale

- 1) Etablir ses paramètres d'autorotation
- 2) Maintenir sa vitesse d'autorotation: « la vitesse: c'est la vie »
- 3) À l'approche du sol effectuer un flare
- 4) Remettre l'hélicoptère à plat
- 5) Soutenir l'hélicoptère pour amortir le contact avec le sol à l'aide du Pas.



Le flare a pour but:

- De diminuer le taux de chute et la vitesse d'avancement de l'hélicoptère
- De transformer l'énergie contenue dans la vitesse en tours rotor
- D'emmagasinier des tours rotor pour pouvoir amortir le plus efficacement le posé.

Questions ?

