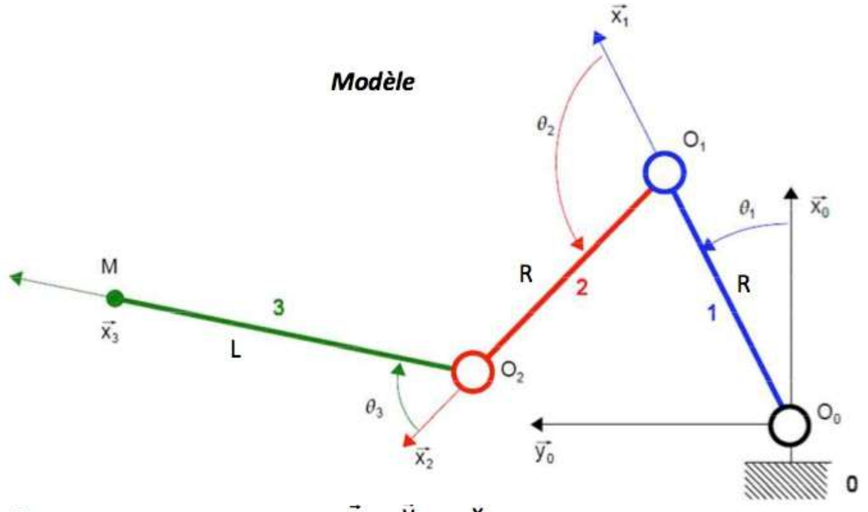
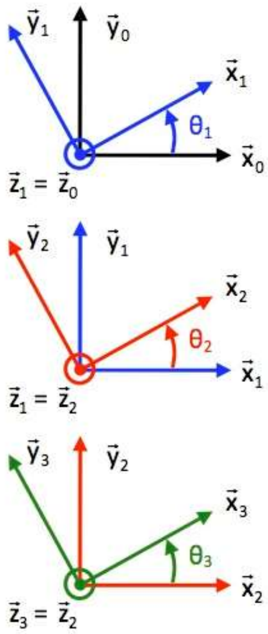
CORRIGÉ

Exercice 1 : ***Robot cueilleur de fruits***



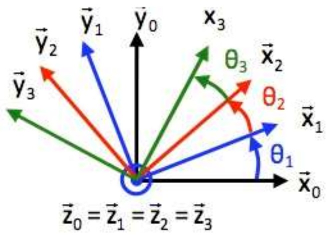


On a :

$\overrightarrow{\Omega_{1/0}} = \dot{\theta}_1.\vec{z}_0$

$\overrightarrow{\Omega_{2/1}} = \dot{\theta}_2.\vec{z}_0$

$\overrightarrow{\Omega_{3/2}} = \dot{\theta}_3.\vec{z}_0$



Q.1. Nature du mouvement de 1/0 ? : Mouvement de rotation simple autour de l'axe (O_0, $\vec{z}_0$) :

On applique le champ des vitesses : $\overrightarrow{V_{O_1\in 1/0}} = \overrightarrow{V_{O_0\in 1/0}} + \overrightarrow{O_1O_0} \wedge \overrightarrow{\Omega_{1/0}}$

Avec $\overrightarrow{V_{O_0\in 1/0}} = \vec{0}$ → $\overrightarrow{O_1O_0} \wedge \overrightarrow{\Omega_{1/0}} = -R.\vec{x}_1 \wedge \dot{\theta}_1.\vec{z}_1 = R.\dot{\theta}_1.\vec{y}_1$ → $\boxed{\overrightarrow{V_{O_1\in 1/0}} = R.\dot{\theta}_1.\vec{y}_1}$

Q.2. Nature du mouvement de 2/0 ? : Mouvement complexe, on décompose en mouvements simples :

→ 2/0 = 2/1 + 1/0 → $\overrightarrow{V_{O_2,2/0}} = \overrightarrow{V_{O_2,2/1}} + \overrightarrow{V_{O_2,1/0}}$ (composition de mouvement)

$$\overrightarrow{V_{O_2,2/0}} = \overrightarrow{V_{O_2,2/1}} + \overrightarrow{V_{O_2,1/0}}$$

Nature du mouvement de 2/1 ? :
Rotation autour de l'axe (O_1, $\vec{z}_0$)

Champ des vitesses

$$\overrightarrow{V_{O_2\in 2/1}} = \overrightarrow{V_{O_1\in 2/1}} + \overrightarrow{O_2O_1} \wedge \overrightarrow{\Omega_{2/1}}$$

Avec $\overrightarrow{V_{O_2\in 2/1}} = \vec{0}$

$$\overrightarrow{O_2O_1} \wedge \overrightarrow{\Omega_{2/1}} = -R.\vec{x}_2 \wedge \dot{\theta}_2.\vec{z}_2$$

$$\overrightarrow{O_2O_1} \wedge \overrightarrow{\Omega_{2/1}} = R.\dot{\theta}_2.\vec{y}_2$$

→ $\overrightarrow{V_{O_2\in 2/1}} = R.\dot{\theta}_2.\vec{y}_2$

Nature du mouvement de 1/0 ? :
Rotation autour de l'axe (O_0, $\vec{z}_0$)

Champ des vitesses

$$\overrightarrow{V_{O_2\in 1/0}} = \overrightarrow{V_{O_0\in 1/0}} + \overrightarrow{O_2O_0} \wedge \overrightarrow{\Omega_{1/0}}$$

Avec $\overrightarrow{V_{O_0\in 1/0}} = \vec{0}$

$$\overrightarrow{O_2O_0} \wedge \overrightarrow{\Omega_{1/0}} = (-R.\vec{x}_2 - R.\vec{x}_1) \wedge \dot{\theta}_1.\vec{z}_1$$

$$\overrightarrow{O_2O_0} \wedge \overrightarrow{\Omega_{1/0}} = R.\dot{\theta}_1.\vec{y}_2 + R.\dot{\theta}_1.\vec{y}_1$$

→ $\overrightarrow{V_{O_2\in 1/0}} = R.\dot{\theta}_1.\vec{y}_2 + R.\dot{\theta}_1.\vec{y}_1$

$$\rightarrow \boxed{\overrightarrow{V_{O_2 \in 2/0}} = R.(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2).\vec{y}_2 + R.\dot{\theta}_1.\vec{y}_1}$$

Q.3. Nature du mouvement de 3/0 ? : Mouvement complexe, on décompose en mouvements simples :

→ 3/0 = 3/2 + 2/1 +1/0 → $\overrightarrow{V_{M,3/0}} = \overrightarrow{V_{M,3/2}} + \overrightarrow{V_{M,2/1}} + \overrightarrow{V_{M,1/0}}$ (composition de mouvement)

$$\overrightarrow{V_{M,3/0}} = \overrightarrow{V_{M,3/2}} + \overrightarrow{V_{M,2/1}} + \overrightarrow{V_{M,1/0}}$$

Nature du mouvement de 3/2 ? :
Rotation autour de l'axe $(O_2, \vec{z}_0)$

Champ des vitesses

$$\overrightarrow{V_{M \in 3/2}} = \overrightarrow{V_{O_2 \in 3/2}} + \overrightarrow{MO_2} \wedge \overrightarrow{\Omega_{3/2}}$$

Avec $\overrightarrow{V_{O_2 \in 3/2}} = \vec{0}$

$$\overrightarrow{MO_2} \wedge \overrightarrow{\Omega_{3/2}} = -L.\vec{x}_3 \wedge \dot{\theta}_3.\vec{z}_3$$

$$\overrightarrow{MO_2} \wedge \overrightarrow{\Omega_{3/2}} = L\dot{\theta}_3.\vec{y}_3$$

$$\rightarrow \overrightarrow{V_{M \in 3/2}} = L\dot{\theta}_3.\vec{y}_3$$

Nature du mouvement de 2/1 ? :
Rotation autour de l'axe $(O_1, \vec{z}_0)$

Champ des vitesses

$$\overrightarrow{V_{M \in 2/1}} = \overrightarrow{V_{O_1 \in 2/1}} + \overrightarrow{MO_1} \wedge \overrightarrow{\Omega_{2/1}}$$

Avec $\overrightarrow{V_{O_2 \in 2/1}} = \vec{0}$

$$\overrightarrow{MO_1} \wedge \overrightarrow{\Omega_{2/1}} = (-L.\vec{x}_3 - R.\vec{x}_2) \wedge \dot{\theta}_2.\vec{z}_1$$

$$\overrightarrow{MO_1} \wedge \overrightarrow{\Omega_{2/1}} = L.\dot{\theta}_3.\vec{y}_3 + R.\dot{\theta}_2.\vec{y}_2$$

$$\rightarrow \overrightarrow{V_{O_2 \in 2/1}} = R.\dot{\theta}_2.\vec{y}_2$$

Nature du mouvement de 1/0 ? :
Rotation autour de l'axe $(O_0, \vec{z}_0)$

Champ des vitesses

$$\overrightarrow{V_{M \in 1/0}} = \overrightarrow{V_{O_0 \in 1/0}} + \overrightarrow{MO_0} \wedge \overrightarrow{\Omega_{1/0}}$$

Avec $\overrightarrow{V_{O_0 \in 1/0}} = \vec{0}$

$$\overrightarrow{MO_0} \wedge \overrightarrow{\Omega_{1/0}} = (-L.\vec{x}_3 - R.\vec{x}_2 - R.\vec{x}_1) \wedge \dot{\theta}_1.\vec{z}_1$$

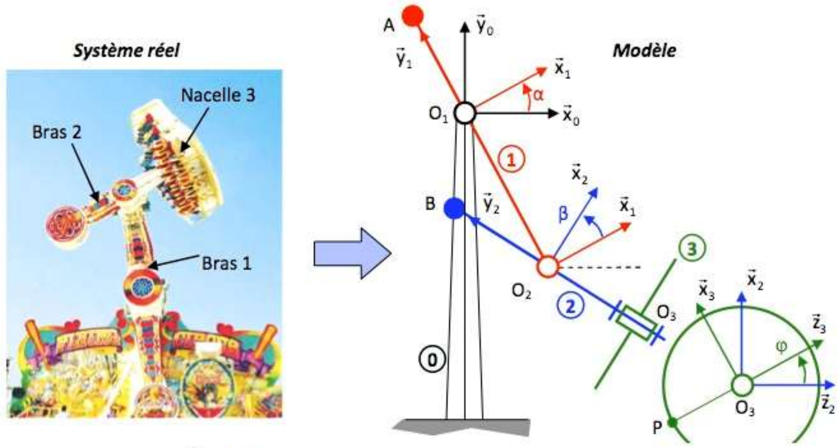
$$\overrightarrow{MO_0} \wedge \overrightarrow{\Omega_{1/0}} = L.\dot{\theta}_1.\vec{y}_3 + R.\dot{\theta}_1.\vec{y}_2 + R.\dot{\theta}_1.\vec{y}_1$$

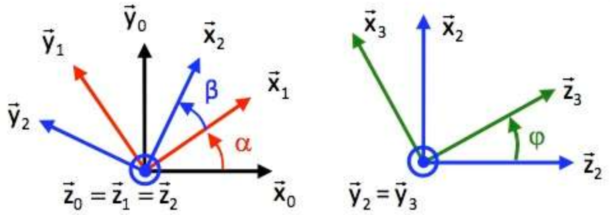
$$\rightarrow \overrightarrow{V_{M \in 1/0}} = L.\dot{\theta}_1.\vec{y}_3 + R.\dot{\theta}_1.\vec{y}_2 + R.\dot{\theta}_1.\vec{y}_1$$

$$\rightarrow \boxed{\overrightarrow{V_{M,3/0}} = R.\dot{\theta}_1.\vec{y}_1 + R.\left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2\right)\vec{y}_2 + L.\left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3\right)\vec{y}_3}$$

Q.4. Les résultats obtenus par calcul direct (TD 11) et ceux obtenus ici par champ des vitesses + composition de mouvement sont (bien évidemment) les mêmes (ce qui est plutôt rassurant ^^).

Exercice 2 : ***Manège Magic Arms***





$$\overrightarrow{\Omega_{1/0}} = \dot{\alpha}.\vec{z}_0$$
$$\overrightarrow{\Omega_{2/1}} = \dot{\beta}.\vec{z}_0$$
$$\overrightarrow{\Omega_{3/2}} = \dot{\varphi}.\vec{y}_2$$

Q.1. Nature du mouvement de 3/0 ? : Mouvement complexe, on décompose en mouvements simples :

→ 3/0 = 3/2 + 2/1 +1/0 → $\overrightarrow{V_{P,3/0}} = \overrightarrow{V_{P,3/2}} + \overrightarrow{V_{P,2/1}} + \overrightarrow{V_{P,1/0}}$ (composition de mouvement)

$$\overrightarrow{V_{P,3/0}} = \overrightarrow{V_{P,3/2}} + \overrightarrow{V_{P,2/1}} + \overrightarrow{V_{P,1/0}}$$

Nature du mouvement de 3/2 ? : Rotation autour de l'axe $(O_3, \vec{x}_1)$

Champ des vitesses

$$\overrightarrow{V_{P\in 3/2}} = \overrightarrow{V_{O_3\in 3/2}} + \overrightarrow{PO_3} \wedge \overrightarrow{\Omega_{3/2}}$$

Avec $\overrightarrow{V_{O_3\in 3/2}} = \vec{0}$

$$\overrightarrow{PO_3} \wedge \overrightarrow{\Omega_{3/2}} = R.\vec{z}_3 \wedge \dot{\varphi}.\vec{y}_3$$
$$\overrightarrow{PO_3} \wedge \overrightarrow{\Omega_{3/2}} = -R.\dot{\varphi}.\vec{x}_3$$

→ $\overrightarrow{V_{P\in 3/2}} = -R.\dot{\varphi}.\vec{x}_3$

Nature du mouvement de 2/1 ? : Rotation autour de l'axe $(O_2, \vec{z}_1)$

Champ des vitesses

$$\overrightarrow{V_{P\in 2/1}} = \overrightarrow{V_{O_2\in 2/1}} + \overrightarrow{PO_2} \wedge \overrightarrow{\Omega_{2/1}}$$

Avec $\overrightarrow{V_{O_2\in 2/1}} = \vec{0}$

$$\overrightarrow{PO_2} \wedge \overrightarrow{\Omega_{2/1}} = (R.\vec{z}_3 + l_2.\vec{y}_2) \wedge \dot{\beta}.\vec{z}_2$$
$$\overrightarrow{PO_2} \wedge \overrightarrow{\Omega_{2/1}} = -R.\dot{\beta}.\sin\varphi.\vec{y}_2 + l_2.\dot{\beta}.\vec{x}_2$$

→ $\overrightarrow{V_{P\in 2/1}} = -R.\dot{\beta}.\sin\varphi.\vec{y}_2 + l_2.\dot{\beta}.\vec{x}_2$

Nature du mouvement de 1/0 ? : Rotation autour de l'axe $(O_1, \vec{z}_1)$

Champ des vitesses

$$\overrightarrow{V_{P\in 1/0}} = \overrightarrow{V_{O_1\in 1/0}} + \overrightarrow{PO_1} \wedge \overrightarrow{\Omega_{1/0}}$$

Avec $\overrightarrow{V_{O_1\in 1/0}} = \vec{0}$

$$\overrightarrow{PO_1} \wedge \overrightarrow{\Omega_{1/0}} = (R.\vec{z}_3 + l_2.\vec{y}_2 + l_1.\vec{y}_1) \wedge \dot{\alpha}.\vec{z}_2$$
$$\overrightarrow{PO_1} \wedge \overrightarrow{\Omega_{1/0}} = -R.\dot{\beta}.\sin\varphi.\vec{y}_2 + l_2.\dot{\beta}.\vec{x}_2 + l_1.\dot{\alpha}.\vec{x}_1$$

→ $\overrightarrow{V_{P\in 2/1}} = -R.\dot{\alpha}.\sin\varphi.\vec{y}_2 + l_2.\dot{\alpha}.\vec{x}_2 + l_1.\dot{\alpha}.\vec{x}_1$

→ $\boxed{\overrightarrow{V_{P,3/0}} = l_1.\dot{\alpha}.\vec{x}_1 + l_2.(\dot{\alpha}+\dot{\beta})\vec{x}_2 - R.(\dot{\alpha}+\dot{\beta})\sin\varphi.\vec{y}_2 - R.\dot{\varphi}.\vec{x}_3}$

Exercice 3 : ***Centre d'usinage grande vitesse 5 axes***

Q.1. $\overrightarrow{O_3O_5} = \overrightarrow{O_3O_4} + \overrightarrow{O_4D} + \overrightarrow{DO_5} = y.\vec{y}_3 + l_3.\vec{z}_3 + l_4.\vec{x}_4 + z.\vec{z}_5 = l_4.\vec{x}_3 + y.\vec{y}_3 + (z + l_3).\vec{z}_3$

Q.2. Le point O_5 extrémité de l'outil se déplace dans le plan $x(t) = cte = l_4$

Q.3. $\overrightarrow{V_{O_5 \in 5/3}} = \overrightarrow{V_{O_5/3}} = \frac{d}{dt}\overrightarrow{O_3O_5}\Big|_3 = \frac{d}{dt} l_4.\vec{x}_3 + y.\vec{y}_3 + (z + l_3).\vec{z}\Big|_3 = \dot{y}.\vec{y}_3 + \dot{z}.\vec{z}_3$

(O_5 a une réalité physique sur le solide 5, on peut appliquer le calcul direct).

Q.4. $\left\|\overrightarrow{V_{O_5 \in 5/3}}\right\| = \sqrt{(\dot{y}.\vec{y}_3 + \dot{z}.\vec{z})^2} = \sqrt{\dot{y}^2 + \dot{z}^2}$

On a vitesse maximale sur l'axe Y : 40 m/min et vitesse maximale sur l'axe Z : 40 m/min.

→ $\left\|\overrightarrow{V_{O_5 \in 5/3}}\right\| = \sqrt{40^2 + 40^2} = 56.5$ m/min.

Q.5. Le point O_0 se déplace dans le plan $y(t) = cte = l_1$.

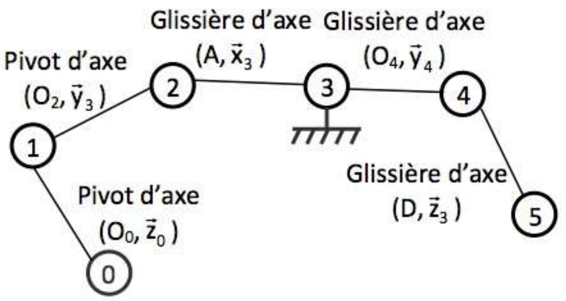
Q.6. $\overrightarrow{V_{O_0 \in 0/3}} = \overrightarrow{V_{O_0/3}} = \frac{d}{dt}\overrightarrow{O_3O_0}\Big|_3 = \frac{d}{dt}\left(x.\vec{x}_3 + l_2.\vec{z}_3 - l_1.\vec{y}_3 + l_0.\vec{z}_1\right)\Big|_3 = \dot{x}.\vec{x}_3 + l_0.\frac{d}{dt}\vec{z}_1\Big|_3 = \dot{x}.\vec{x}_3 + l_0.\dot{\theta}_1.\vec{x}_1$

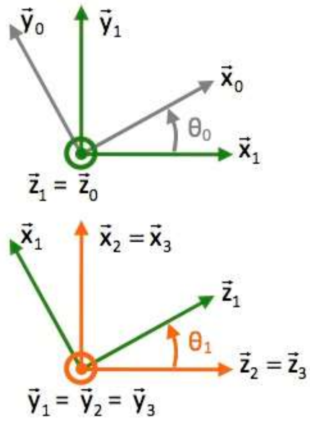
(O_0 a une réalité physique sur le solide 0, on peut appliquer le calcul direct).

Q.7. l_0=0,1m et $\dot{x} = 0$ → $\overrightarrow{V_{O_0 \in 0/3}} = 0,1.\dot{\theta}_1.\vec{x}_1$ → $\left\|\overrightarrow{V_{O_0 \in 0/3}}\right\| = 0,1.\dot{\theta}_1$ m/s.

Avec $\dot{\theta}_1 = \frac{2.\pi}{60}.150 = 15,7$ rad/s → $\left\|\overrightarrow{V_{O_0 \in 0/3}}\right\| = 1,57$ m/s.

Q.8.





Q.9. $\overrightarrow{\Omega_{S0/R3}} = \overrightarrow{\Omega_{0/3}} = \overrightarrow{\Omega_{0/1}} + \overrightarrow{\Omega_{1/2}} + \overrightarrow{\Omega_{2/3}} = \dot{\theta}_0.\vec{z}_1 + \dot{\theta}_1.\vec{y}_1$

Q.10. $\overrightarrow{V_{M \in 0/3}} = \overrightarrow{V_{O_0 \in 0/3}} + \overrightarrow{MO_0} \wedge \overrightarrow{\Omega_{0/3}}$ (Champ des vecteurs vitesse).

Avec $\overrightarrow{MO_0} \wedge \overrightarrow{\Omega_{0/3}} = -(x_M.\vec{x}_0 + y_M.\vec{y}_0 + z_M.\vec{z}_0) \wedge \left(\dot{\theta}_0.\vec{z}_0 + \dot{\theta}_1.\vec{y}_1\right)$

→ $\overrightarrow{MO_0} \wedge \overrightarrow{\Omega_{0/3}} = -\left(-x_M.\dot{\theta}_0.\vec{y}_0 + y_M.\dot{\theta}_0.\vec{x}_0 + x_M.\dot{\theta}_1.\cos\theta_0.\vec{z}_0 - y_M.\dot{\theta}_1.\sin\theta_0.\vec{z}_0 - z_M.\dot{\theta}_1.\vec{x}_1\right)$

→ $\overrightarrow{MO_0} \wedge \overrightarrow{\Omega_{0/3}} = x_M.\dot{\theta}_0.\vec{y}_0 - y_M.\dot{\theta}_0.\vec{x}_0 - x_M.\dot{\theta}_1.\cos\theta_0.\vec{z}_0 + y_M.\dot{\theta}_1.\sin\theta_0.\vec{z}_0 + z_M.\dot{\theta}_1.\vec{x}_1$

D'où : $\overrightarrow{V_{M \in 0/3}}.\vec{y}_3 = \left(\dot{x}.\vec{x}_3 + l_0.\dot{\theta}_1.\vec{x}_1 + x_M.\dot{\theta}_0.\vec{y}_0 - y_M.\dot{\theta}_0.\vec{x}_0 - x_M.\dot{\theta}_1.\cos\theta_0.\vec{z}_0 + y_M.\dot{\theta}_1.\sin\theta_0.\vec{z}_0 + z_M.\dot{\theta}_1.\vec{x}_1\right).\vec{y}_3$

→ $\overrightarrow{V_{M \in 0/3}}.\vec{y}_3 = x_M.\dot{\theta}_0.\cos\theta_0 - y_M.\dot{\theta}_0.\sin\theta_0$

Q.11. $\overrightarrow{V_{O_5\in 5/3}} = \overrightarrow{V_{O_5\in 5/0}} + \overrightarrow{V_{O_5\in 0/3}}$ (Composition de mouvement).

Et $\overrightarrow{V_{O_5\in 0/3}} = \overrightarrow{V_{M\in 0/3}} + \overrightarrow{O_5M} \wedge \overrightarrow{\Omega_{S0/R3}}$ (Champ des vecteurs vitesse).

D'où : $\overrightarrow{V_{O_5\in 5/3}} = \overrightarrow{V_{O_5\in 5/0}} + \overrightarrow{V_{M\in 0/3}} + \overrightarrow{O_5M} \wedge \overrightarrow{\Omega_{S0/R3}}$

Q.12. O_5 se déplace sur la surface usinée des points M : O_5 et M sont des points coïncidents de contact.

$\overrightarrow{V_{O_5\in 5/3}} = \overrightarrow{V_{O_5\in 5/0}} + \overrightarrow{V_{M\in 0/3}} + \overrightarrow{O_5M} \wedge \overrightarrow{\Omega_{S0/R3}}$ devient : $\overrightarrow{V_{O_5\in 5/3}} = \overrightarrow{V_{O_5\in 5/0}} + \overrightarrow{V_{M\in 0/3}}$

Q.13. Le cahier des charges impose une vitesse d'usinage constante. La relation de la question 12 devient :

$\overrightarrow{V_{O_5\in 5/0}} = \overrightarrow{V_{O_5\in 5/3}} - \overrightarrow{V_{M\in 0/3}}$

$\rightarrow \overrightarrow{V_{O_5\in 5/0}} = \dot{y}.\vec{y}_3 + \dot{z}.\vec{z}_3 - \left(v_{x_M}.\vec{x}_3 + v_{y_M}.\vec{y}_3 + v_{z_M}.\vec{z}_3\right)$

$\rightarrow \overrightarrow{V_{O_5\in 5/0}} = -v_{x_M}.\vec{x}_3 + \left(\dot{y} - v_{y_M}\right)\vec{y}_3 + \left(\dot{z} - v_{z_M}\right)\vec{z}_3$

$\rightarrow \left\|\overrightarrow{V_{O_5\in 5/0}}\right\| = \sqrt{{v_{x_M}}^2 + \left(\dot{y} - v_{y_M}\right)^2 + \left(\dot{z} - v_{z_M}\right)^2}$

Pour respecter le cahier des charges il faut donc que : $\sqrt{{v_{x_M}}^2 + \left(\dot{y} - v_{y_M}\right)^2 + \left(\dot{z} - v_{z_M}\right)^2} = cte$

Exercice 4 : *Validation des performances de l'hélicoptère Écureuil*

Q.1. $\boxed{\left\{V_{1/0}\right\} = {}_A\left\{\begin{matrix}\overrightarrow{\Omega_{1/0}} \\ \overrightarrow{V_{A,1/0}}\end{matrix}\right\} = {}_A\left\{\begin{matrix}\vec{0} \\ V.\vec{x}_0 = \dot{\lambda}.\vec{x}_0\end{matrix}\right\}}$ et $\boxed{\left\{V_{2/1}\right\} = {}_A\left\{\begin{matrix}\overrightarrow{\Omega_{2/1}} \\ \overrightarrow{V_{A,2/1}}\end{matrix}\right\} = {}_A\left\{\begin{matrix}\dot{\theta}.\vec{z}_0 = \omega.\vec{z}_0 \\ \vec{0}\end{matrix}\right\}}$

Q.2. $\left\{V_{2/0}\right\} = \left\{V_{2/1}\right\} + \left\{V_{1/0}\right\} = {}_A\left\{\begin{matrix}\dot{\theta}.\vec{z}_0 = \omega.\vec{z}_0 \\ \vec{0}\end{matrix}\right\} + {}_A\left\{\begin{matrix}\vec{0} \\ V.\vec{x}_0 = \dot{\lambda}.\vec{x}_0\end{matrix}\right\} = {}_A\left\{\begin{matrix}\omega.\vec{z}_0 \\ V.\vec{x}_0\end{matrix}\right\} \rightarrow \boxed{\left\{V_{2/0}\right\} = {}_A\left\{\begin{matrix}\omega.\vec{z}_0 \\ V.\vec{x}_0\end{matrix}\right\}}$

Q.3. $\overrightarrow{V_{M\in 2/0}} = \overrightarrow{V_{A\in 2/0}} + \overrightarrow{MA} \wedge \overrightarrow{\Omega_{2/0}} = V.\vec{x}_0 - R.\vec{x}_2 \wedge \omega.\vec{z}_0 = V.\vec{x}_0 + R.\omega.\vec{y}_2 \rightarrow \boxed{\overrightarrow{V_{M\in 2/0}} = V.\vec{x}_0 + R.\omega.\vec{y}_2}$

Q.4. $\overrightarrow{V_{M\in 2/0}} = \left.\frac{d}{dt}\overrightarrow{OM}\right|_0 = \left.\frac{d}{dt}h.\vec{z}_0 + \lambda(t).\vec{x}_0 + R.\vec{x}_2\right|_0 = V.\vec{x}_0 + R.\omega.\vec{y}_2 \rightarrow \boxed{\overrightarrow{V_{M\in 2/0}} = V.\vec{x}_0 + R.\omega.\vec{y}_2}$

Q.5. $\left\|\overrightarrow{V_{M\in 2/0}}\right\| = \sqrt{\overrightarrow{V_{M\in 2/0}}.\overrightarrow{V_{M\in 2/0}}} = \sqrt{V^2 + R^2.\omega^2 + 2.V.R.\omega.\vec{x}_0.\vec{y}_2}$ avec $\vec{x}_0.\vec{y}_2 = -\sin\theta$

$\boxed{V_{maxi} = \sqrt{V^2 + R^2.\omega^2 + 2.V.R.\omega} \text{ est obtenue pour } -\sin\theta = 1 \text{ soit lorsque } \vec{x}_2 = -\vec{y}_0}$

Q.6. Application numérique : $V_{maxi} = \sqrt{\left(\frac{290000}{3600}\right)^2 + 5{,}1^2 \times 38{,}7^2 + 2.\frac{290000}{3600} \times 5{,}1 \times 38{,}7}$

$V_{maxi} = \sqrt{\left(\frac{290000}{3600}\right)^2 + 5{,}1^2 \times 38{,}7^2 + 2.\frac{290000}{3600} \times 5{,}1 \times 38{,}7} = 278$ m/s soit $\boxed{V_{maxi} = 1000 \text{ km/h}}$

Q.7. Vitesse du son : 340 m/s → $\boxed{\text{85\% de 340 m/s = 289 m/s > 278 m/s → C.d.C.F. respecté}}$.