LES PISTONS TAPENT, LE REDUCTEUR TREPASSE

ENTRE LE MARTEAU ET L'ENCLUME, UNE PETITE DENT DE REDUCTEUR.

COMMENT PRENDRE SOIN DES DENTS DE SON REDUCTEUR :

INFLUENCE DE L'INERTIE HELICE.

Jérémie BUIATTI
Concepteur des hélices E-PROPS

(@Sébastien EXTIER)

LES PISTONS TAPENT, LE REDUCTEUR TREPASSE.

ENTRE LE MARTEAU ET L'ENCLUME, UNE PETITE DENT DE REDUCTEUR.

COMMENT PRENDRE SOIN DES DENTS DE SON REDUCTEUR : INFLUENCE DE L'INERTIE HELICE.

1. POURQUOI UN REDUCTEUR ?

Sur un moteur en prise directe (Figure 1), il n'y a pas de réducteur :-)
De par son absence, le réducteur ne pose pas de problèmes, ne pèse rien et ne coûte rien...

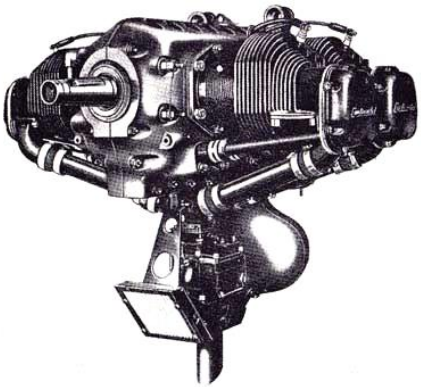


Figure 1 : Moteur Continental A65
(@Continental)

Mais en général, sur ce type de moteurs, l'hélice tourne trop vite et/ou le moteur trop lentement.

- soit le moteur est lent (env. 2600 t/min) : grosse cylindrée, masse importante, moteur bruyant.
- soit le moteur est plus rapide (3300 voire 3600 t/min), mais dans ce cas le diamètre hélice est limité[1], donc son rendement est médiocre, surtout au décollage ; de plus elle est bruyante.

Sur un moteur avec réducteur, l'adaptation du régime moteur et du régime hélice sont possibles séparément. On peut obtenir un meilleur rendement moteur et hélice principalement au décollage ce qui permet de réduire fortement la distance de décollage tout en limitant le bruit.

Mais la mise au point d'un réducteur est complexe… principalement à cause des ondulations du couple moteur (Figure 3), causées par les accélérations des pistons et bielles, ainsi que par les différences de pression entre les faces des pistons.

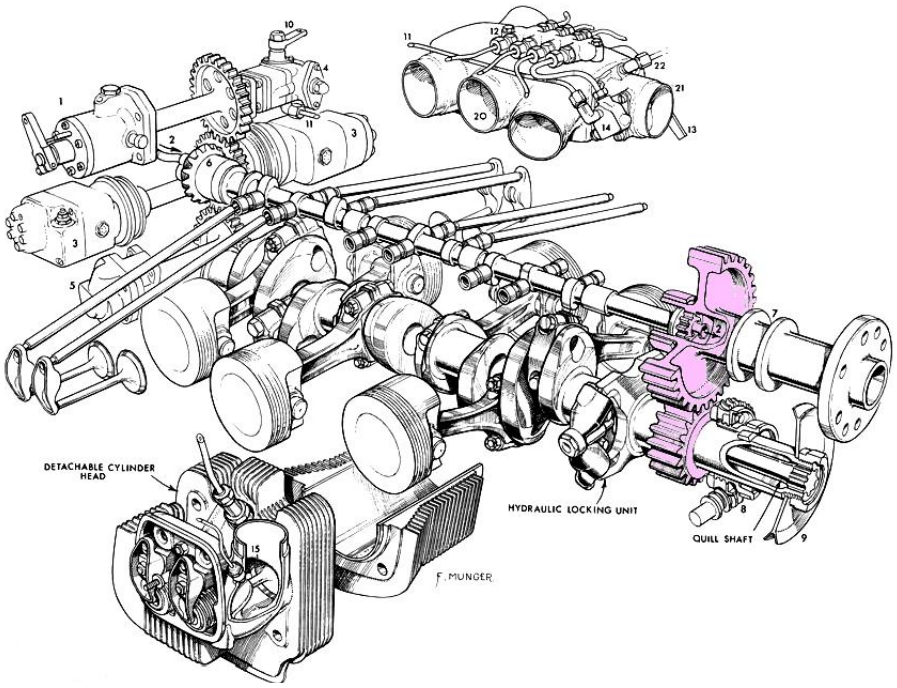


Figure 2 : Réducteur à engrenages sur moteur Continental Tiara
(@Flight)

[1] Afin de ne pas dépasser la vitesse du son en bout de pale. Rappel V= ω.R < 340 m/s avec ω : vitesse de rotation (Rad/s) et R : rayon de la pale [m].

2. Problématique de l'adaptation helice/réducteur

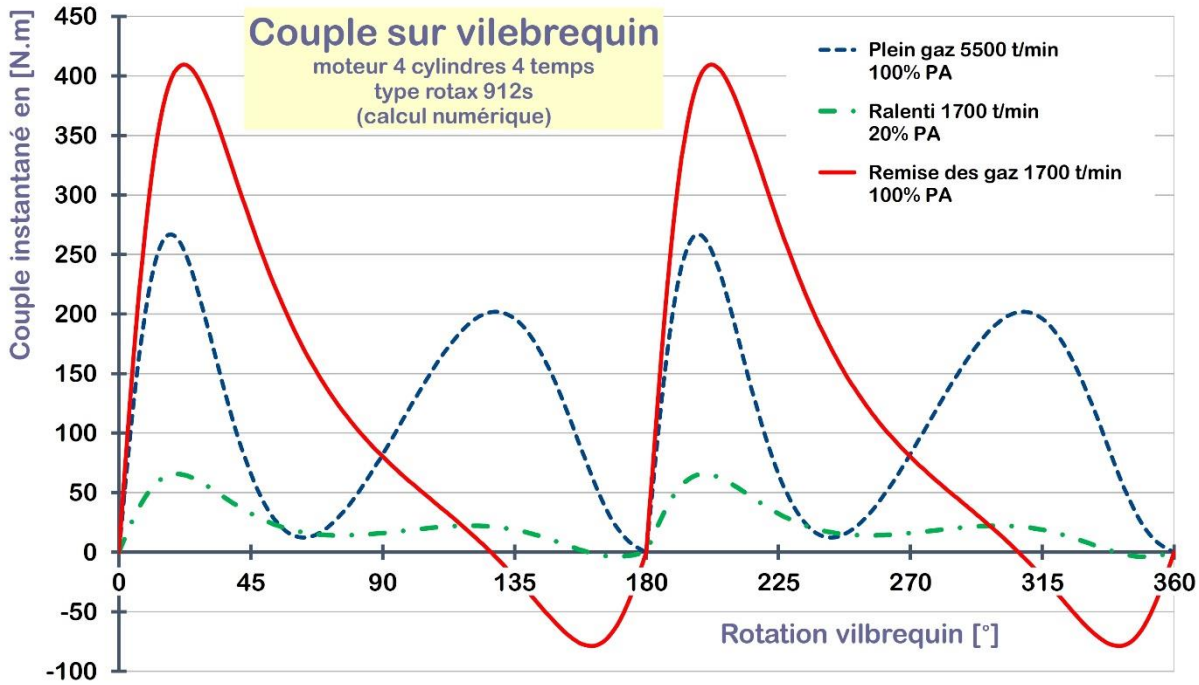


Figure 3 : Ondulations de couple sur le vilebrequin d'un moteur 4 cylindres, 4 temps. (Rotax 912s, réducteur 2,43). Afin de réduire les risques d'erreur, toutes les vitesses de rotation et les couples sont exprimés coté vilebrequin.

Le couple moteur est loin d'être constant (Figure 3). Le couple aérodynamique de l'hélice, quant à lui, reste constant[2] pour un régime donné (Figure 4).

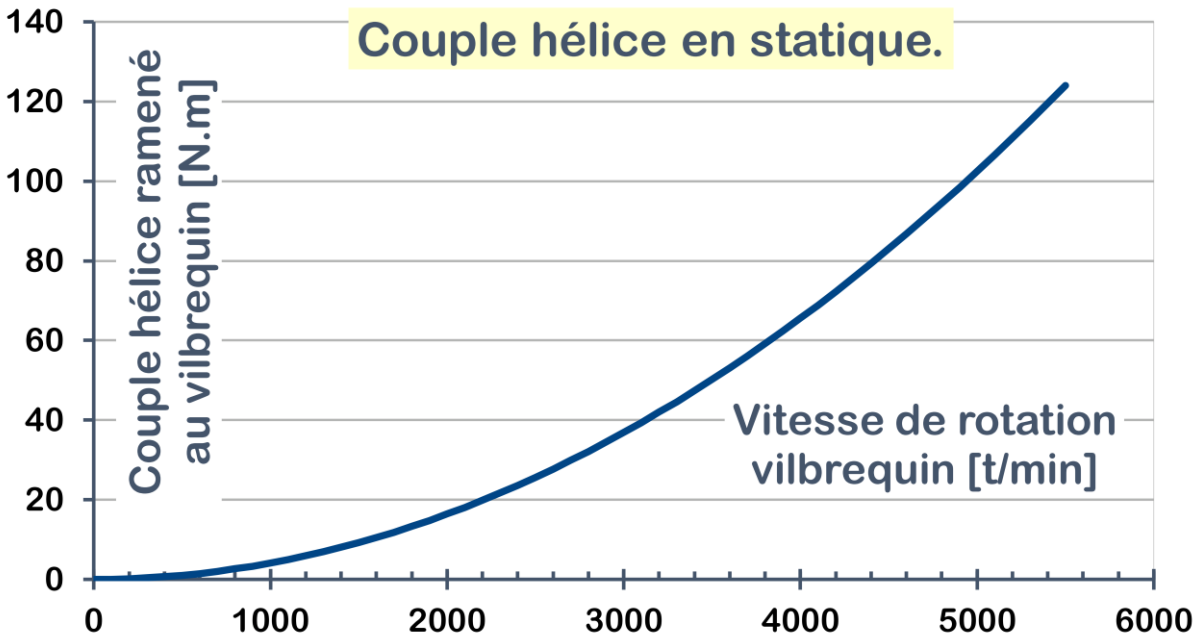


Figure 4 : Couple hélice en f° du régime.

[2] Du moins quand l'incidence de l'axe hélice est nulle.

C'est donc l'inertie des pièces en rotation (vilebrequin, volant moteur, réducteur et hélice) qui absorbe les ondulations du couple moteur, et fournit le couple pendant les phases non motrices (accélération des pistons, compression des gaz).

Petit rappel, lorsqu'une masse subit une force il y a accélération en translation: A = F / m. Lorsque qu'un arbre subit un couple, il y a accélération en rotation et cette dernière est donnée par :

Tableau 1 : Accélération d'un solide de moment d'inertie Igx sous l'effet d'un couple C.

$$\ddot{\theta} = \frac{C}{I_{gx}}$$

Vitesse de rotation	$\ddot{\theta}$:	[Rad/s]
Couple moteur	**C :**	[N/m]
Moment d'inertie autour de l'axe de rotation x	$\mathbf{I_{gx}}$ **:**	[kg.m²]

Le moment d'inertie est à la rotation ce que la masse est à la translation. Il représente la manière dont la masse est répartie autour de l'axe de rotation (gx) et traduit la « *flemme* » qu'aurait un arbre à accélérer ou ralentir en rotation. Le moment d'inertie (I_{gx}) est homogène au produit d'une masse par la distance à l'axe au carré [kg.m²]. L'annexe en fin d'article donne une méthode de détermination expérimentale de ce moment d'inertie autour d'un axe.

Les variations de couple se traduisent par des variations d'accélération et donc par des variations de vitesse. Pendant chaque cycle moteur, il y a accélération et décélération des pièces mobiles.

2.1 INFLUENCE DES VARIATIONS DE VITESSE :

Dans le cas des réducteurs utilisant des solutions de réductions par obstacle (courroie crantée, engrenage, chaîne) : la réalisation pratique de tels réducteurs comporte souvent la présence d'un jeu fonctionnel[3].
Si le couple reste positif (l'énergie allant du moteur vers l'hélice), les dents restent "en prise" et le jeu n'a aucun effet sur le fonctionnement du système.
Si le couple s'inverse (l'hélice fournit de l'énergie au moteur), la transmission de couple se fait par l'autre face des dents.

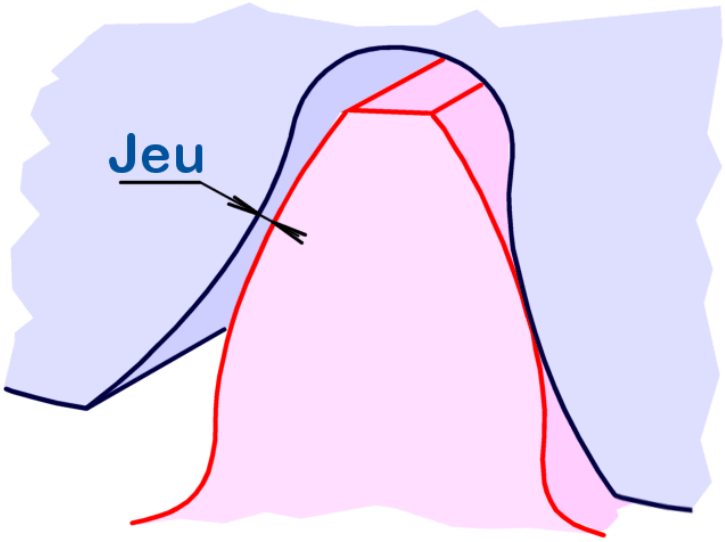


Figure 5 : Jeu de fonctionnement

[3] Plage d'angle sans contact et donc sans transmission de couple entre le moteur et l'hélice. On rappelle également que « *le Jeu est l'âme de la mécanique* » !

Mais dans le cas où le couple passe de positif à négatif à chaque cycle moteur, le temps de parcourir le jeu, les vitesses de rotation ne sont plus liées. Il peut donc s'installer une différence de vitesse.
Cette différence de vitesse de rotation entre l'hélice et le vilebrequin devra être absorbée lors du contact des dents (a priori par choc et déformation élastique des composants et notamment des dents). On appellera ce mode de fonctionnement : *fonctionnement avec jeu*.
Le fonctionnement du système dans ce mode engendre des chocs - et donc probablement des désagréments (vieillissement, rupture, etc). Et en cas de résonance (masse-ressort), les désagréments vont se manifester rapidement et violemment.

2.2 COMMENT RÉDUIRE LE RISQUE DE FONCTIONNEMENT AVEC JEU :

La condition est que le couple transmis du moteur à l'hélice ne doit pas changer de sens à chaque cycle moteur. En mode moteur, cela impose que **la roue dentée liée à l'hélice soit toujours capable de ralentir plus fort que celle liée au vilebrequin**.
Autrement dit : pour que la dent du réducteur reste en prise, le couple aérodynamique doit pouvoir ralentir l'hélice plus fortement que le couple de compression ne ralentit le vilebrequin.
En mode « frein moteur » (descente gaz réduit), cela impose que la roue dentée liée à l'hélice soit toujours capable d'accélérer plus fort que celle liée au vilebrequin.

A priori la puissance est réduite en mode 'frein moteur', aussi on mettra de côté ce mode de fonctionnement. Mais le concepteur d'un réducteur se devra de réfléchir aussi au cas «à priori non dimensionnant» car il est bien connu que le diable se cache dans les détails...

Le couple aérodynamique est considéré comme égal au couple moyen (régime constant).

La décélération maximale de l'hélice est donnée par :	$\ddot{\theta}_{\text{hélice}} = R^2 \cdot \frac{C_{\text{hélice}}}{I_{gx_{\text{hélice}}}}$	
La décélération du vilebrequin est donnée par :	$\ddot{\theta}_{\text{vilo}} = \frac{C_{\text{neg}}}{I_{gx_{\text{moteur}}}}$	
Rapport de transmission R = $\omega_{\text{moteur}}/\omega_{\text{hélice}}$	**R**	[-]
Couple négatif du moteur	C_{neg} :	[N/m]
Couple hélice ramené au vilebrequin	$C_{\text{hélice}}$:	[N/m]
Condition de fonctionnement sans jeu :	$\ddot{\theta}_{\text{hélice}} \geq \ddot{\theta}_{\text{vilo}}$	

Vitesses, accélérations et couples sont exprimés côté vilebrequin.

Après avoir bien secoué l'équation la condition devient :

$$I_{\text{hélice}} \leq R^2 \cdot \frac{C_{\text{hélice}}}{C_{\text{neg}}} \cdot I_{gx_{\text{moteur}}}$$

Application numérique pour notre moteur Rotax 912s, rapport de transmission 2.43 :

Sur le graphe (Figure 3), on peut voir que le pire cas de couple négatif est la remise des gaz (passage de plein ralenti à plein gaz quasi instantané).

Dans ce cas (1700 t/min et 100% d'admission) le couple atteint une valeur négative de 80 N.m.

A cette vitesse, le couple aérodynamique hélice $C_{hélice}$ est de l'ordre de 12 N.m.

Rapport de transmission moteur/hélice	$R = \omega_{mot}/\omega_{hélice}$	2.43	[-]
Couple négatif du moteur	C_{neg} :	80	[N/m]
Couple hélice ramené au vilebrequin	$C_{hélice}$:	12	[N/m]
Condition de fonctionnement sans jeu :	$I_{hélice} \leq R^2 \cdot \frac{C_{hélice}}{C_{neg}} \cdot I_{gx_{moteur}}$		

Notre équation devient: $I_{hélice} < I_{moteur} \times 2{,}43^2 \times (12 / 80)$ => $I_{hélice} < I_{moteur} \times 0{,}9$

Le constructeur Rotax spécifie : $I_{hélice\ maximum}$ = 0,6 kg.m²

=> I_{moteur} devrait donc être supérieur à 0,6 / 0,9 = 0,68 kg.m²

Soit le moment d'inertie d'un disque de 136 kg et 20 cm de diamètre. Comme c'est juste le double de la masse totale du moteur, dans ces conditions la remise des gaz instantanée causera un fonctionnement avec jeu. En supposant le moment d'inertie du vilebrequin de l'ordre de 0,1 kg.m², il faudrait une hélice dont le moment d'inertie ne dépasse pas 0,09 kg.m² pour éviter le fonctionnement avec jeu. Mais les hélices les plus légères pour ce moteur font de l'ordre de 0,25 kg.m². Heureusement le réducteur du Rotax 912 est équipé d'un système de crabot permettant d'absorber les pics de couple dans le réducteur.

$C_{hélice} = R.C_{moteur}$ et $\dot{\theta}_{hélice} = \frac{\dot{\theta}_{moteur}}{R}$

Côté hélice $\ddot{\theta}_{hélice} = \frac{C_{hélice}}{I_{gx_{hélice}}}$

le même coté moteur $\ddot{\theta}_{hélice} = R.\frac{R.C_{hélice}}{I_{gx_{hélice}}}$

$\ddot{\theta}_{moteur} = \frac{C_{neg}}{I_{gx_{moteur}}}$

condition: $\ddot{\theta}_{hélice} \geq \ddot{\theta}_{moteur}$ $R^2 \cdot \frac{C_{hélice}}{I_{gx_{hélice}}} \geq \frac{C_{neg}}{I_{gx_{moteur}}}$

$I_{gx_{hélice}} \leq R^2 \cdot \frac{C_{hélice}}{C_{neg}} \cdot I_{gx_{moteur}}$

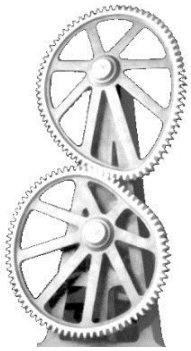
Observation :

En présence de couple négatif, si le couple moyen est très faible ou nul, la condition ne peut être respectée. Sachant qu'à régime constant et sans vitesse de vol, le couple moyen hélice est proportionnel à la vitesse de rotation et peut s'exprimer par : ($k.\omega^2$)

Il existe donc une vitesse de rotation ω minimale en dessous de laquelle il est impossible de satisfaire la condition.

Si ce régime est utilisé, par exemple au ralenti pendant la "chauffe", attention DANGER.

Comment favoriser cette condition de fonctionnement sans jeu pour éviter les problèmes, ou comment ne pas mettre le doigt dans l'engrenage spiroïdale divergent des coups et des coûts ?



- Avoir un moment d'inertie $I_{hélice}$ petit .
- Avoir un moment d'inertie I_{moteur} grand (volant d'inertie moteur, mais c'est lourd).
- Avoir un moment d'inertie I_{moteur} grand (volant d'inertie moteur, mais c'est lourd).
- Avoir un moteur rapide, de façon à ce que le rapport de transmission R soit grand.
- Éviter le fonctionnement à faible Couple Moyen : éviter l'utilisation à faible régime de rotation.
- Réduire les pointes de couple négatif en multipliant le nombre de cylindre : moteur avec plus de cylindres (mais c'est plus cher).
- Utiliser un embrayage, de façon à désolidariser l'hélice au faible régime (embrayage centrifuge.

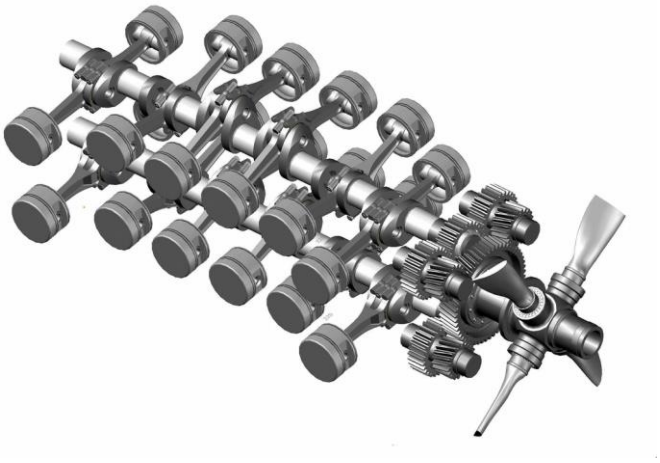


Figure 6 : Multiplier les cylindres pour réduire l'ondulation de couple.

2.3 COMMENT GÉNÉRER DES PROBLÈMES (POUR DIVERTIR LES INVESTISSEURS OU ÉVITER L'ENNUI) :

Rappel optimiste: un système fonctionne tant qu'il n'a aucune raison de défaillir.

- Faire un réducteur de faible ratio, par exemple pour réducter un moteur lent (diesel, R < 1.8)
- Réducter un moteur monocylindre ou bicylindre (plusieurs bicylindres en V réductés en cours de développement, à suivre avec intérêt ...).
- Alléger les pièces tournantes du moteur (et donc réduire l'inertie du moteur).
- Choisir une hélice lourde, avec un fort moment d'inertie (et non, cela ne tournera pas « plus rond »!).
- Laisser tourner le moteur à très faible régime au sol.
- Avoir de gros déséquilibre de charge entre cylindres au ralenti (équilibrage carburateur, problème d'allumage…).

Il n'est pas toujours possible d'éviter le fonctionnement avec jeu sur toute la plage d'utilisation. Comment réduire les conséquences ?

- Limiteur de couple (attention : friction = usure et chauffe).
- Élément souple entre le vilebrequin et le réducteur genre flector (attention : vieillissement et chauffe).

Figure 7 : une grande hélice !!
(@ Musée de l'air)

- volant d'inertie de grand diamètre (sans usure, sans échauffement, peut-être pas plus lourd qu'un système complexe aux défaillances probables).

Solution exotique :

- Monter une hélice pas variable avec un système de commande synchronisé aux cycles moteur, de façon à générer un couple hélice variable adapté (idée pour investisseur fortuné uniquement) !
- Utiliser une hélice avec articulation de traînée des pales, ce qui revient à utiliser la force centrifuge pour stocker l'énergie. Dans ce cas, prévoir divers problèmes de résonance sur toute la plage de régimes.

A noter : Dans le cas des courroies crantées, il reste une petite capacité de transmission par frottement pendant le franchissement du jeu, ce qui réduit les risques par dissipation d'énergie en cas de résonance.

2.4 QU'EN EST-IL DES TRANSMISSIONS PAR FROTTEMENT (COURROIE POLYV, COURROIE TRAPEZOÏDALE) ?

La courroie assure aussi la fonction de limiteur de couple. Le risque de résonance est très faible. En revanche, si la courroie est sous dimensionnée, le glissement peut atteindre des valeurs importantes (mesuré jusqu'à 8% sur monocylindre paramoteur), au détriment de la durée de vie de la courroie. Et on rappellera qu'avec 8% de glissement, l'hélice ne verra au mieux que 92% de la puissance[4])

2.5 ET SANS REDUCTEUR ?

Sans réducteur, a priori le jeu entre l'hélice est le vilebrequin est nul (maintenance de qualité = liaison serrée au couple). Les vitesses de rotation sont donc égales. L'inertie de l'hélice et du moteur se partagent donc les ondulations de couple au prorata de leur valeur.
Le couple instantané entre l'hélice est le moteur devient :

$C_{ondulatoire\ hélice} = C_{ondulatoire\ moteur} \times I_{hélice} / (I_{hélice} + I_{moteur})$

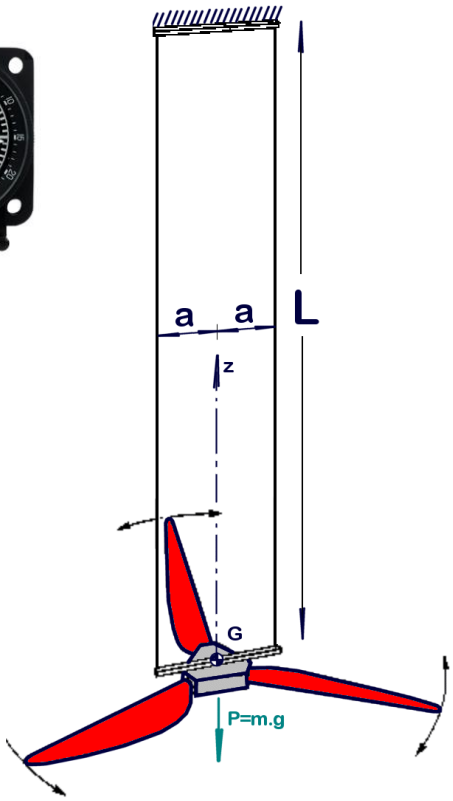
Un faible moment d'inertie hélice réduira les pointes de couple subies par l'hélice et sa jonction avec le moteur. C'est pourquoi les moteurs en prise directe ont un moment d'inertie hélice maximum (0.3 kg.m² pour le Jabiru2200). Par contre, le moment d'inertie total étant plus faible, le régime de ralenti aura tendance à être moins stable, mais il suffit d'augmenter légèrement le régime pour retrouver un fonctionnement régulier.

© Jérémie BUIATTI 2016 **Infographie et mise en page : Matthieu BARREAU**

[4] Les 8% perdus représente environ 1 kw de chauffage !
Mais heureusement que la petite poulie, celle qui chauffe, est solidaire du vilebrequin. Le vilebrequin est refroidi par l'air d'admission (sur moteurs 2 temps). L'échauffement de l'air d'admission réduit la puissance, ce qui réduit le glissement. Ouf !

ANNEXE : DETERMINATION EXPERIMENTALE DU MOMENT D'INERTIE

On mesure aisément le moment d'inertie d'un solide par la méthode du pendule.
Le principe consiste à mesurer la période d'un pendule à axe vertical dont le rappel est assuré par le poids du solide grâce au montage choisi.



Matériel nécessaire :

- Du fil
- Un chronomètre (Breguet, Dodane ou Mathey Tissot type 12 ou autre ☺)
- Une balance dont l'étendue de mesure est compatible avec la masse du solide.

Montage :

On accroche le solide à un pendule constitué de longues lignes de fil (L). L'entraxe (2.a) doit être petit devant la longueur (L) des lignes (L/(2.a)>6).
L'axe Z doit être confondu avec l'axe autour duquel vous voulez connaitre le moment d'inertie.

Mesure :

- Déterminez tout d'abord la **masse** du solide (**m**) par une pesée.
- Suspendez-la ensuite à votre montage et laissez-le se stabiliser. Faire pivoter au maximum d'un quart de tour sur lui-même le solide, et … lâchez tout en déclenchant votre chronomètre.
- Vous allez compter le temps mis par le solide pour effectuer 30 oscillations. Une oscillation sera comptée de la position où vous avez lâché Le solide au retour le plus proche de cette dernière.
- En déduire le temps mis par le solide pour faire une oscillation (on appelle cela la **période T** de l'oscillation). N'hésitez pas à effectuer plusieurs mesures de la période afin de fiabiliser vos données.

Calcul :

On obtient la valeur du moment d'inertie avec la formule suivante : Avec :

$$I_{OZ} = \frac{m \cdot g \cdot T^2 \cdot a^2}{4 \cdot L \cdot \pi^2}$$

I_{oz} :	Moment d'inertie autour de l'axe z	[kg.m²]
m :	Masse du solide	[kg]
g :	Accélération de la pesanteur g=9.81 m/s²	[m/s²]
T :	Période d'oscillation	[s]
a :	Distance à l'axe des points d'accroche	[a]
L :	Longueur des lignes	[m]