

## 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 1. 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 6.

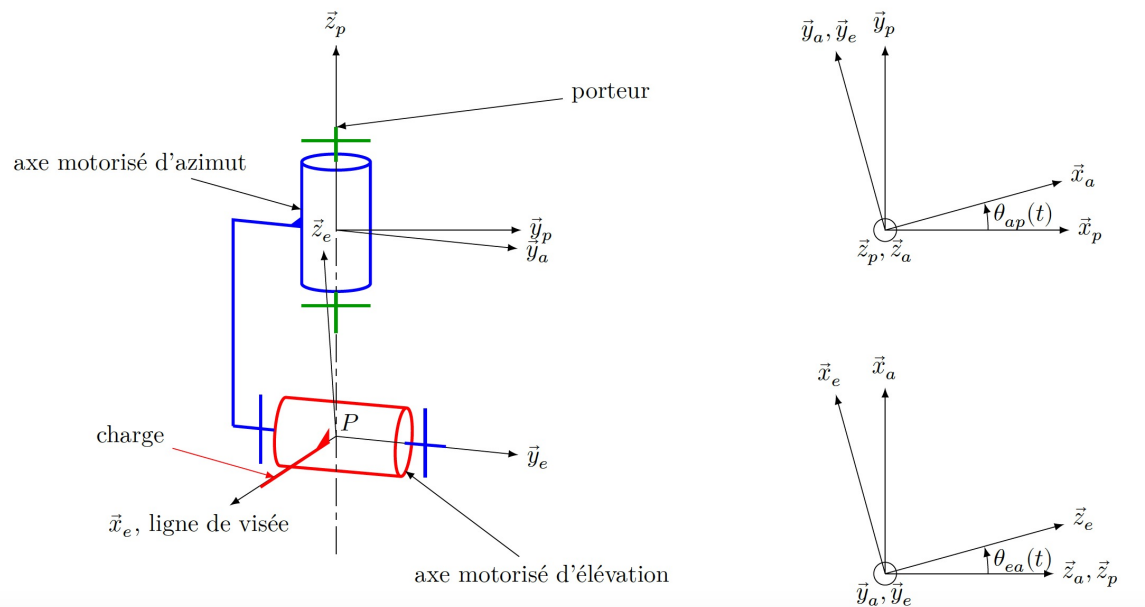


FIGURE 1 – Modèle cinématique global paramétré du FLIR, motorisations enlevées

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.

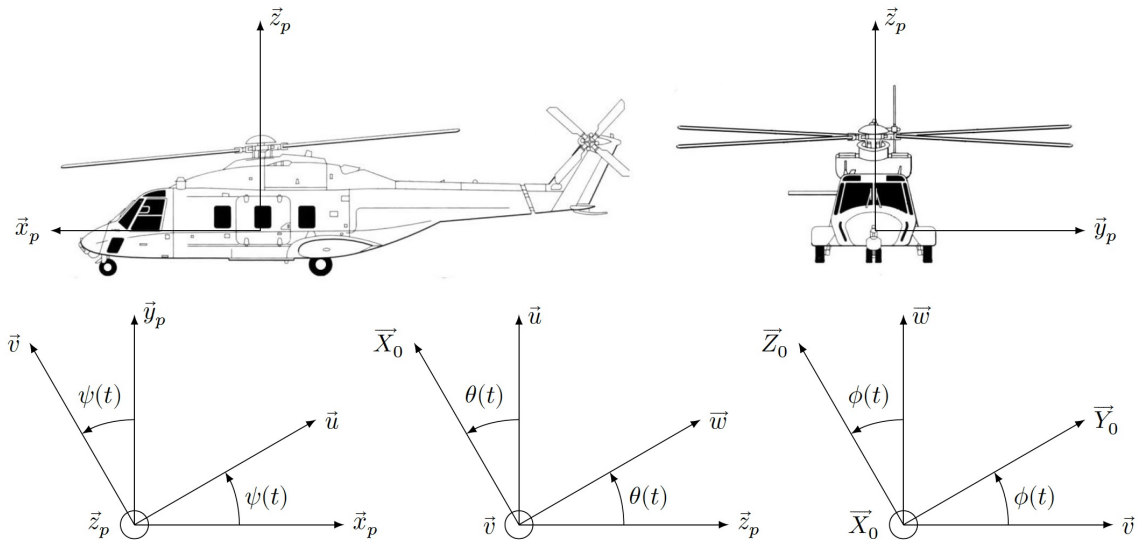


FIGURE 2 – Porteur NH90 et son orientation par rapport au référentiel terrestre

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 7, 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.

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.

## 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 8 et 9). 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.

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



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

motorisation permettent d'atteindre des accélérations et des vitesses élevées. Cependant, l'amplitude du mouvement de l'étage fin est limitée.

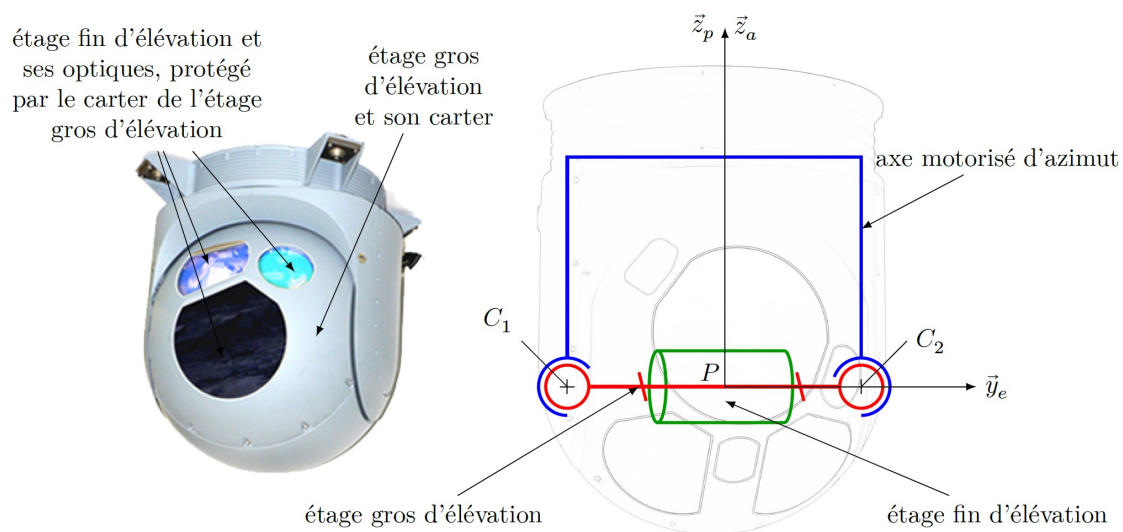


FIGURE 4 – FLIR et modèle cinématique de l'axe motorisé d'élévation

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 9, 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.

**Question 4** À l'aide de l'abaque donné figure 10, 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.

## 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 11) :

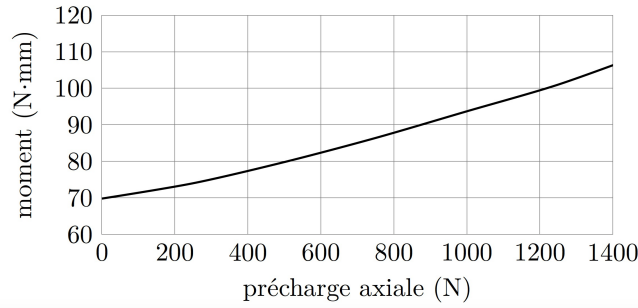


FIGURE 5 – Moment de frottement sec d'un seul composant à éléments roulants du guidage en rotation de l'étage gros d'élévation par rapport à l'axe motorisé d'azimut, en fonction de la précharge axiale (source : SKF)

- 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.

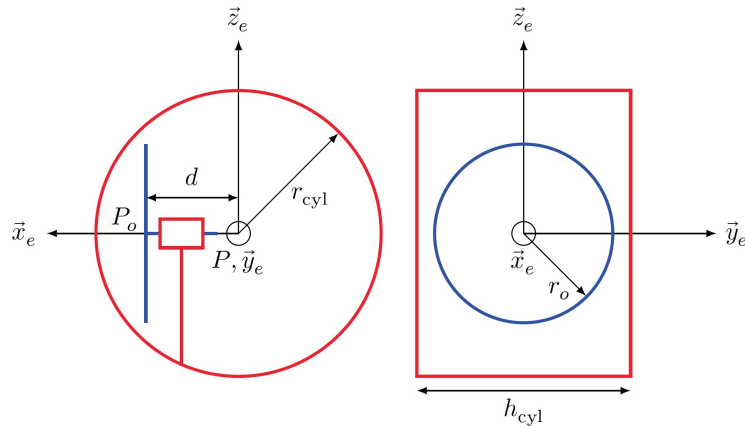


FIGURE 6 – Modélisation de la géométrie des masses de l'étage fin d'élévation

- 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  $\bar{\bar{I}}_P(f_e)$  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  $d$ .

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,  $\theta_{e0}(t) = \theta_{ea}(t)$ ;
- $R_0$  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  $\dot{\theta}_{eo}(t)$ .

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

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

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

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

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

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

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

Les valeurs numériques suivantes sont données :  $m_o = 1,4 \text{ kg}$ ;  $d = 0,01 \text{ m}$ ;  $|\gamma(t)|_{\text{MAXI NH90}} = 1,8g$ , 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  $3 \text{ Nm}$ .

**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  $C_{\text{pert}}$ . Calculer la valeur numérique maximale de  $C_{\text{pert}}$ , notée  $C_{\text{pertMAXI}}$ , 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.