

Le FLIR – inspireur du BGR 300

1 Architecture du FLIR et hypothèses de modélisation

Objectif Vérifier que le choix de l'architecture du FLIR permet de satisfaire les performances établies en partie ??
Valider des hypothèses simplificatrices afin de pouvoir évaluer les performances du FLIR.

1.1 Description et validation de l'architecture du FLIR

Objectif Valider le choix de l'architecture du FLIR.

Le FLIR, fixé au porteur, est constitué :

- d'un axe motorisé d'*azimut* orientable en rotation par rapport au porteur autour de l'axe (P, \vec{z}_p) ;
- d'un ensemble de caméras, appelé *charge*, encastré sur un *axe motorisé d'élévation* orientable en rotation par rapport à l'axe motorisé d'azimut autour de l'axe (P, \vec{y}_e) .

Le modèle cinématique du FLIR et son paramétrage sont donnés sur la figure 1.

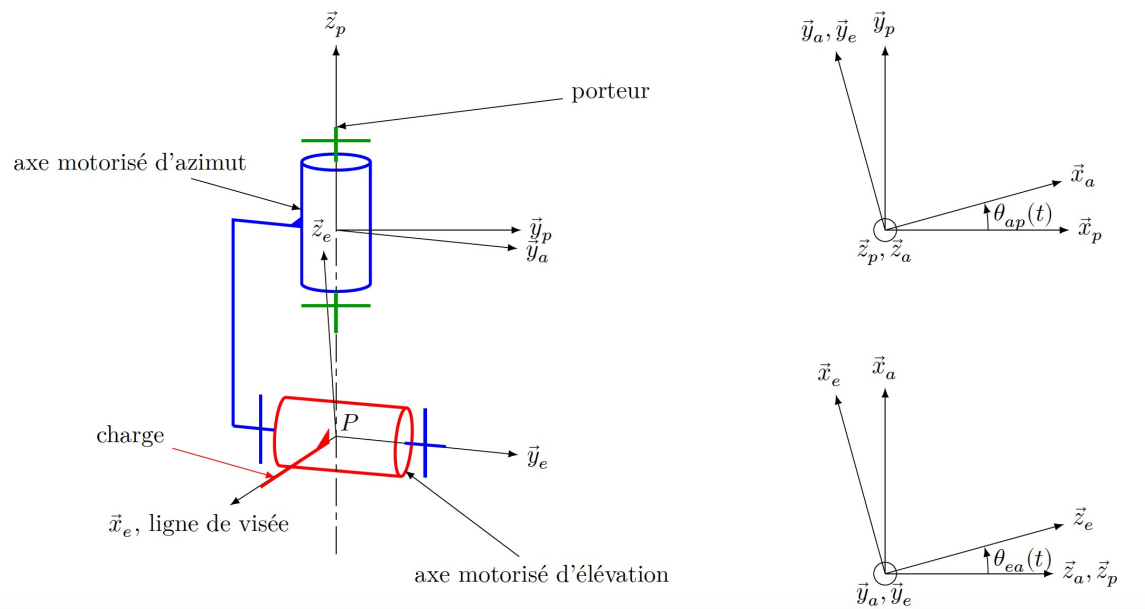


FIGURE 1 – Modèle cinématique global paramétré du FLIR, motorisations enlevées

Les repères associés aux solides sont les suivants :

- $R_a(P; \vec{x}_a, \vec{y}_a, \vec{z}_a)$ pour l'axe motorisé d'azimut;
- $R_e(P; \vec{x}_e, \vec{y}_e, \vec{z}_e)$ pour l'ensemble {axe motorisé d'élévation, charge} dont la ligne de visée est portée par \vec{x}_e ;
- $R_p(P; \vec{x}_p, \vec{y}_p, \vec{z}_p)$ pour le porteur;

- $R_0(P; \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ référentiel terrestre non géocentrique, placé à la surface de la Terre au voisinage du porteur avec \vec{z}_0 vertical ascendant.
- Dans la suite du sujet, le référentiel R_0 est considéré comme galiléen.

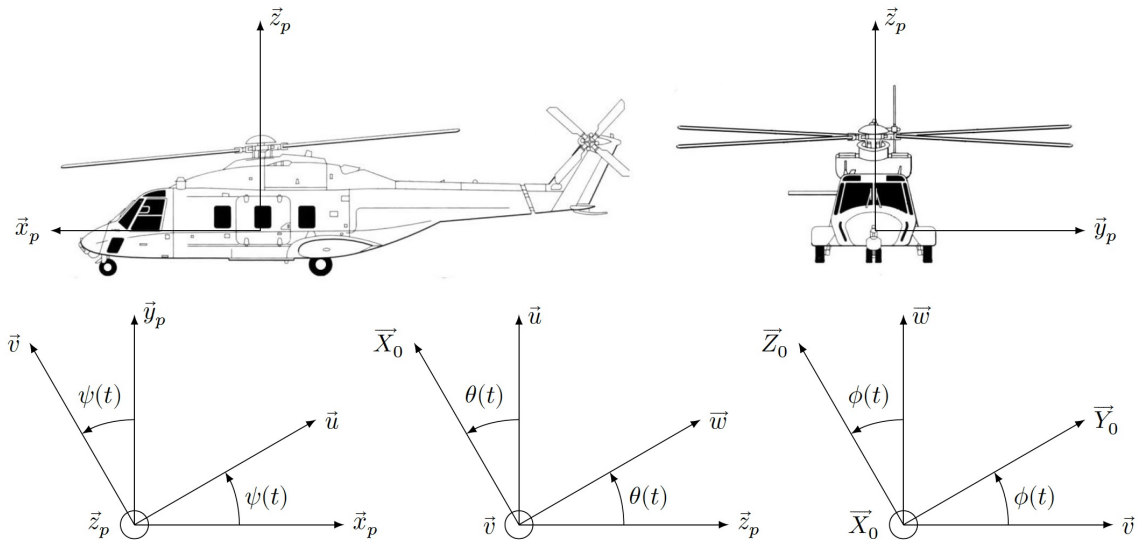


FIGURE 2 – Porteur NH90 et son orientation par rapport au référentiel terrestre

Le passage du référentiel terrestre R_0 au repère du porteur R_p se fait par l'intermédiaire des trois angles de Cardan définis sur la figure 2, avec :

- $\phi(t)$ l'angle de roulis;
- $\theta(t)$ l'angle de tangage;
- $\psi(t)$ l'angle de lacet.

Question 1 Déterminer le torseur cinématique en P , exprimé dans la base $(\vec{x}_a, \vec{y}_a, \vec{z}_a)$ de la liaison équivalente entre le porteur et la charge. En déduire la nature de cette liaison équivalente et préciser ses caractéristiques géométriques.

Correction Il y a en série 2 liaisons pivot d'axe orthogonaux et concourants en P . Le torseur cinématique équivalent résulte de la somme des torseurs cinématiques exprimés au point P soit (P, \vec{y}_a) . C'est le torseur d'une liaison sphérique à doigt de centre P de rotation bloquée \vec{x}_e .

Dans un cas d'utilisation normal, la liaison cinématique entre la tête du pilote et le cockpit est assimilable à une liaison sphérique dont le centre se trouve au milieu de la nuque. Or, le pilote doit avoir une image cohérente à sa vision quelle que soit l'orientation de sa tête par rapport au porteur.

Question 2 Afin de pouvoir valider la solution technique retenue pour la structure cinématique à deux axes orthogonaux motorisés du FLIR, comparer les mobilités du FLIR et celles de la tête du pilote par rapport au porteur et expliquer quel doit être un des rôles de l'algorithme implanté dans le calculateur.

Correction La tête du pilote dispose d'une mobilité supplémentaire il est donc nécessaire que l'algorithme du calculateur intègre les informations de position de la tête du pilote par rapport au porteur (en particulier la position angulaire suivant la mobilité supplémentaire) fournies par le sous système de détection des postures implanté dans le casque afin de reproduire cela au niveau de l'affichage de l'image.

2 Hypothèses simplificatrices

Objectif Valider les hypothèses simplificatrices suivantes :

- la commande de l'axe motorisé d'azimut est indépendante des mouvements de l'axe motorisé d'élévation;
- les effets aérodynamiques et la variation de position du centre d'inertie de la charge n'influent pas sur les performances du FLIR.

2.1 Rigidité de la structure à double étage de l'axe motorisé d'élévation et influence des perturbations aérodynamiques

Afin de limiter l'influence des vibrations du porteur sur la ligne de visée et augmenter la précision de son orientation, les ingénieurs ont choisi de décomposer l'axe motorisé d'élévation en deux étages (voir figures 3 et 4). Le premier étage, appelé étage gros d'élévation (ge), est en prise directe avec l'air et est donc soumis aux effets aérodynamiques lors des mouvements du porteur. L'étage gros d'élévation est lui-même en liaison pivot, d'axe (P, \vec{y}_e) , avec l'axe motorisé d'azimut.



FIGURE 3 – Intérieur du FLIR, vue des optiques des caméras liées à l'étage fin d'élévation

Le second, appelé étage fin d'élévation (fe), est protégé des effets aérodynamiques grâce au carter sphérique solidaire de l'étage gros. Cet étage est en liaison pivot, d'axe (P, \vec{y}_e) , avec l'étage gros d'élévation. L'inertie des éléments déplacés par l'étage fin d'élévation est plus faible que celle de l'étage gros d'élévation et les choix de guidage et de motorisation permettent d'atteindre des accélérations et des vitesses élevées. Cependant, l'amplitude du mouvement de l'étage fin est limitée.

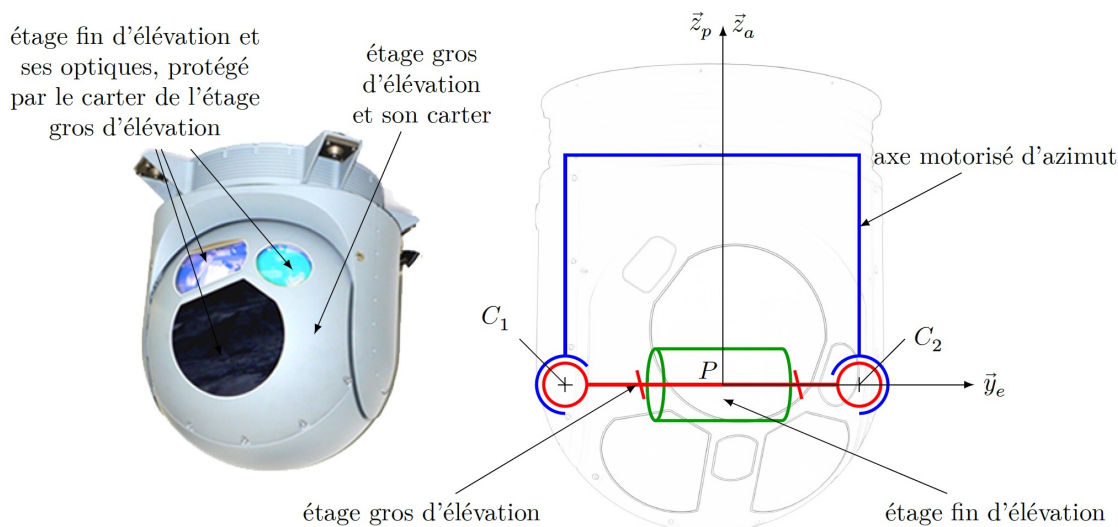


FIGURE 4 – FLIR et modèle cinématique de l'axe motorisé d'élévation

Le guidage en rotation entre l'étage gros d'élévation et l'axe motorisé d'azimut est réalisé à l'aide de deux composants à éléments roulants modélisables par des liaisons sphériques de centre C_1 et C_2 .

Question 3 À l'aide de la figure 4, déterminer le degré d'hyperstatisme du modèle du guidage en rotation entre l'axe motorisé d'azimut et l'étage gros d'élévation. Lister deux avantages et un inconvénient de ce guidage, puis conclure quant à sa pertinence vis-à-vis de la précision de l'orientation de la ligne de visée souhaitée.

Le montage de l'étage gros d'élévation sur l'axe motorisé d'azimut induit des efforts axiaux égaux, opposés et dirigés suivant \vec{y}_e , dans les liaisons de centre C_1 et C_2 . Ces efforts, appelés précharge, sont réglables au montage en jouant sur la différence de distance entre les points C_1 et C_2 prise d'une part, sur l'axe motorisé d'azimut et, d'autre part, sur l'étage gros d'élévation.

Lors des conditions de vol les plus sévères, le couple exercé par les effets aérodynamiques sur le carter de l'étage gros d'élévation a été mesuré à 0,18 N m.

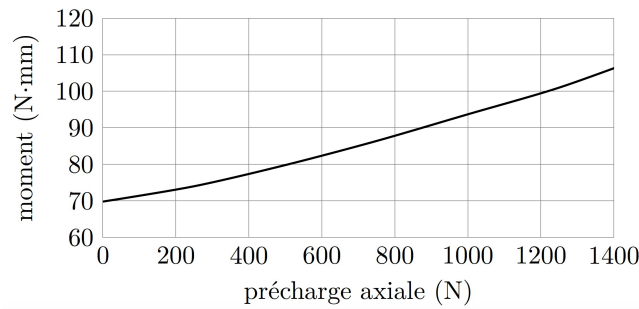


FIGURE 5 – Moment de frottement sec d'un seul composant à éléments roulants du guidage en rotation de l'étage gros d'élévation par rapport à l'axe motorisé d'azimut, en fonction de la précharge axiale (source : SKF)

Question 4 À l'aide de l'abaque donné figure 5, déterminer une valeur de réglage pertinente de la précharge du guidage en rotation de l'étage gros d'élévation par rapport à l'axe motorisé d'azimut.

Correction

2.2 Influence du déport de masse lié à la variation de position des optiques

Le déplacement des optiques (zoom) en translation rectiligne suivant \vec{x}_e par rapport à l'étage fin d'élévation rend la géométrie de ce dernier variable et son centre d'inertie ne se situe pas exactement sur l'axe de rotation (P, \vec{y}_e) de l'étage fin d'élévation par rapport à l'étage gros d'élévation. L'étage fin d'élévation est modélisé par l'ensemble des deux solides suivants (voir figure 6) :

- un disque plein et homogène d'axe (P_o, \vec{x}_e) de masse m_o , de rayon r_o et de centre de gravité P_o , modélisant les optiques mobiles de l'étage fin d'élévation ;
- un cylindre plein et homogène d'axe (P, \vec{y}_e) de masse m_{cyl} , de rayon r_{cyl} , de hauteur h_{cyl} et de centre de gravité P , modélisant le reste des éléments de l'étage fin d'élévation.

Dans la suite, ces deux solides sont supposés être en liaison complète, c'est-à-dire que la distance d , telle que $\overrightarrow{PP_o} = d \vec{x}_e$ est constante.

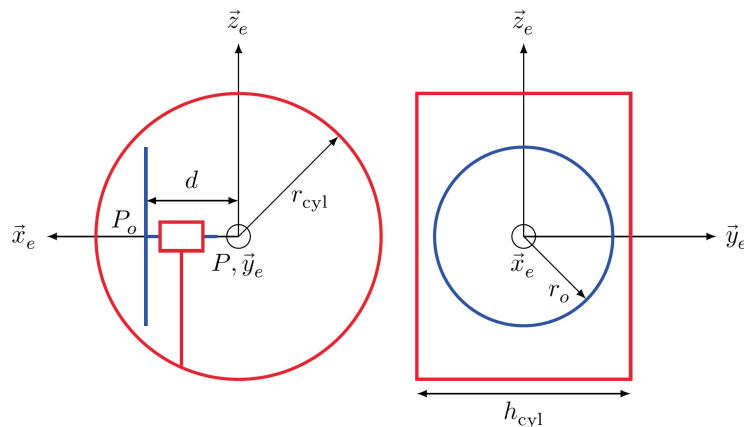


FIGURE 6 – Modélisation de la géométrie des masses de l'étage fin d'élévation

- L'opérateur d'inertie du cylindre plein, noté cyl , est de la forme suivante : $\bar{\bar{I}}_P(cyl) = \begin{pmatrix} A_{cyl} & 0 & 0 \\ 0 & B_{cyl} & 0 \\ 0 & 0 & A_{cyl} \end{pmatrix}_{(\vec{x}_e, \vec{y}_e, \vec{z}_e)}$
- L'opérateur d'inertie des optiques, noté o , est de la forme suivante : $\bar{\bar{I}}_{P_o}(o) = \begin{pmatrix} A_o & 0 & 0 \\ 0 & B_o & 0 \\ 0 & 0 & B_o \end{pmatrix}_{(\vec{x}_e, \vec{y}_e, \vec{z}_e)}$
- L'étage fin d'élévation est noté f_e , sa masse est égale à $m_{fe} = m_{cyl} + m_o$, son centre d'inertie est noté G_{fe} .

Question 5 Déterminer littéralement l'opérateur d'inertie $\bar{\bar{I}}_P(fe)$ de l'étage fin d'élévation en fonction de A_{cyl} ,

B_{cyl} , A_o , B_o , d et m_o dans le repère R_e , puis exprimer le vecteur $\overrightarrow{PG_{fe}} = \lambda \cdot \vec{x}_e$ dans le repère R_e en fonction de m_{cyl} , m_o et d .

Correction Pour pouvoir déterminer l'opérateur d'inertie de l'étage fin élévation au point P , il suffit d'additionner les matrices exprimées toutes deux au point P et dans la même base. Pour cela on applique la relation d'Huygens à l'opérateur de la partie optique entre son centre de gravité P_0 et le point P avec le vecteur $\overrightarrow{PP_0} = d\vec{x}_e$. On obtient dans la base $(\vec{x}_e, \vec{y}_e, \vec{z}_e)$:

$$I_P(fe) = I_P(cyl) + I_{P_0}(o) + m_o \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & d^2 & 0 \\ 0 & 0 & d^2 \end{pmatrix} = m_o \begin{pmatrix} A_{cyl} + A_o & 0 & 0 \\ 0 & B_{cyl} + B_o + m_o d^2 & 0 \\ 0 & 0 & A_{cyl} + B_o + m_o d^2 \end{pmatrix}$$

La position du centre d'inertie noté G_{fe} est donné par la relation : $\overrightarrow{PG_{fe}} = \frac{m_o d}{m_o + m_{cyl}} \vec{x}_e$ (calcul du barycentre).

Des mesures à bord du NH90 ont montré que la phase de vol la plus pénalisante, c'est-à-dire celle qui perturbe le plus la ligne de visée du FLIR, est l'ascension verticale du porteur. Dans cette phase, il est possible d'effectuer les hypothèses suivantes :

- les angles $\psi(t)$, $\theta(t)$ et $\phi(t)$ sont constants et nuls;
- $\theta_{ap}(t) = 0$;
- $\vec{z}_p = \vec{z}_a = \vec{z}_0$ vertical ascendant, $\vec{y}_p = \vec{y}_a = \vec{y}_0$ et $\vec{x}_p = \vec{x}_a = \vec{x}_0$;
- l'étage fin d'élévation est en mouvement par rapport à l'étage gros d'élévation;
- la ligne de visée est définie par l'orientation $\theta_{eo}(t)$ de l'étage fin d'élévation par rapport à R_0 . Dans cette étude, $\theta_{eo}(t) = \theta_{ea}(t)$;
- R_0 est galiléen;
- le couple moteur sur l'étage fin d'élévation est noté $C_m(t)$;
- la liaison pivot entre l'étage fin d'élévation et l'étage gros d'élévation est supposée parfaite.

La vitesse d'ascension verticale du porteur est notée $\vec{V}(P \in \text{porteur}/R_0) = v(t) \cdot \vec{z}_0$ et son accélération est notée $\vec{\Gamma}(P \in \text{porteur}/R_0) = \gamma(t) \cdot \vec{z}_0$.

Les dérivées d'un paramètre $x(t)$ par rapport au temps seront notées : $\dot{x}(t) = \frac{dx(t)}{dt}$ et $\ddot{x}(t) = \frac{d^2x(t)}{dt^2}$.

Question 6 Montrer que $\vec{V}(G_{fe} \in fe/R_0)$, vecteur vitesse du point G_{fe} , centre d'inertie de l'étage fin d'élévation dans son mouvement par rapport à R_0 , peut s'écrire sous la forme : $\vec{V}(G_{fe} \in fe/R_0) = a(t) \cdot \vec{z}_0 + b(t) \cdot \vec{z}_e$. L'exprimer alors en fonction de $v(t)$, m_{cyl} , m_o , d , $\theta_{eo}(t)$ et $\dot{\theta}_{eo}(t)$.

Correction Le champ de vecteur vitesse du mouvement de l'ensemble fin élévation donne la relation : $\overrightarrow{V(G, fe/\mathcal{R}_0)} = \overrightarrow{V(P, fe/\mathcal{R}_0)} + \overrightarrow{\Omega(fe/\mathcal{R}_0)} \wedge \overrightarrow{PG_{fe}}$.

Une relation de composition de mouvement conduit à : $\overrightarrow{V(P, \text{porteur}/\mathcal{R}_0)} = \overrightarrow{V(P, \text{porteur}/\text{axe})} + \overrightarrow{V(P, \text{axe}/\text{ge})} + \overrightarrow{V(P, \text{ge}/fe)} + \overrightarrow{V(P, fe/\mathcal{R}_0)} = v(t)\vec{z}_0$ (le point P ayant la particularité de se trouver à l'intersection des axes des deux rotations considérées).

Ainsi la relation permet d'écrire : $\overrightarrow{V(G, fe/\mathcal{R}_0)} = v(t)\vec{z}_0 + \dot{\theta}_{ea}(t)\vec{y}_a \wedge \frac{m_o d}{m_o + m_{cyl}} \vec{x}_e = v(t)\vec{z}_0 - \dot{\theta}_{ea}(t) \frac{m_o d}{m_o + m_{cyl}} \vec{z}_e$

soit dans la base souhaitée : $\overrightarrow{V(G, fe/\mathcal{R}_0)} = v(t)\vec{z}_0 - \dot{\theta}_{ea}(t) \frac{m_o d}{m_o + m_{cyl}} (\sin \theta_{eo} \vec{x}_0 + \cos \theta_{eo} \vec{z}_0)$.

Question 7 Déterminer l'accélération $\vec{\Gamma}(G_{fe}, fe/R_0)$

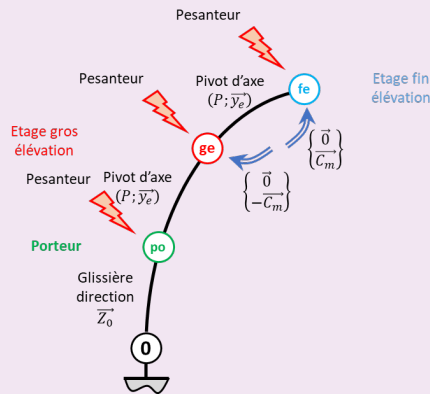
Correction Calcul de la résultante dynamique : $\overrightarrow{R_d(G/fe)\mathcal{R}_0} = m_{fe} \frac{d}{dt} \left[\overrightarrow{V(G, fe/\mathcal{R}_0)} \right]_{\mathcal{R}_0}$

$$= m_{fe} \left(\dot{v}(t)\vec{z}_0 - \ddot{\theta}_{ea}(t) \frac{m_o d}{m_o + m_{cyl}} (\sin \theta_{eo} \vec{x}_0 + \cos \theta_{eo} \vec{z}_0) - \dot{\theta}_{ea}^2(t) \frac{m_o d}{m_o + m_{cyl}} (\cos \theta_{eo} \vec{x}_0 - \sin \theta_{eo} \vec{z}_0) \right)$$

$$= m_{fe} \left(\dot{v}(t)\vec{z}_0 - \ddot{\theta}_{ea}(t) \frac{m_o d}{m_o + m_{cyl}} \vec{z}_e - \dot{\theta}_{ea}^2(t) \frac{m_o d}{m_o + m_{cyl}} \vec{x}_e \right)$$

Question 8 Isoler fe et faire le bilan des actions mécaniques en écrivant tous les torseurs en P

Correction



• BAME :

- pivot : $\{\mathcal{T}(ge \rightarrow fe)\} = \left\{ \begin{array}{l} X \vec{x}_e + Y \vec{y}_e + Z \vec{z}_e \\ L \vec{x}_e + N \vec{z}_e \end{array} \right\}_P$;
- couple moteur : $\{\mathcal{T}(mot \rightarrow fe)\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{0} \\ C_m(t) \vec{y}_e \end{array} \right\}_P$;
- pesanteur : $\{\mathcal{T}(pes \rightarrow fe)\} = \left\{ \begin{array}{l} -m_{fe} g \vec{Z}_0 \\ \vec{0} \end{array} \right\}_{G_{fe}}$. De plus,

$$\overrightarrow{\mathcal{M}}(P, pes \rightarrow fe) = \vec{0} + \overrightarrow{PG_{fe}} \wedge -m_{fe} g \vec{Z}_0 = \frac{m_o d}{m_o + m_{cyl}} \vec{x}_e \wedge -m_{fe} g \vec{Z}_0 = \frac{m_o d}{m_o + m_{cyl}} m_{fe} g \cos \theta \vec{y}_e$$

Question 9 Énoncer le théorème du moment dynamique appliqué à fe en P sans développer le calcul.

Correction

Question 10 Donner la relation liant le moment dynamique en P $\overrightarrow{\delta}(P, fe/R_0)$ à celui en G_{fe} $\overrightarrow{\delta}(G_{fe}, fe/R_0)$

Correction

Question 11 Déterminer le moment cinétique $\overrightarrow{\sigma}(G_{fe}, fe/R_0)$ puis le moment dynamique au même point : $\overrightarrow{\delta}(G_{fe}, fe/R_0)$

Correction Calcul du moment cinétique en un point quelconque :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{\sigma}(P_{fe}, fe/\mathcal{R}_0) &= I_{P_{fe}}(fe) \overrightarrow{\Omega}(fe/\mathcal{R}_0) + m_{fe} \overrightarrow{PG_{fe}} \wedge \overrightarrow{V}(P, \mathcal{R}_0) \\ &= I_{P_{fe}}(fe) \dot{\theta} \vec{y}_e + m_{fe} \frac{m_o d}{m_o + m_{cyl}} \vec{x}_e \wedge v \vec{Z}_0 = (B_{cyl} + B_o + m_o d^2) \dot{\theta} \vec{y}_e + m_{fe} \frac{m_o d}{m_o + m_{cyl}} v (-\cos \theta) \vec{y}_e. \end{aligned}$$

Question 12 En déduire le moment dynamique : $\overrightarrow{\delta}(P, fe/R_0)$

Correction Calcul du moment dynamique en un point quelconque :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{\delta}(P_{fe}, fe/\mathcal{R}_0) &= \frac{d}{dt} \left[\overrightarrow{\sigma}(P_{fe}, fe/\mathcal{R}_0) \right]_{\mathcal{R}_0} + \overrightarrow{V}(P, \mathcal{R}_0) \wedge m_{fe} \overrightarrow{V}(G_{fe}, fe/\mathcal{R}_0) \\ &= (B_{cyl} + B_o + m_o d^2) \ddot{\theta} \vec{y}_e + m_{fe} \frac{m_o d}{m_o + m_{cyl}} (-\dot{v} \cos \theta + v \dot{\theta} \sin \theta) \vec{y}_e + m_{fe} v \vec{Z}_0 \wedge \left(v(t) \vec{Z}_0 - \dot{\theta}_{ea}(t) \frac{m_o d}{m_o + m_{cyl}} \vec{z}_e \right) \\ &= (B_{cyl} + B_o + m_o d^2) \ddot{\theta} \vec{y}_e + m_{fe} \frac{m_o d}{m_o + m_{cyl}} (-\dot{v} \cos \theta + v \dot{\theta} \sin \theta) \vec{y}_e + m_{fe} v \left(-\dot{\theta}_{ea}(t) \frac{m_o d}{m_o + m_{cyl}} \right) \sin \theta \vec{y}_e \\ &= (B_{cyl} + B_o + m_o d^2) \ddot{\theta} \vec{y}_e - m_{fe} \frac{m_o d}{m_o + m_{cyl}} \dot{v} \cos \theta \vec{y}_e \end{aligned}$$

Question 13 En déduire l'équation différentielle régissant le mouvement de l'étage fin d'élévation par rapport au référentiel galiléen R_0 .

Correction En appliquant le théorème du moment dynamique au solide fe au point P en projection sur \vec{y}_e , on a donc :

$$(B_{\text{cyl}} + B_o + m_o d^2) \ddot{\theta} - m_{\text{fe}} \frac{m_o d}{m_o + m_{\text{cyl}}} \dot{v} \cos \theta = \frac{m_o d}{m_o + m_{\text{cyl}}} m_{\text{fe}} g \cos \theta.$$

Les valeurs numériques suivantes sont données : $m_o = 1,4 \text{ kg}$; $d = 0,01 \text{ m}$; $|\gamma(t)|_{\text{MAXI NH90}} = 1,8 \text{ g}$, avec $g \approx 9,81 \text{ ms}^{-2}$.

Les couples perturbateurs voisins du dixième de la valeur du couple moteur maximal seront négligés vis-à-vis de ce dernier lors de la conception de la commande. Pour l'étage fin d'élévation, le couple moteur maximal est voisin de 3 Nm .

Question 14 Dans la phase de vol étudiée, donner sous forme littérale l'expression du couple de perturbation issu du déport de masse d , noté C_{pert} . Calculer la valeur numérique maximale de C_{pert} , notée C_{pertMAXI} , dans le cas le plus défavorable. Conclure sur la pertinence de la prise en compte de cette perturbation pour la conception de la commande de l'étage fin d'élévation.

Correction Le couple perturbateur dû au déport de masse contient le terme de gravité ainsi que le terme d'accélération soit $C_{\text{pert}} = \gamma(t) m_o d \cos \theta_{eo} + m_o d g \cos \theta_{eo}$.

Les conditions les plus défavorables sont quant le terme en cosinus vaut 1 soit après application numérique : $C_{\text{pert}} = 1,4 \times 0,01 \times 9,81 \times (1 + 1,8) \simeq 0,385 \text{ Nm}$.

Cela reste de l'ordre du dixième du couple moteur proposé ($\simeq 3 \text{ Nm}$), on peut donc le considérer comme négligeable.