

Partie supérieure de la tête rotor.

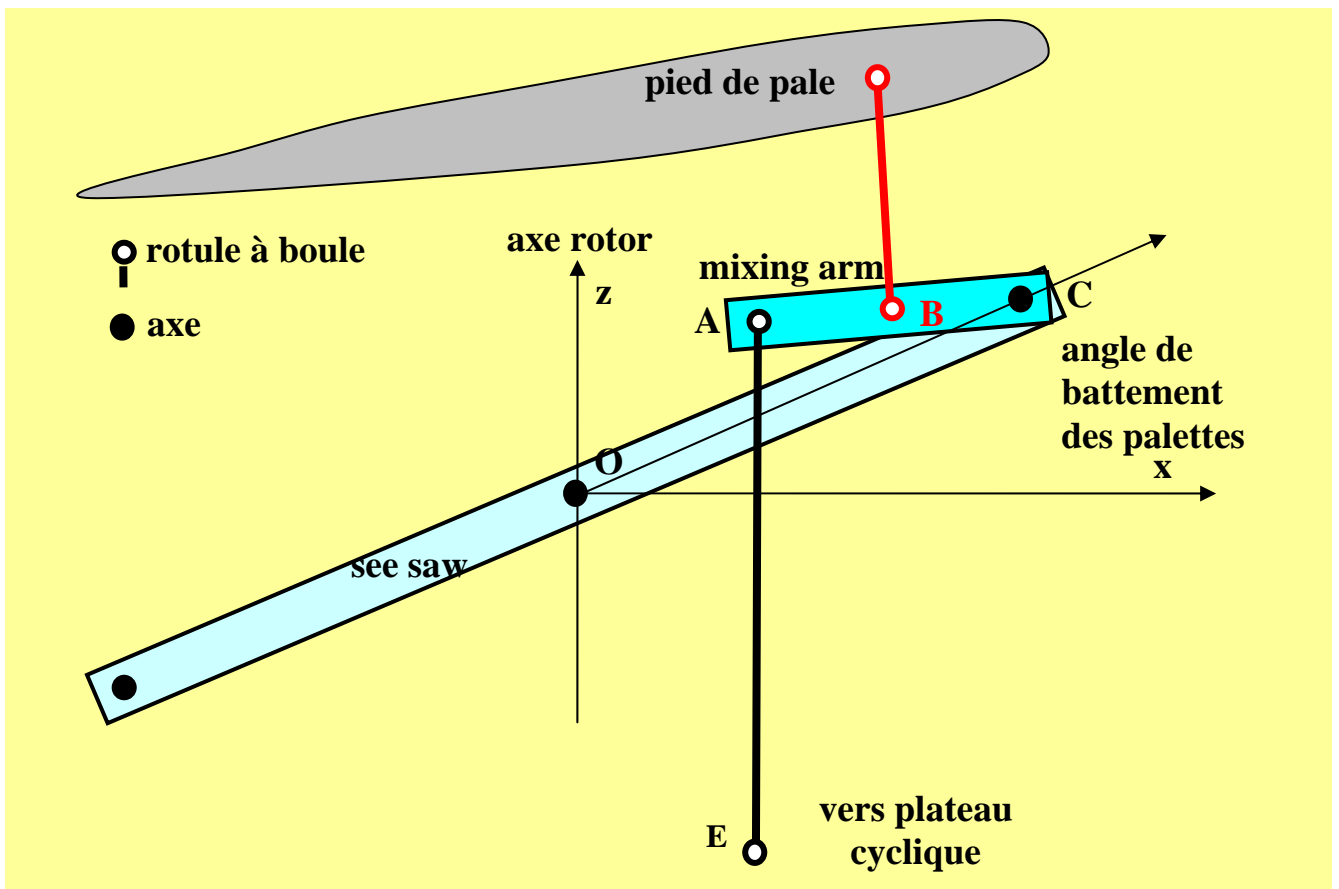


Figure 1

La barre de Bell est dans la direction OC. Elle est parallèle au « see-saw » qu'elle traverse (cas du 3DX500, Lepton) ou au cadre de barre de Bell (HDX500, Trex, etc).

L'angle de battement des palettes est l'angle du see-saw (angle entre la direction horizontale et OC).

L'angle de battement des palettes est égal à l'angle d'incidence α_p des palettes avec un retard d'un quart de tour.

L'angle d'incidence des palettes α_p est commandé par le « wash-out ». Il est proportionnel au déplacement vertical du plateau cyclique à l'endroit où il y a la boule « W » (chappe) du wash-out mais en sens opposé (si la boule monte l'incidence de la palette diminue).

Cette boule est un quart de tour en avance par rapport à la boule (chappe) « E » qui va du plateau cyclique vers le « mixing-arm » au point « A » sur la figure.

Donc le mouvement du point « C » est en opposition avec celui de la chappe « A ».

Le mouvement de la chappe « B » connectée à la boule (chappe) de pied de pale qui est un mélange (mixing) de ces mouvements est donc proportionnel au déplacement vertical du plateau cyclique

Principe de fonctionnement de la tête rotor.

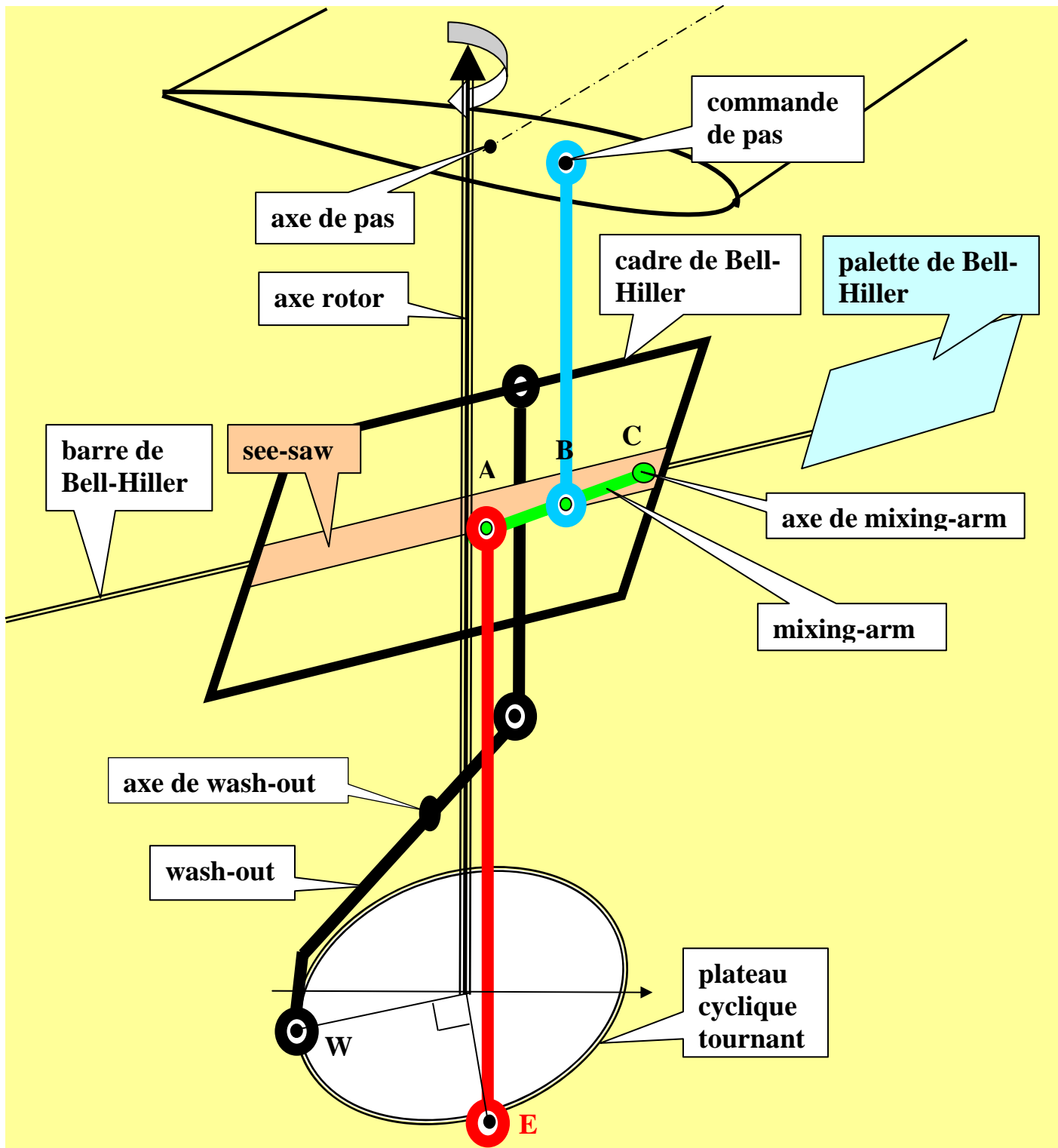
On peut distinguer au moins deux types de tête rotor. Celles où le pas des pales est commandé du côté du bord d'attaque des pales (cas du 3DX500 ci-dessous et figure 2) et celles où il est commandé côté bord de fuite (cas du HDX500 ci-dessous et figure 3).



3DX500. Commande de pas vers le bord d'attaque.
Mixing-arm entièrement coté bord d'attaque.

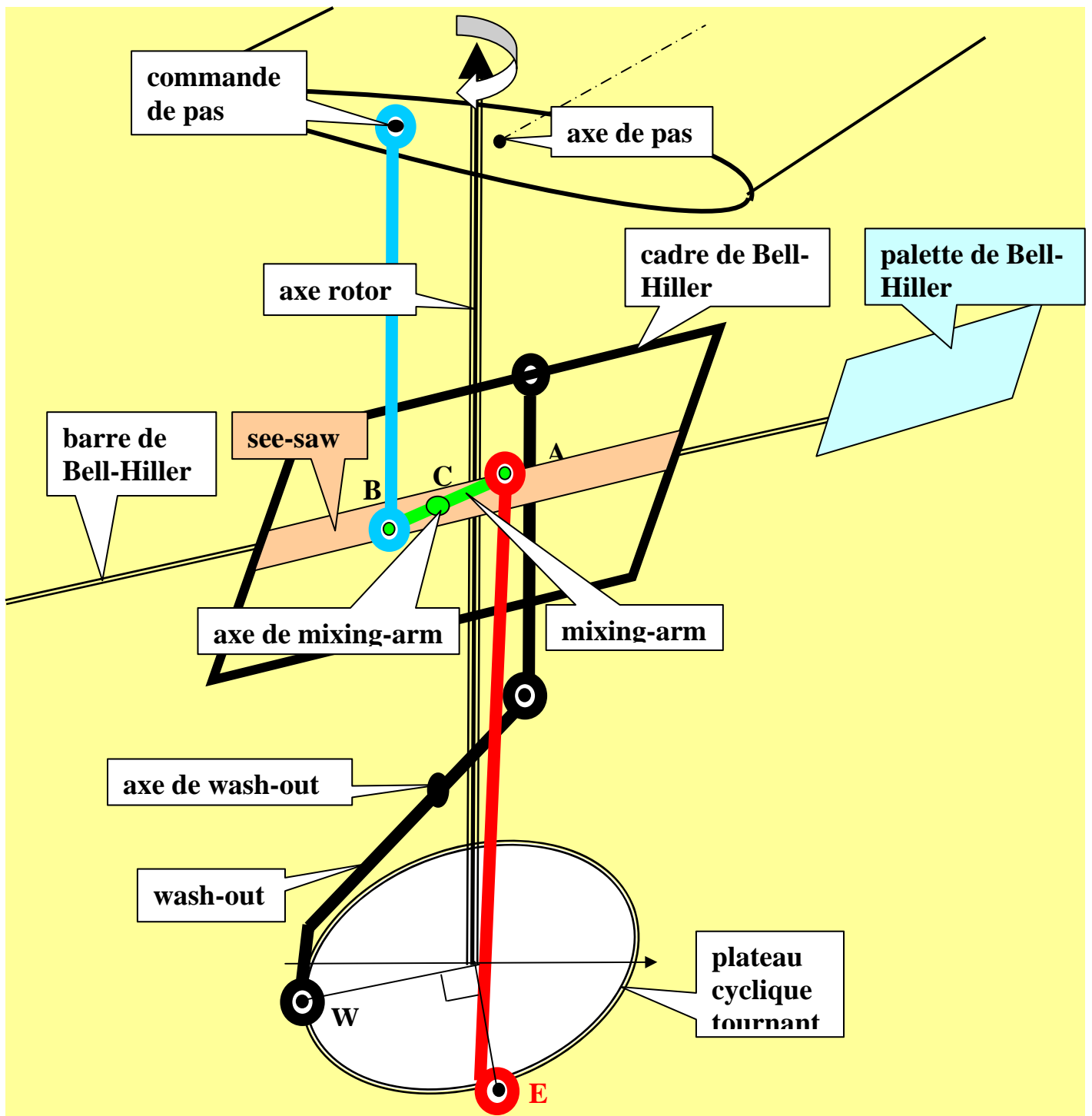


HDX500. Commande de pas vers le bord de fuite.
Mixing-arm coté bord d'attaque et bord de fuite.



Type 3DX500. Commande de pas coté bord d'attaque.
 A et B se déplacent dans le même sens

Figure 2



Type HDX500. Commande de pas coté bord de fuite.
 A et B se déplacent en sens contraire.

Figure 3

Dynamique du rotor en vol stationnaire.

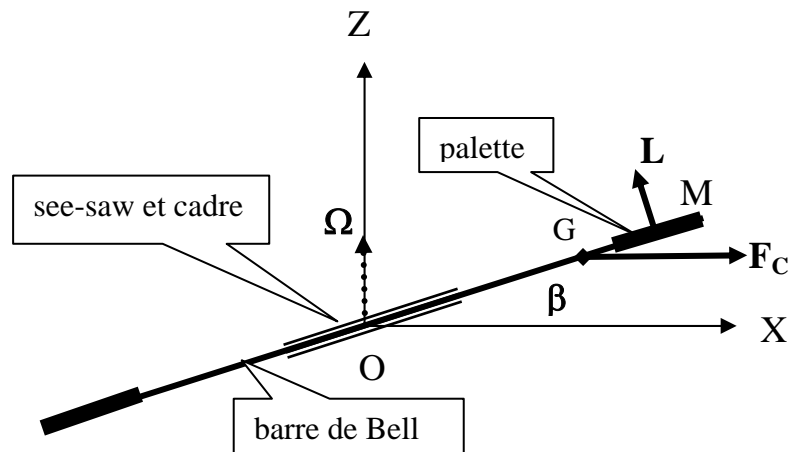


Figure 4

On s'intéresse au mouvement d'une palette car la palette opposée a un mouvement dans le sens opposé puisque les boules du wash out sont disposées à 180° sur le plateau cyclique et que la barre de Bell (flybar) est rigide..

L'angle de braquage de la palette α est proportionnel à la hauteur « h » de la boule « W » du plateau cyclique (par l'intermédiaire du wash-out) qui tourne à la vitesse angulaire Ω (voir figure 2 et 3).

h est une fonction sinusoïdale du temps, par exemple :

$$h = H \cdot \cos(\Omega \cdot t).$$

La rotule « W » du plateau cyclique accrochée au « wash-out » monte et descend de H à -H au cours de sa rotation (pas cyclique) et est à la hauteur moyenne H_0 par rapport au neutre (pas collectif).

$$\alpha = k \cdot h = k \cdot H \cdot \cos(\Omega \cdot t) \quad (1)$$

k dépend de la position des boules du « wash-out » par rapport à la position de l'axe de rotation du « wash-out » sur le « slide-block ». Le « slide-block » est la pièce qui glisse sur l'axe du rotor et tourne avec lui.

α serait l'angle d'incidence de la palette si β était constant mais β varie au cours du temps.

Le mouvement de battement vertical de la palette (β varie) produit une vitesse verticale de la palette égale à $OM \cdot \cos(\beta) \cdot (d\beta/dt)$ alors que la composante horizontale de sa vitesse est $\Omega \cdot OM \cdot \cos(\beta)$, soit une composante verticale de la vitesse relative de la palette de $-OM \cdot \cos(\beta) \cdot (d\beta/dt)$. En admettant un angle d'incidence i petit, la tangente de cet angle est voisine de la valeur de l'angle i (exprimé en radian).

L'angle d'incidence varie donc en fonction du temps t de :

$$-OM \cdot \cos(\beta) \cdot (d\beta/dt) / [\Omega \cdot OM \cdot \cos(\beta)] = - (d\beta/dt) / \Omega.$$

L'incidence aérodynamique de la palette est donc

$$i = k \cdot H \cdot \cos(\Omega \cdot t) - (d\beta/dt) / \Omega. \quad (2)$$

On définit :

- La masse m de l'ensemble palette + 1/2 see-saw + 1/2 barre + 1/2 cadre de Bell
- le centre de gravité G de l'ensemble palette + 1/2 seesaw + 1/2 barre + 1/2 cadre
- le moment d'inertie I (en O) de l'ensemble palette + 1/2 see-saw + 1/2 barre + 1/2 cadre de Bell

$$I = m.OG^2$$

La portance « L » de la palette peut s'écrire :

$$L = (dC_z/di).(1/2).\rho.U^2.S.i$$

Elle est proportionnelle à l'incidence i , à la surface S , au carré de la vitesse U de la palette (voisine de $\Omega.R$ en notant $R = OM$) et à la masse volumique ρ de l'air (1.225 kg/m^3).

dC_z/di , variation du coefficient de portance C_z en fonction de l'incidence i , est voisine de $2.\pi$.

On peut donc écrire :

$$L = K.i$$

avec

$$K = \pi.\rho.(\Omega.R)^2.S$$

La force centrifuge $F_c = m.OG.\cos(\beta).\Omega^2$ appliquée en G .

On néglige les effets de la pesanteur et des forces de Coriolis.

La somme des moments en O de ces forces est égale à $I.d^2\beta/dt^2$ et on obtient :

$$I.d^2\beta/dt^2 = -OG.F_c.\sin(\beta) + OM.L.\cos(\beta)$$

β (angle de battement) étant supposé petit, $\cos(\beta) \approx 1$, $\sin(\beta) \approx \beta$ et on obtient en remplaçant F_c et L par leur valeurs :

$$I.d^2\beta/dt^2 = -OG.F_c.\beta + OM.L = -m.OG^2.\Omega^2.\beta + OM.K.i = -I.\Omega^2.\beta + OM.K.i$$

soit en notant $R = OM$

$$d^2\beta/dt^2 + \Omega^2.\beta = (R.K/I).i$$

$$d^2\beta/dt^2 + \Omega^2.\beta = (R.K/I). [k.H.\cos(\Omega.t) - (d\beta/dt)/\Omega] \quad (3)$$

En régime établi, la solution de (3) est de la forme

$$\beta = \beta_1.\cos(\Omega.t) + \beta_2.\sin(\Omega.t)$$

$$d\beta/dt = -\beta_1.\Omega.\sin(\Omega.t) + \beta_2.\Omega.\cos(\Omega.t)$$

$$d^2\beta/dt^2 = -\beta_1.\Omega^2.\cos(\Omega.t) - \beta_2.\Omega^2.\sin(\Omega.t) \text{ et}$$

En remplaçant dans (3) et en identifiant les termes en sin et cos on trouve :

$$\beta_1 = 0$$

$$\beta_2 = k.H \text{ et donc:}$$

$$\beta = k.H.\sin(\Omega.t) = k.H.\cos(\Omega.t - \pi/2) \quad (4)$$

En comparant (1) et (4) on voit que l'angle de battement de la palette est égal à l'angle de braquage α de la palette (imposé par le plateau cyclique et le mixing arm) mais en **retard d'un quart de tour**.

$\Omega.t$ est la position angulaire A de la palette par rapport à une direction de référence.

Par exemple pour $A = 0$ la palette est dans l'axe de l'hélico vers l'avant.

Avec (1) et (4) on trouve ($A = \Omega.t$) :

$A = 0, \alpha = k.H$ (α maxi), $\beta = 0$

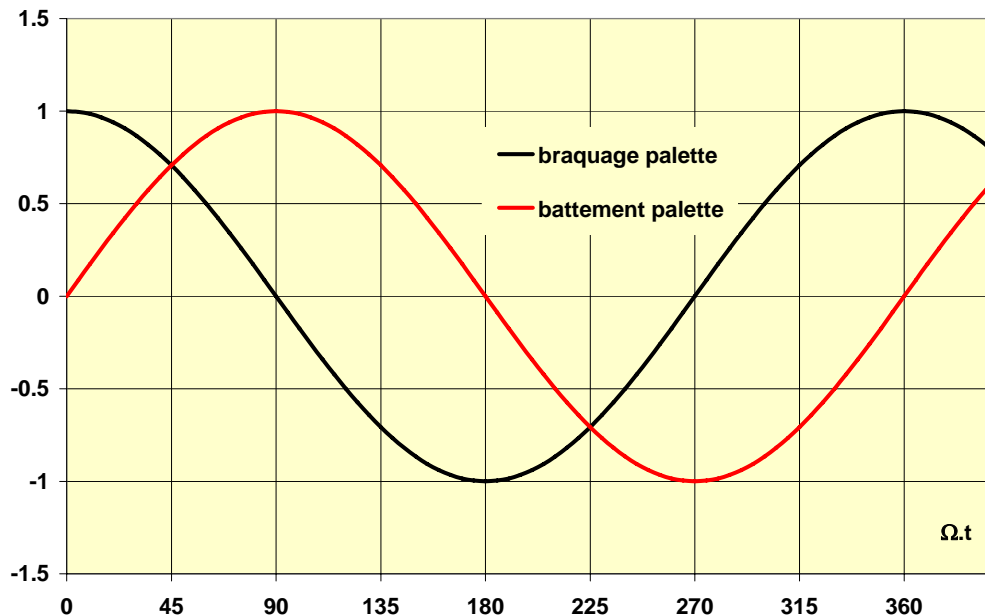
$A = 45^\circ, \alpha = k.H/\sqrt{2}$ (α diminue), $\beta = k.H/\sqrt{2}$ (β augmente) (palette à gauche)

$A = 90^\circ, \alpha = 0, \beta = k.H$ (β maxi)

$A = 135^\circ, \alpha = -k.H/\sqrt{2}$, (α diminue), $\beta = k.H/\sqrt{2}$

$A = 180^\circ, \alpha = -k.H, \beta = 0$

$A = 270^\circ, \alpha = 0, \beta = -k.H$ (β mini), etc



En fait l'angle de pas de la pale est une combinaison de la commande directe venant du plateau cyclique vers le mixing-arm (boule « E ») et de l'angle de battement des palettes commandé par la boule « W » qui est « en avance » d'un quart de tour par rapport à la boule « E » (voir figure 2 et 3).

L'angle de pas est donc bien proportionnel à la hauteur de la boule « E » directement connectée au « mixing-arm ».

Si par exemple le plateau cyclique est incliné vers l'avant, la pale avant a un braquage plus petit (portance réduite) que la pale arrière (portance augmentée) et l'hélico bascule vers l'avant.

Temps de réponse de la palette

Avec l'équation (3) on peut calculer le temps de réponse τ à une variation du pas cyclique (en négligeant les effets de la pesanteur).

$$\tau = 2.I.\Omega/(K.R)$$

I = moment d'inertie de l'ensemble barre de Bell, see-saw, cadre et palettes = $m.R_B^2$.

R_B est un rayon d'inertie « équivalent » (plus petit que le rayon moyen de la palette R).

Ω = vitesse angulaire (rad/s) = $2.\pi.N/60$ # $N/10$ où N = tours/min.

Durée d'un tour : $T = 2.\pi/\Omega$

Masse volumique de l'air $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$.

$K = \pi.\rho.(\Omega.R)^2.S$ (S = surface de la palette)

On obtient :

$$\tau/T = \frac{1}{\pi^2} \cdot \frac{m.R_B^2}{\rho.S.R^3} \quad (\pi^2.\rho \# 12)$$

La réponse de la palette à une variation du pas cyclique est d'autant plus rapide que :

- m (masse totale de tout le système see-saw, mixing-arm, barre de bell, palette) est faible.
- R_B est petit (see-saw, mixing-arm trapus et palette légère)
- S surface de la palette est grand
- R (rayon de la palette) est grand (en contradiction avec R_B petit d'où compromis).

Applications :

- Palette de Hiller-Bell

On admet que $R_B = R = 0.2$ m, $m=15$ g, $S=3 \times 4$ cm²

$$\tau/T = \frac{1}{12} \cdot \frac{m}{S \cdot R} = 1.5 \cdot 10^{-2} / (12 \cdot 12 \cdot 10^{-4} \cdot 0.2) \approx 5$$

La constante de temps de la palette est de 5 tours de rotor.

- Pale rotor

En prenant la même expression (ce qui n'est pas exact puisqu'il faudrait intégrer le long de l'envergure pour calculer le moment des forces d'inertie et de portance) avec $m = 60$ g, $R=0.5$ m, $c = 4$ cm, on trouve :
 $\tau/T = 0.5$.

On constate qu'avec la palette de Bell-Hiller le temps de réponse est multiplié par 10 ce qui laisse un peu de temps au pilote pour effectuer les corrections qui s'imposent.

Cette valeur (0.5) est quasi la même pour un hélico « grandeur », sauf qu'un vrai rotor tourne beaucoup moins vite qu'une maquette (T est en gros inversement proportionnel à la longueur des pales).

Pour une barre de Bell sans palettes (sans portance) $K \rightarrow 0$ et $\tau \rightarrow \infty$. La barre de Bell met un temps « infini » pour changer de position c'est à dire qu'elle reste toujours dans le même plan (gyroscope). C'est ce qu'on constate avec un bi-rotor où il n'y a que des masses en bout de barre de Bell, il est « ultra stable ».