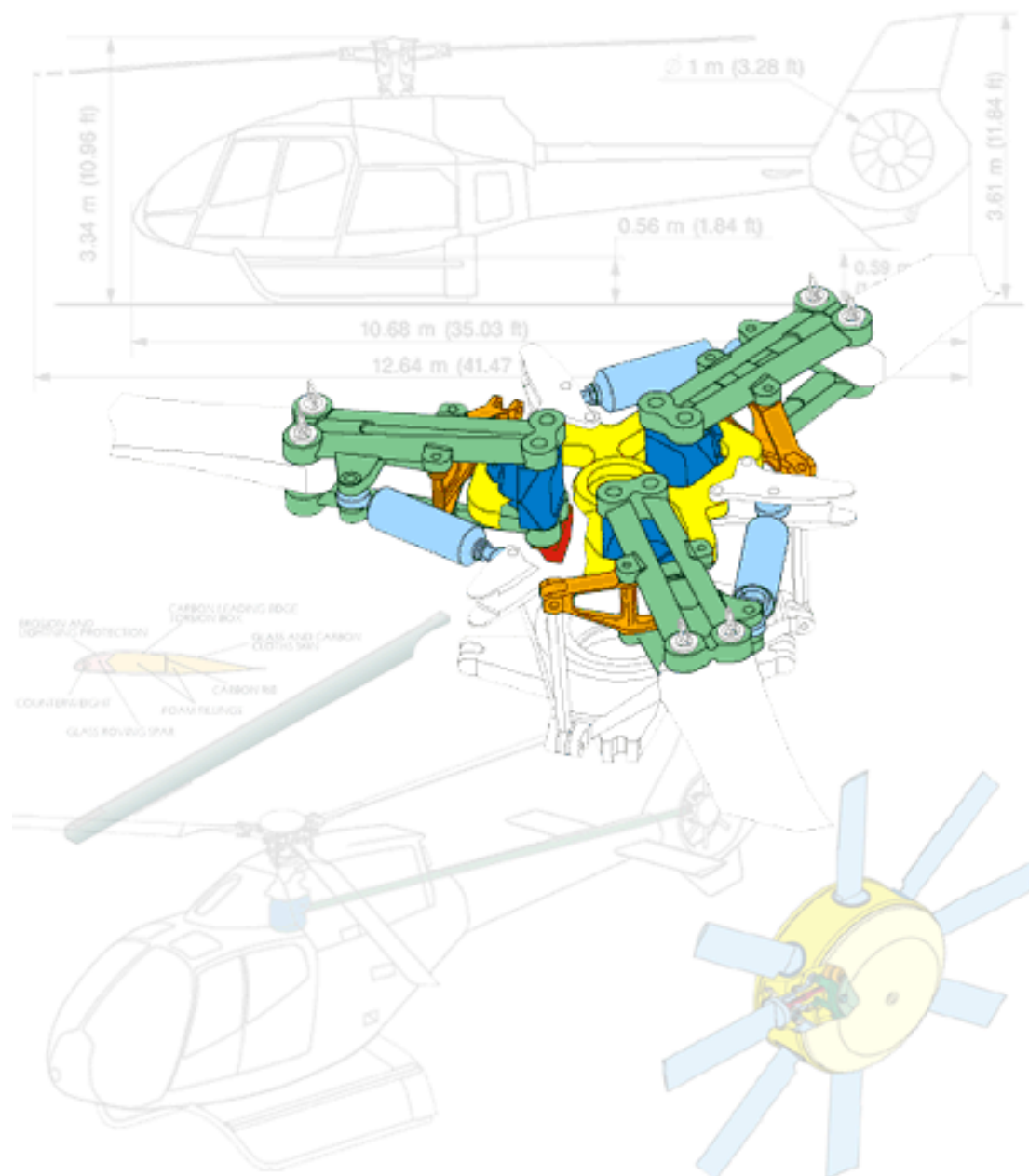


LA DYNAMIQUE DE VOL DE L'HELICOPTERE



Philippe BRUYERE
Benjamin GOMBERT
Eric VENCE

SOMMAIRE

A. Le système : rotor – pales	<i>p. 3</i>
I- La structure du rotor	<i>p. 3</i>
<i>a- Le rotor articulé</i>	<i>p. 3</i>
<i>b- Le rotor semi-rigide</i>	<i>p. 3</i>
<i>c- L'aile : acteur principal du vol</i>	<i>p. 4</i>
II- Les différents types de pales	<i>p. 4</i>
<i>a- Les pales symétriques</i>	<i>p. 4</i>
<i>b- Les pales asymétriques</i>	<i>p. 5</i>
B. Les phénomènes permettant le vol de l'hélicoptère	<i>p. 6</i>
I- Le vent relatif	<i>p. 6</i>
<i>a- La notion de vent relatif</i>	<i>p. 6</i>
<i>b- Le flux induit</i>	<i>p. 6</i>
II- La force aérodynamique totale	<i>p. 7</i>
<i>a- La circulation de l'air autour d'une pale</i>	<i>p. 7</i>
<i>b- Définition de la force aérodynamique totale</i>	<i>p. 8</i>
<i>c- Autres facteurs agissant sur la poussée</i>	<i>p. 8</i>
III- La vitesse des pales	<i>p. 9</i>
<i>a- La variation de la poussée</i>	<i>p. 9</i>
<i>b- Les pales vrillées</i>	<i>p. 9</i>
V- L'effet de sol	<i>p. 9</i>
<i>a- Définition de l'effet de sol</i>	<i>p. 9</i>
<i>b- L'influence de la nature du sol</i>	<i>p. 10</i>
VI- La force centrifuge	<i>p. 10</i>
C. Les effets néfastes sur le vol de l'hélicoptère	<i>p. 10</i>
I- L'effet de cône	<i>p. 10</i>
II- L'effet gyroscopique	<i>p. 11</i>
<i>a- Notion d'effet gyroscopique</i>	<i>p. 11</i>
<i>b- Explication illustrée</i>	<i>p. 12</i>
III- La trainée	<i>p. 12</i>
<i>a- La trainée totale</i>	<i>p. 12</i>
<i>b- La trainée du profil</i>	<i>p. 13</i>
<i>c- La trainée induite</i>	<i>p. 13</i>
<i>d- La trainée parasite</i>	<i>p. 13</i>
IV- Le moment de torsion	<i>p. 13</i>
<i>a- La conséquence sur le fuselage</i>	<i>p. 13</i>
<i>b- Le rotor d'anti-couple</i>	<i>p. 13</i>

L'hélicoptère est l'engin volant qui met en jeu le plus de forces et de lois physiques. Il a toujours suscité une énorme volonté de la part des passionnés pour en améliorer les caractéristiques, que ce soient Léonard de Vinci ou de grands bureaux d'étude au sein d'entreprises aéronautiques.

Un hélicoptère classique possède deux ensembles de rotors. Le premier, appelé communément disque rotor, installé horizontalement, produit la portance et la poussée. Ce rotor peut comporter de 2 à 8 pales en fonction du type d'hélicoptère. Un second ensemble, plus petit, monté verticalement à l'extrémité de la queue, est le rotor d'anti-couple. La fonction du rotor de queue consiste à contrer le couple produit par le rotor principal. Certains hélicoptères n'ont pas de rotor d'anti-couple, mais un deuxième rotor principal qui tourne dans le sens opposé du premier.

L'aérodynamisme concerne le mouvement de l'air et les forces agissant sur des objets en déplacement dans l'air. En effet, l'aérodynamisme met en relation un objet (aéronef), le mouvement (vent relatif) et l'air (atmosphère). La dynamique du vol de l'hélicoptère ne peut être expliquée que si l'on prend en compte différents phénomènes, lois et forces physiques appliqués à l'appareil.

Les principales lois du déplacement de Newton qui influencent le plus le vol sont :

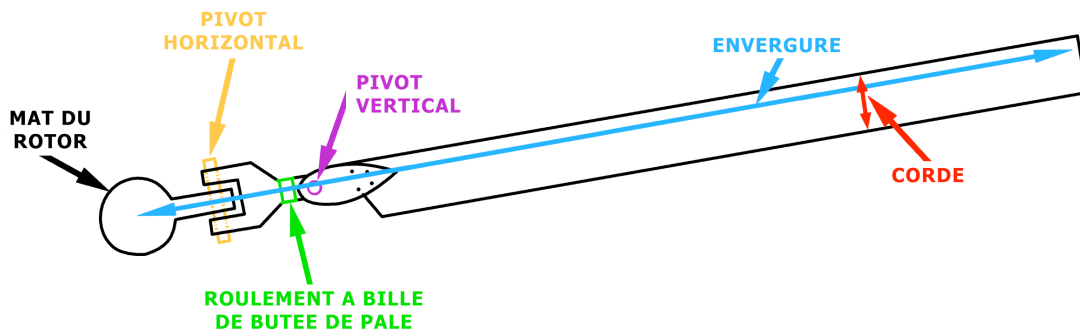
1. L'inertie - Le principe d'inertie se base sur la loi physique selon laquelle un corps, une fois mis en mouvement, garde toutes les valeurs déterminant le mouvement - vitesse relative, direction, etc. - tant que n'intervient aucune autre force le soumettant à d'autres valeurs.
2. Action / Réaction - Pour chaque force appliquée à un objet il existe une force réactive opposée et égale à celle-ci (troisième loi de Newton).

A. Le système : rotor – pales.

I-La structure du rotor

L'hélicoptère vole grâce à une voilure tournante représentée par le système {pales, rotor}. De nos jours cet ensemble est utilisé dans deux configurations différentes, une complètement articulée, et l'autre semi-rigide.

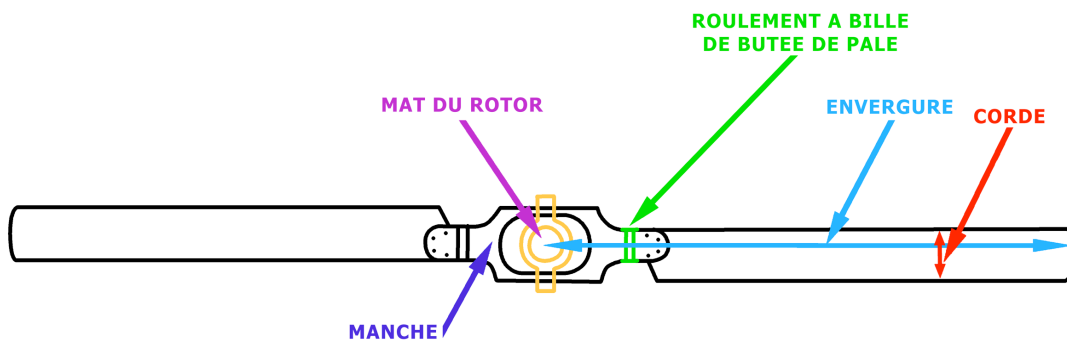
a- Rotor articulé



SCHEMA D'UN ROTOR ARTICULE

Le rotor articulé permet aux pales d'être mobiles dans tous les sens. Ce système, principalement utilisé dans le domaine militaire, confère à l'appareil de meilleures performances et une maniabilité accrue.

b- Rotor semi-rigide



SCHEMA D'UN ROTOR SEMI-RIGIDE

Le rotor semi-rigide n'a pas de charnières verticale ni horizontale. Il vacille grâce à des roulements qui relient le manche au mât du rotor. Ce système est le plus fréquemment utilisé pour les rotors à deux pales.

Légende des deux schémas ci-dessus :

- La **corde** est la largeur d'une pale.
- L'**envergure** est la distance entre le centre de rotation et l'extrémité de la pale.
- Les pales sont reliées au mât du rotor par le **manche**.
- Les **roulements à billes de butée de pale** permettent à la pale de tourner autour d'un axe longitudinal de telle sorte que l'inclinaison de la pale puisse être changée.

c- L'aile : acteur principal du vol

Une aile est une structure dont le but est d'obtenir une réaction lors de son mouvement dans l'air. Le profil d'une aile est étudié afin qu'il réponde à diverses fonctions :

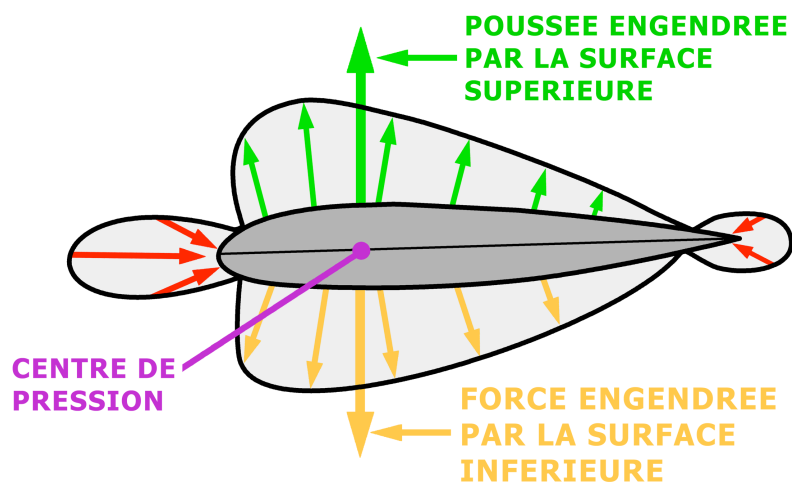
- La portance
- La stabilité dans l'air
- Le contrôle de l'appareil
- La poussée

Un hélicoptère vole, comme tout autre engin volant, grâce aux forces aérodynamiques produites lorsque de l'air traverse les pales et qui lui permettent de rester en l'air. Ainsi l'allure d'une pale est essentielle afin d'assurer le vol d'un hélicoptère. Il existe deux sortes de pales : symétriques et asymétriques.

II- Les différents types de pales

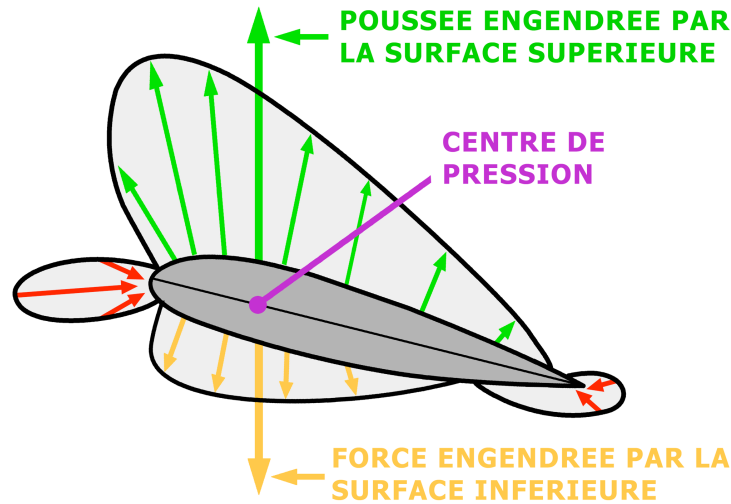
a- Les pales symétriques

Les **pales symétriques** ont des surfaces hautes et basses identiques. Le trajet de l'air autour de la pale reste à peu près constant ce qui assure le meilleur ratio poussée/trainée. Un autre avantage est le coût réduit. Mais ce type de pale ne peut produire autant de poussée qu'une pale asymétrique, et elle peut provoquer des décrochages, effet indésirable en aéronautique.



PALE SYMETRIQUE LORS D'UNE POUSSEE NULLE

Les vecteurs mis en jeu s'opposent et s'annulent.

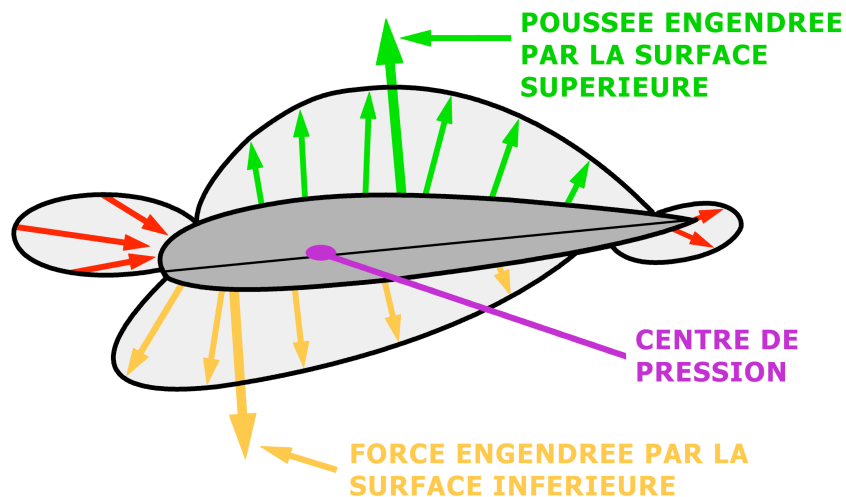


PALE SYMETRIQUE LORS D'UNE POUSSEE POSITIVE

L'angle d'attaque est l'angle formé entre l'horizontale et le segment reliant les deux extrmités de l'aile. Lorsqu'il augmente pour créer une poussée positive, le centre de pression ne bouge que très légèrement, les vecteurs mis en jeu restent opposés et aucune force de torsion n'est exercée.

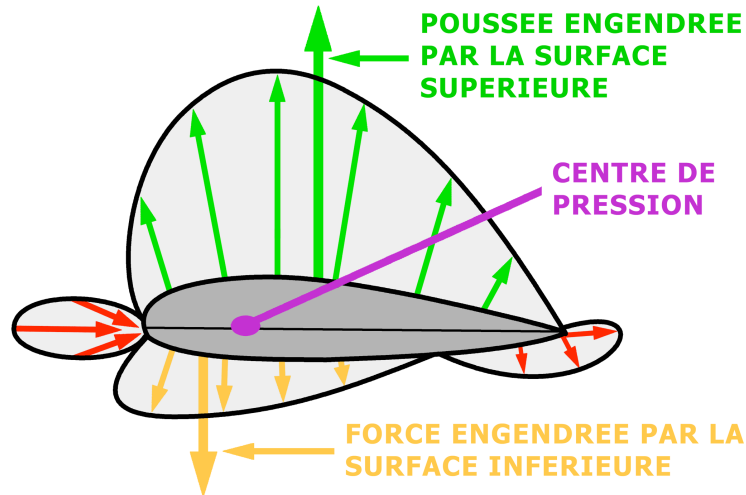
b- Pales asymétriques

Les **pales asymétriques** peuvent avoir une surface haute très différente de la surface basse. Ces pales récentes n'ont aucun problème de décrochage et leur ratio poussée/trainée est bon. Ces pales sont fabriquées dans des matériaux très résistants pour supporter les pressions élevées subies en vol, supérieures à celles subies par les pales symétriques.



PALE ASYMETRIQUE LORS D'UNE POUSSEE NULLE

Les pressions exercées sur la surface supérieure ont tendance à lever l'appareil. Au contraire, sur la surface inférieure la pression s'oppose au mouvement de montée. La poussée globale qui est concentrée au centre de pression est la différence entre les forces engendrées par les différentes pressions.



PALE ASYMETRIQUE LORS D'UNE POUSSEE NULLE

Lorsque l'angle d'attaque augmente, la force mise en jeu sur la surface supérieure augmente. Cela provoque une poussée positive. De plus, le centre de pression se déplace, les vecteurs des forces mises en jeu n'étant plus opposés. Cela provoque une force de torsion située au centre de pression, d'où la nécessité d'utiliser des matériaux résistants.

B. Les phénomènes permettant le vol de l'hélicoptère.

I- Le vent relatif

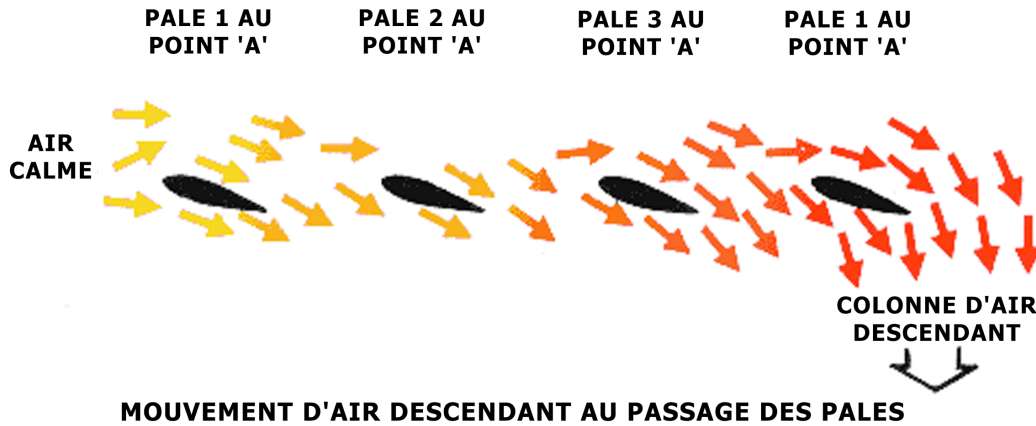
a- La notion de vent relatif

La notion **vent relatif** est essentielle pour comprendre l'aérodynamique de systèmes à rotor car le vent a une influence sur la poussée créée par la pale.

Le vent relatif est formé par le mouvement d'une pale au travers de l'air. Par exemple, considérons une personne dans une automobile roulant un jour sans vent. La personne tend sa main par la fenêtre. Si la vitesse de la voiture est nulle, aucun flux d'air ne sera créé autour de sa main. Au contraire, si la voiture avance à une vitesse élevée, l'air circulant au dessus et en dessous de la main sera à l'origine d'un vent relatif sur la main. Ce mouvement d'air se déplace dans le sens opposé de la main et sa vitesse est celle de la main.

b- Le flux induit

Lorsqu'un hélicoptère est en stationnaire, un vent relatif est créé par la rotation des pales. Le mouvement des pales étant horizontal, le flux d'air sera dirigé vers le bas. Les pales se déplacent en suivant une trajectoire constante et passent par des points déjà rencontrés par les pales précédentes.

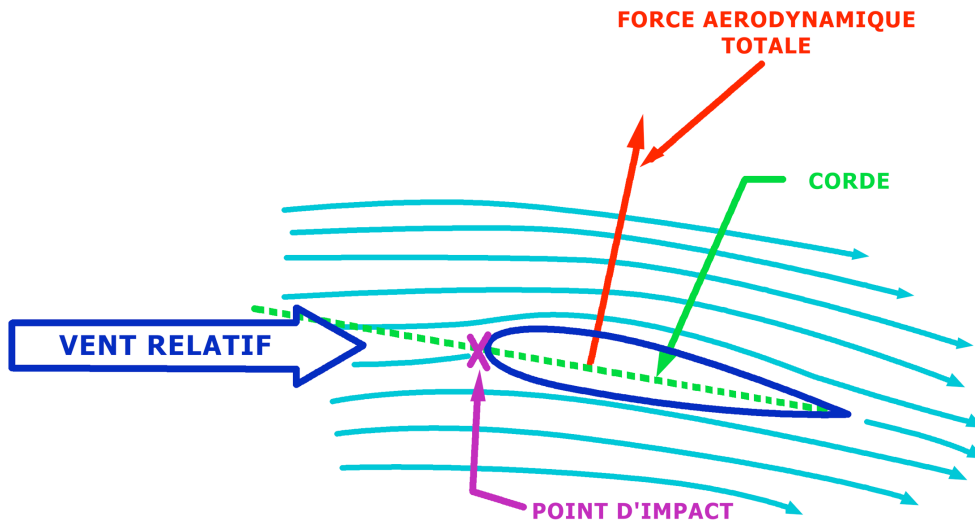


Le courant d'air descendant ainsi créé s'appelle le flux induit. Il est le plus important lors de vols stationnaires; il varie beaucoup en fonction de la vitesse de déplacement et des conditions climatiques. L'angle d'attaque de la pale dans l'air est influencé par le flux induit, provoquant une poussée moindre.

II- La force aérodynamique totale

a- La circulation de l'air autour d'une pale

La **force aérodynamique totale** résulte du flux d'air circulant sur et sous la pale. L'endroit où se divise le flux d'air en deux est appelé le point d'impact :



FLUX D'AIR AUTOUR D'UNE AILE

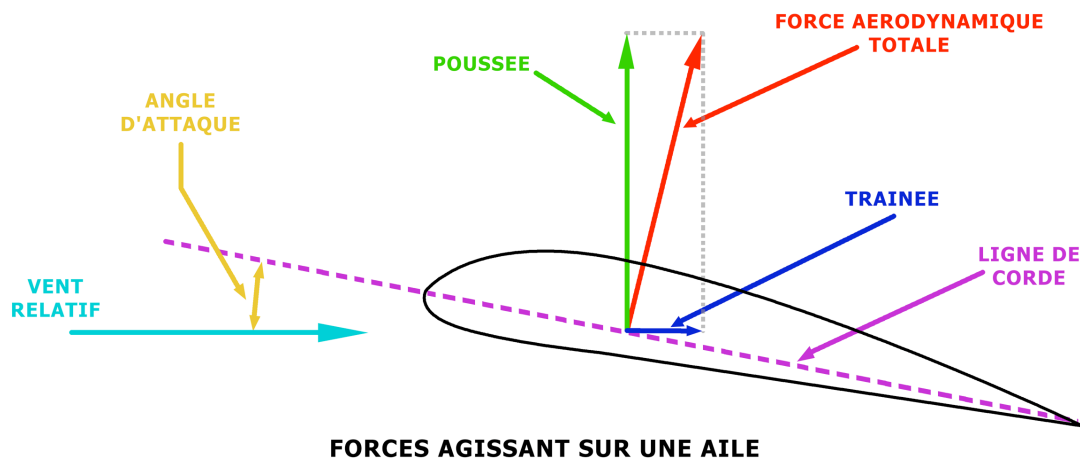
Le schéma ci-dessus illustre la circulation de l'air autour d'une aile. A l'extrémité de la pale le flux d'air est dévié vers le bas. Or, d'après la troisième loi de Newton, toute action provoque une réaction égale et opposée. Ainsi une force égale et opposée agit sur l'aile et s'ajoute à la force aérodynamique.

Cette force est créée par l'air circulant au dessus de l'aile. D'après le principe de Bernoulli, la forme de l'aile provoque une zone de basse pression sur la surface supérieure. Cette baisse de pression engendre une force dirigée vers le haut. De plus, la différence de pression entre les surfaces supérieure et inférieure, bien qu'elle soit

très faible (de l'ordre de un pour cent), ajoute une force montante non négligeable étant donnée la surface d'une pale. Ainsi la surface de la pale joue également un rôle important.

b- Définition de la force aérodynamique totale

La force aérodynamique totale (aussi appelée force résultante) qui est la somme des forces décrites précédemment, peut être divisée en deux : la trainée et la poussée. La poussée agit dans une direction perpendiculaire au vent relatif, et la trainée est une force résistante qui s'oppose au mouvement de l'aile dans l'air. La trainée est parallèle à la direction du vent relatif.



c- Autres facteurs agissant sur la poussée

De nombreux facteurs contribuent à la poussée de l'hélicoptère. Une augmentation de vitesse entraîne une poussée plus importante car la différence de pression produite entre les surfaces supérieure et inférieure augmente. La poussée n'évolue pas de manière proportionnelle à la vitesse. Ainsi, une pale tournant à 900 km/h produit 4 fois plus de poussée qu'une pale tournant à 450 km/h.

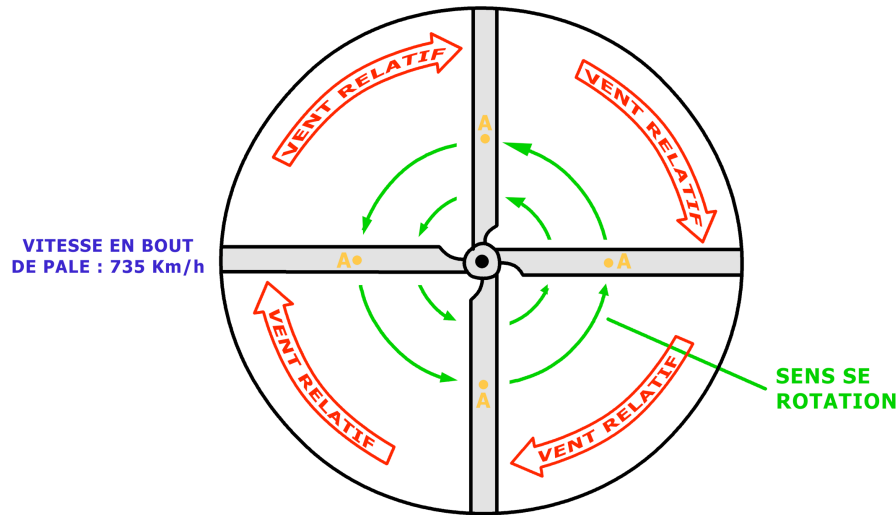
Plus l'angle d'attaque est important, plus la poussée est importante jusqu'au décrochage (lorsque l'angle devient trop important, la portance étant réduite, l'hélicoptère peut ne plus être tenu en l'air).

La forme et la surface d'une pale sont donc deux facteurs essentiels qui détermineront la poussée et la trainée produites. Tout changement de conception de ces éléments aura une conséquence directe sur le vol de l'appareil. De plus, l'augmentation de poussée provoque généralement une augmentation de trainée. D'où l'intérêt de concevoir une pale ayant le meilleur rapport poussée / trainée.

III- La vitesse des pales

a- La variation de la poussée

Lors d'un stationnaire, un courant d'air est créé au dessus des pales. Le schéma ci-dessous représente un hélicoptère classique à deux pales :



VITESSE DES PALES EN STATIONNAIRE

La vitesse des pales près du mat de rotor est moins grande que celle au bout car la distance parcourue est inférieure. La vitesse de la pale varie énormément selon le rayon parcouru. Or la montée varie selon le carré de la vitesse. Ce qui suppose qu'au point A (au milieu de la pale), la montée vaut seulement le quart de la montée à l'extrémité de la pale.

b- Les pales vrillées

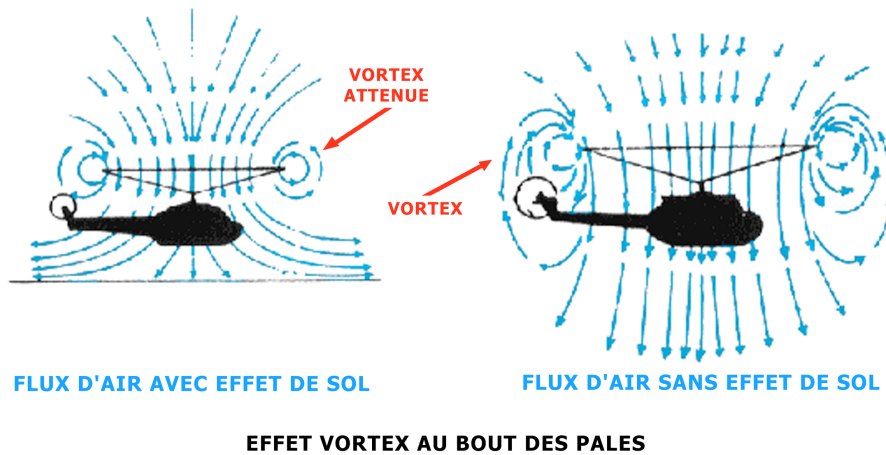
C'est pour cette raison que les pales sont conçues vrillées. L'angle d'attaque qui influence la montée sera supérieur au niveau du rotor par rapport à l'extrémité de la pale. Cette conception permet de répartir au mieux la force de poussée le long de la pale.

IV- L'effet de sol

a- Définition de l'effet de sol

L'effet de sol sur l'hélicoptère améliore les conditions de vol. C'est le cas lorsque l'hélicoptère vole à une altitude inférieure ou égale à l'envergure du rotor. Cet effet est la conséquence de l'interférence entre la terre et le flux d'air circulant au travers des pales. L'effet de sol augmente lorsque l'hélicoptère se rapproche du sol. Le flux d'air induit perd de la vitesse et de l'amplitude car, étant dirigé vers le bas, il est arrêté prématurément par le sol. Cela réduit donc la trainée induite, et la poussée verticale en sortira plus grande. Ainsi, pour tenir un stationnaire à basse altitude, l'angle d'attaque des pales et la puissance fournie au rotor peuvent être réduits.

Lorsqu'un hélicoptère subit l'effet de sol, le chemin parcouru par les courants d'air limite la création de vortex (tourbillons d'air). Cela permet aux pales d'être plus efficaces et cela réduit les turbulences générales autour de l'appareil.



b- L'influence de la nature du sol

La nature du sol joue également sur l'effet de sol. Si l'hélicoptère vole au-dessus d'herbes hautes, de terre ou d'eau, il sera diminué. Au-dessus d'une surface plane et dense, il atteindra son maximum.

V- La force centrifuge

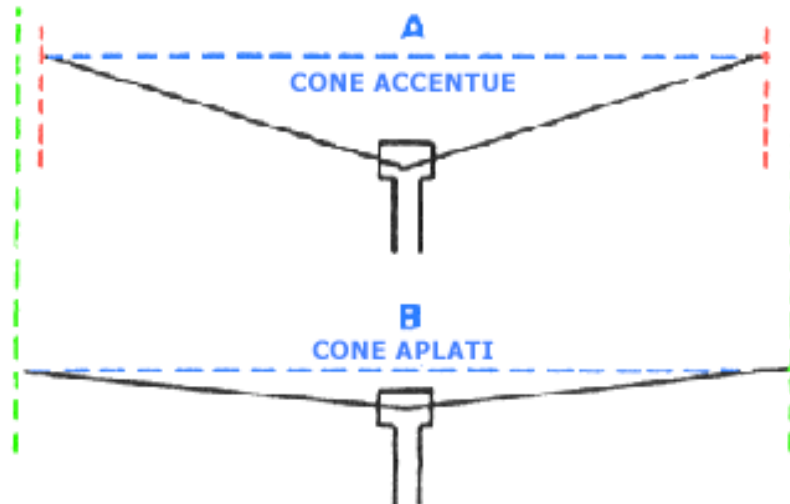
La **force centrifuge** dans l'hélicoptère est créée par la rotation et la masse des éléments du rotor principal. Cette grande force a tendance à éloigner les éléments de leur centre de rotation. Elle a une charge de l'ordre de 6 à 12 tonnes à la base de chaque pale pour des hélicoptères de 2 à 4 passagers et peut atteindre 40 tonnes pour de plus gros hélicoptères.

Lorsqu'un hélicoptère est au sol, ses pales s'affaissent à cause de leur poids et de leur envergure. Lorsque le rotor commence à tourner, les pales se soulèvent grâce à la force centrifuge. A vitesse de croisière, elles sont complètement déployées même si l'appareil ne décolle pas encore ou que l'angle d'attaque est encore nul.

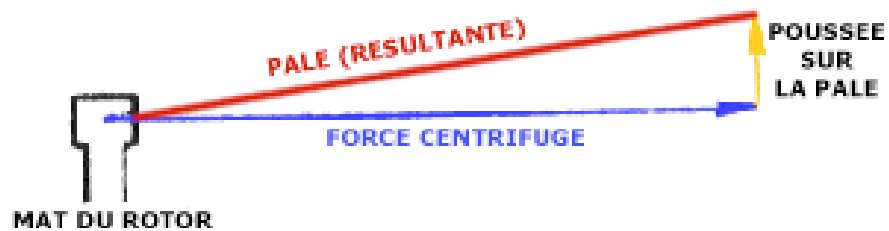
C. Les effets néfastes sur le vol de l'hélicoptère

I- L'effet de cône

Lorsque l'hélicoptère décolle ou vole, les pales dépassent leur état horizontal et forment un cône. Cet **effet de cône** dépend de la vitesse de rotation des pales, du poids de l'appareil et de la force de gravité. En supposant le poids et la gravité constants, moins les pales tournent vite, plus l'effet de cône est important. Un effet de cône excessif engendre un effort anormal sur les pales et une mauvaise poussée à cause de la réduction du disque balayé par les pales.



**DIMINUTION DE LA SURFACE
DU DISQUE BALAYE PAR LES PALES**



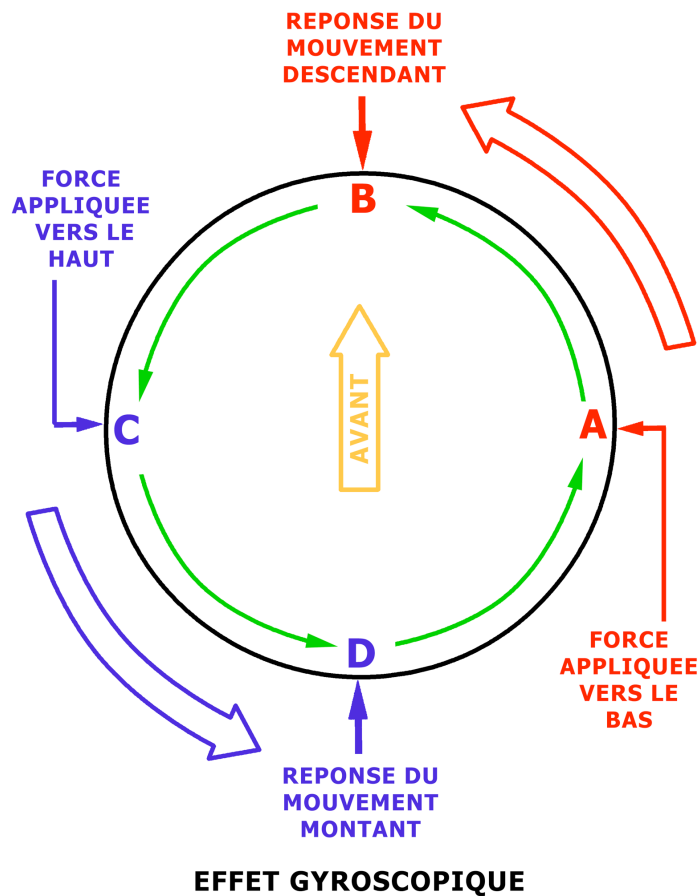
**FORCE CENTRIFUGE, POUSSEE
ET RESULTANTE**

II- L'effet gyroscopique

a- Notion d'effet gyroscopique

L'effet gyroscopique est un phénomène que l'on peut remarquer dans tout objet en rotation. Cet effet, provoqué par une force, produit lui-même une force de même direction, qui se manifeste après une rotation de 90°.

b- Explication illustrée



Une force appliquée en A vers le bas engendre un effet sur le disque au point B. De même pour une force appliquée en C qui prendra effet en D.

Ainsi pendant des manoeuvres, le comportement de l'hélicoptère est constamment influencé par le vent extérieur et le mouvement des pales.

Lorsque l'hélicoptère vire à gauche, le pilote est obligé de corriger la tendance qu' a le nez à piquer. La portance des pales est amoindrie, l'angle d'attaque étant changé pour permettre le mouvement vers la gauche et la gravité a alors plus d'effet sur l'appareil. A droite, au contraire, le nez a tendance à monter. Le pilote doit donc contrôler l'hélicoptère différemment en fonction de la direction qu'il veut prendre.

III- La traînée

La traînée est la force qui s'oppose au mouvement d'un hélicoptère dans l'air. Néanmoins, cette force est caractérisées par différentes composantes :

a- La traînée totale

La traînée totale est le résultat de la somme entre la traînée du profil, la traînée induite et la traînée parasite. Cette force est fonction de la vitesse des pales. Le courant d'air qui produit le moins de traînée totale détermine le meilleur taux de montée, le temps de descente minimum et une vitesse de croisière maximum.

b- La traînée du profil

La trainée du profil est créée par le frottement des pales au contact de l'air. Cette trainée varie peu lors du changement d'angle d'attaque, mais elle a tendance à augmenter modérément avec la vitesse.

c- La trainée induite

La trainée induite est consécutive à la montée de l'appareil. Elle augmente avec l'angle d'attaque. C'est la principale trainée qui s'oppose au mouvement de l'hélicoptère lorsque l'on décompose la force aérodynamique totale.

d- La trainée parasite

La trainée parasite est provoquée par les parties non aérodynamiques comme par exemple le cockpit, les trains d'atterrissage, la queue etc. Cette trainée augmente avec la vitesse.

IV- Le moment de torsion

a- Conséquence sur le fuselage

En vol, le fuselage de l'hélicoptère tend à tourner dans le sens opposé des pales. Cet effet, qui confirme la loi de Newton sur l'action et la réaction, est appelé **moment de torsion**. Cette torsion n'a aucun effet sur les hélicoptères à 2 rotors principaux car ils tournent dans des sens opposés et l'effet s'annule. Par contre, cela pose un problème qu'il faut régler sur les hélicoptères à rotor principal unique. Le moment de torsion étant lié à la puissance fournie par le moteur, tout changement de l'un implique une variation de l'autre.

b- Le rotor d'anti-couple

Pour contrer cet effet sur les hélicoptères à rotor principal unique, un rotor d'anti-couple a été placé au bout de la queue de l'appareil. On l'appelle aussi rotor de queue. Il a une vitesse proportionnelle au rotor principal et est entraîné par ce dernier. Néanmoins, le pilote peut aussi jouer sur le rotor de queue (à l'aide de pédales) car le moment de torsion peut varier selon les forces extérieures appliquées sur l'hélicoptère pendant des manoeuvres. Il est aussi utilisé pour changer volontairement le sens et la direction du nez de l'engin. Ainsi, cinq à trente pour cent de la puissance moteur est utilisée pour faire tourner le rotor de queue.

L'inconvénient du rotor de queue est qu'il a tendance à faire dévier l'hélicoptère vers la droite (sens conventionnel). Pour contrecarrer cet effet, le pilote oriente très légèrement le rotor principal vers la gauche.

L'étude des différents phénomènes énoncés précédemment fut longue et fastidieuse. C'est en 1907 qu'un français vola pour la première fois en hélicoptère à deux rotors principaux animés par des courroies en cuir. Puis ce n'est qu'au début des années quarante que son utilisation se généralisa : sa durée de vol était alors d'environ une heure et trente minutes.

Aujourd'hui on assiste à des développements surprenants tels que l'hélicoptère sans rotor de queue. L'effet d'anti-couple est produit par de l'air comprimé à l'aide de la turbine dans la queue. Il est ensuite éjecté latéralement et régulé à l'aide de valves.

Il se produit aussi une évolution du dessin des pales, optimisant la pénétration dans l'air tout en réduisant les turbulences produites en bout de pale (vortex), améliorant le rapport poussée / traînée.

L'évolution de l'hélicoptère vers l'avion à rotors inclinables, qui décolle comme un hélicoptère et vole comme un avion, entraîne une redéfinition de l'hélicoptère, car il allie les avantages des deux concepts, à savoir la vitesse et la maniabilité.

REFERENCES

Bibliographie :

- Army Field Manual FM 1-203, Fundamentals Of Flight, 9 September 1983
- « Comment volent les hélicoptères » par Eric Bruttini
aux éditions : Société des écrivains
- Encyclopédie Grolier 1996

Internet :

www.helicoptere.net
www.pilotlist.org/helico
www.rotor.com
www.soton.ac.uk/~thunder/education/helicopter/helicopter.htm
eurekaweb.free.fr/th1-helicoptere.htm
www.eurocopter.com

Nous tenons à remercier M. Doceul, Mme de Narbonne, ainsi que M. Delannoy pour son aide et ses explications.