

1 Dynamique

devoir 1 - Vision en réalité augmentée pour hélicoptère

adapté à partir du Centrale Supélec PSI-2014

Corrigé page 10

Les questions et paragraphes en italiques ont été rajoutées au sujet original.

A. Contexte



FIGURE 1 – Hélicoptère NH90 équipé du système de vision en réalité augmentée

Les hélicoptères sont des aéronefs dont l'un des intérêts est de pouvoir effectuer des vols proches du relief. Suivant les conditions climatiques (tempête de sable, brouillard ou vol de nuit par exemple), la propre vision du pilote et l'instrumentation de navigation classique peuvent être insuffisantes pour assurer la sécurité du vol. Pour pallier cela, la société Thalès propose un système de vision en réalité augmentée composée du casque TopOwl et d'un FLIR (Forward Looking InfraRed). La vision en réalité augmentée consiste à venir projeter sur la visière du casque TopOwl une image prise par une des caméras du FLIR. L'image projetée se superpose au paysage visible à travers la visière de façon à améliorer la vision du pilote.

De nuit, par temps de brouillard ou de tempête, l'image peut être une image infra-rouge ou thermique. En plus de l'image, des informations peuvent être ajoutées sur la projection ; par exemple des données GPS, des routes, des informations de vol.

Le FLIR est une boule optronique modulaire pouvant intégrer plusieurs capteurs différents dont une caméra thermique, une caméra couleur TV HD, ainsi qu'une caméra très bas niveau de lumière. Cet ensemble est orientable et gyro-stabilisé, c'est-à-dire en particulier que les caméras sont capables de garder une même ligne de visée par rapport au référentiel terrestre, quels que soient les mouvements de l'hélicoptère NH90 qui sera appelé porteur dans la suite du sujet. Le casque TopOwl est placé sur la tête du pilote et le FLIR sur l'avant du porteur.

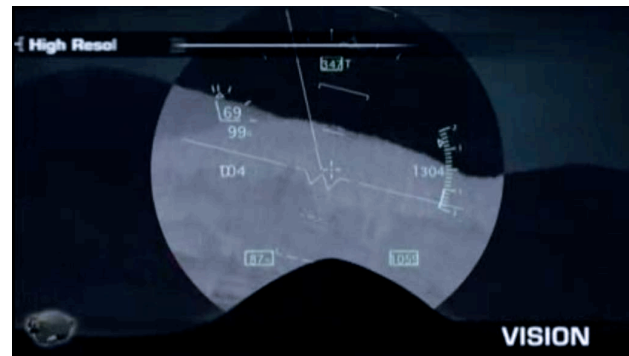


FIGURE 2 – Vision nocturne et affichage des informations de vol

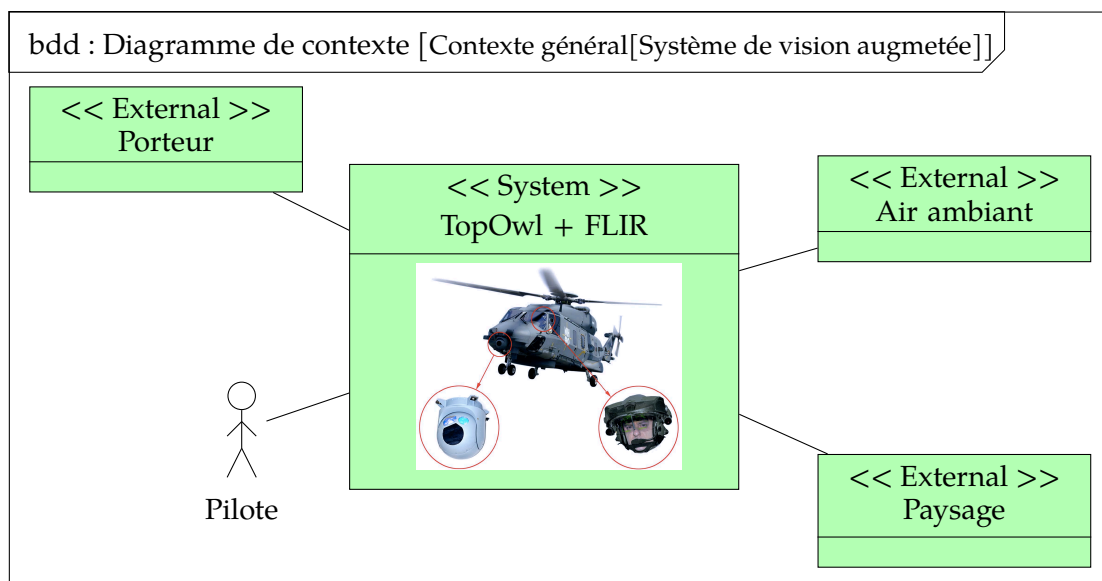


FIGURE 3 – Diagramme de contexte – Antenne de liaison par satellite

Une étude relative à la physique du casque TopOwl a permis de déterminer certaines de ses performances qui seront données au moment opportun. Ce sujet a pour objet l'étude des performances du sous-système FLIR, intégré dans le système de vision en réalité augmentée. La problématique globale est de vérifier que l'image projetée sur la visière du casque TopOwl est utilisable par le pilote, c'est-à-dire :

- que la ligne de visée des caméras est conforme à la ligne de visée du pilote (les lignes de visée sont définies par rapport au référentiel terrestre) ;
- que le retard entre la prise de vue et son affichage n'est pas visible par le pilote (retard inférieur à la persistance rétinienne) ;
- que la prise de vue n'est pas perturbée par les mouvements du porteur.

L'étude se décompose en trois parties. Une étude de la physique du casque TopOwl ayant été effectuée dans le sujet de physique, la partie I porte sur la détermination des performances (rapidité et précision) à atteindre par le sous-système FLIR en fonction du cahier des charges du système de vision en réalité augmentée et des performances des autres sous-systèmes. L'objectif de la partie II est d'analyser le choix d'architecture du FLIR en vue de valider les hypothèses simplificatrices concernant son comportement. La partie III consiste à vérifier si les solutions retenues, tant au niveau de l'architecture que de la commande, permettent d'atteindre les performances attendues du FLIR.

Exigences	Critère	Valeur
id1 : Superposer une image du paysage à la vision du pilote	Résolution (largeur du plus petit objet visible sur l'image)	1 m pour un objet situé à 1 km de distance du pilote
	Précision (décalage entre l'image projetée sur la visière du TopOwl et le paysage réel)	Erreur de superposition inférieure ou égale à 1 pixel
	Latence d'affichage (temps entre la prise de vue et son affichage sur la visière du TopOwl)	Inférieure ou égale à la persistance rétinienne ($t_{ret} \leq 120$ ms)
	Stabilité de l'image projetée sur la visière	Oscillations d'amplitude inférieure à 1/2 pixel

FIGURE 4 – Cahier des charges partiel du système de vision en réalité augmentée

B. Performances attendues du sous-système FLIR intégré au système de vision en réalité augmentée

Objectif : Déterminer les performances de rapidité et de précision d'orientation de la ligne de visée du sous-système FLIR qui permettent de satisfaire le cahier des charges du système de vision en réalité augmentée pour hélicoptère.

B.1. Validation des performances simulées du FLIR

Le sous-système de détection de posture, appelé DDP, placé sur le casque TopOwl permet d'acquérir l'orientation spatiale de la tête du pilote par rapport au cockpit du porteur (3 angles de rotation). Cette information, couplée à l'information de position et d'orientation du porteur par rapport à la Terre (délivrée par une centrale inertielle fixée au porteur), permet d'élaborer la commande d'orientation du FLIR afin que sa ligne de visée corresponde à la ligne de visée du pilote. À partir d'un algorithme, une centrale de traitement d'image permet de calculer l'image à afficher sur la visière du casque TopOwl et les informations éventuelles à ajouter, comme celles issues de la position GPS par exemple.

B.2. Détermination des performances du FLIR

Le sujet de physique a permis de déterminer que le système de détection de posture (DDP) a besoin d'un temps noté t_{ddp} égal à 20 ms pour acquérir l'information. De même, le temps de traitement de l'information par filtrage noté t_{filtre} est égal à 5 ms.

On donne les temps suivants pour la réalisation des tâches :

- les temps d'acquisition des informations par les capteurs autres que la DDP sont négligeables devant les autres temps ;
- le temps d'acquisition de l'image par les caméras du FLIR est négligeable devant les autres temps ;
- le temps de traitement des informations issues des caméras du FLIR (traitement des images) est noté $t_{trait} = 50$ ms maximum ;
- le temps mis par le TopOwl pour afficher l'image est noté $t_{com} = 5$ ms .

Q1. À l'aide de la description structuro-fonctionnelle de la figure 5, déterminer littéralement et numériquement en fonction des données précédentes le temps maximal disponible pour orienter les caméras du FLIR, noté $t_{disponible}$, qui permet de vérifier le troisième critère de l'exigence **id1**.

Le format choisi correspond à une image rectangulaire de 1024 pixels de large et 768 pixels de haut. Cette image est projetée deux fois sur la visière, une projection pour chaque oeil du pilote. Les deux projections se chevauchent entièrement (Binocular full overlap). La visière se trouve à 5 cm des yeux

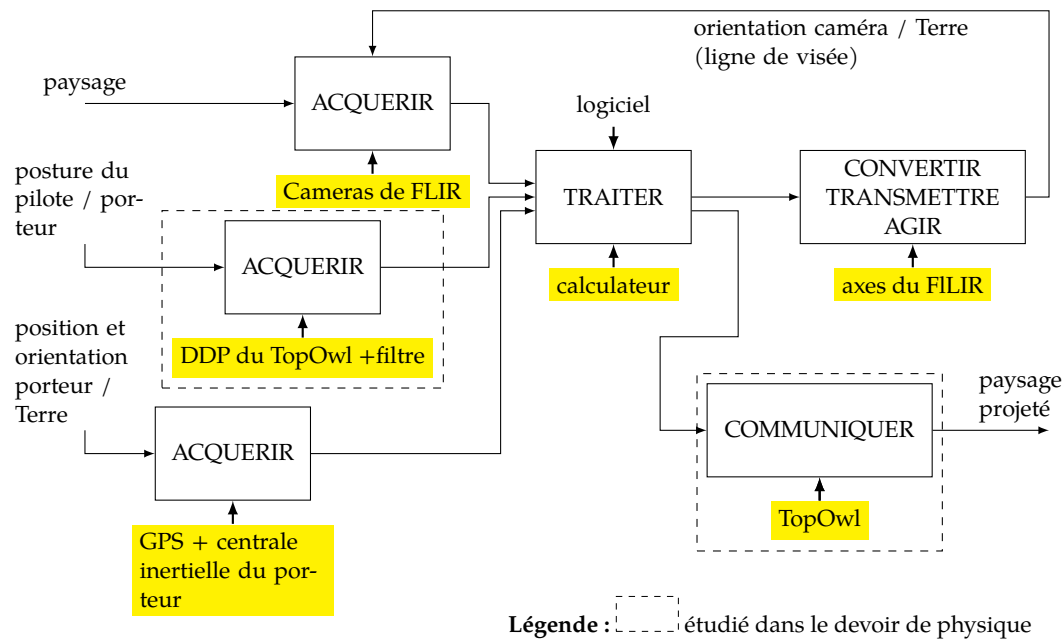


FIGURE 5 – Description structuro-fonctionnelle du système de vision en réalité augmentée

du pilote et chaque image est projetée de façon à occuper entièrement le champ de vision le plus large possible permettant la reconnaissance des mots.

Q2. . Calculer à partir des informations précédentes et de la figure 6 la largeur d'un pixel (en mm) projeté sur la visière. Conclure quant au respect du critère de résolution d'affichage de l'exigence **id1**.

Q3. . Déterminer l'écart angulaire maximal admissible, exprimé en rad, entre la ligne de visée du pilote et la ligne de visée des caméras qui permet de respecter le critère de précision de l'exigence **id1**.

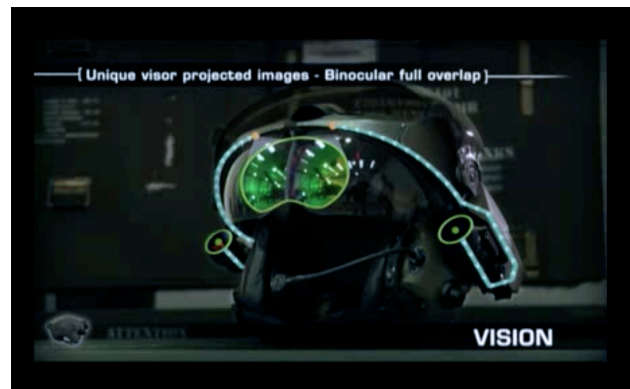
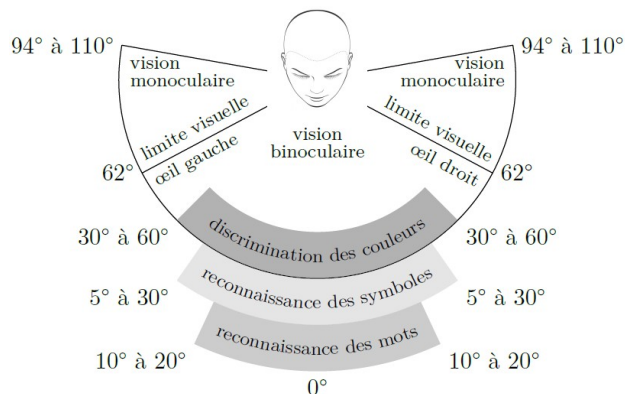


FIGURE 6 – Champ de vision humain et projection des deux images sur la visière

Afin de vérifier les performances du FLIR qui viennent d'être déterminées, et compte tenu de son niveau de complexité élevé, il est nécessaire d'émettre et de valider des hypothèses simplificatrices de modélisation relatives à son comportement.

C. 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 I.

Valider des hypothèses simplificatrices afin de pouvoir évaluer les performances du FLIR.

C.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 7.

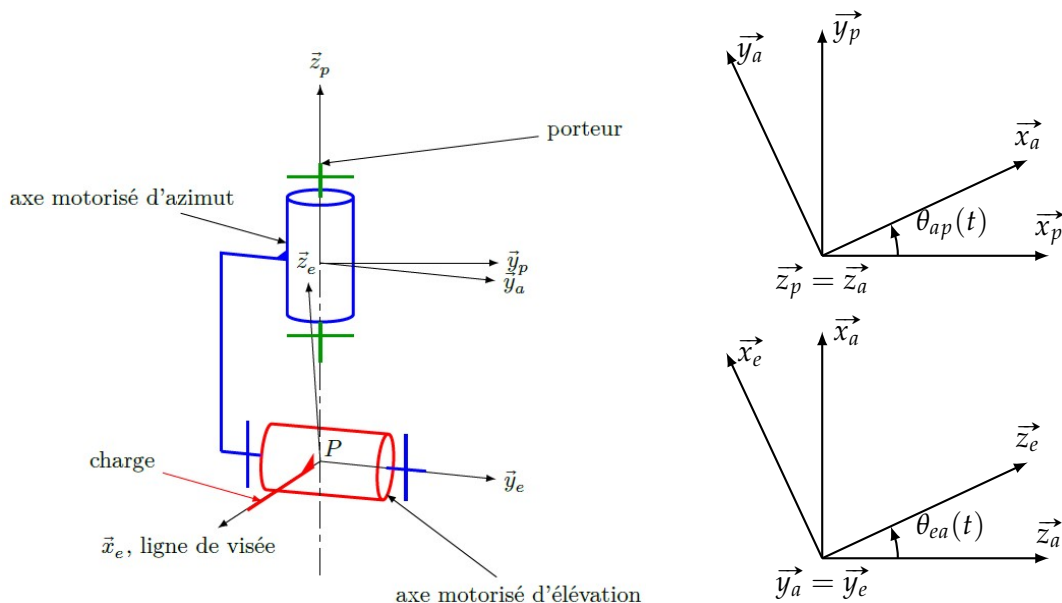


FIGURE 7 – Modèle cinématique global paramétré du FLIR, motorisations enlevées

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 ;
- $R_0 = (O_0, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ 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.

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 8, avec :

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

Q4. 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.

Q5. 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.

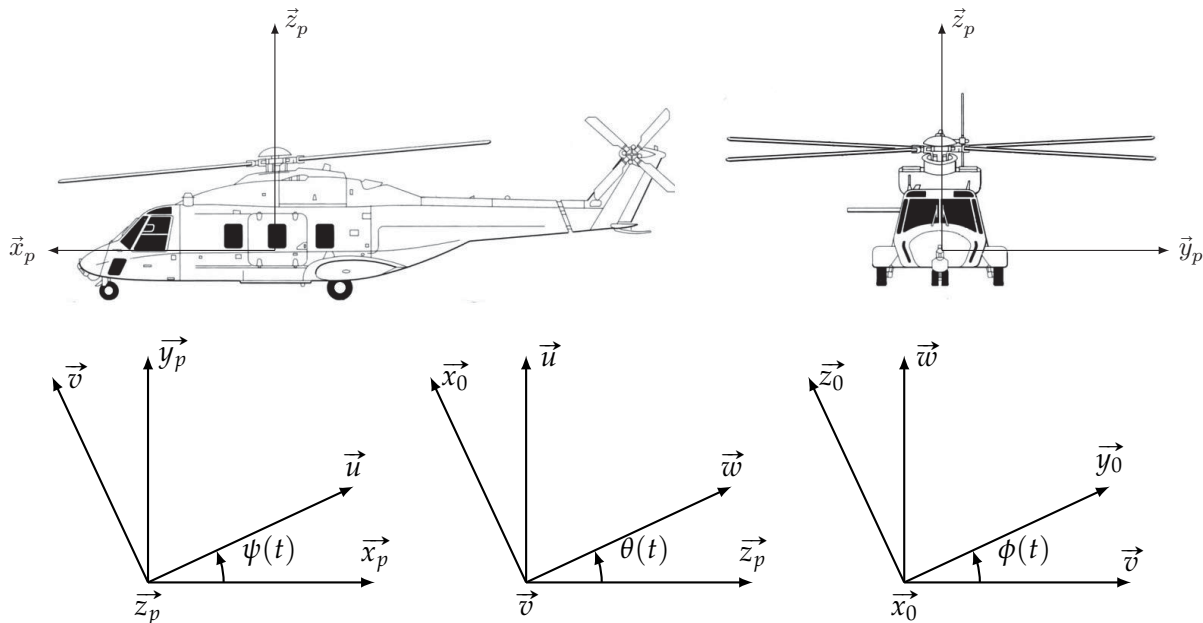


FIGURE 8 – Porteur NH90 et son orientation par rapport au référentiel terrestre

C.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.

Limitation de l'étude à l'axe motorisé d'élévation

La charge mue par l'axe motorisé d'élévation est essentiellement constituée de caméras et de cartes électroniques associées. Les ingénieurs ont choisi de disposer ces composants de telle sorte que la répartition des masses de cette charge s'approche au mieux de celle d'un cylindre plein et homogène d'axe (P, \vec{y}_e) de la figure 7.

Q6. Justifier que le choix de la répartition des composants de la charge, dans le cas du mouvement simultané des deux axes motorisés décrits sur la figure 7, permet de commander l'axe d'azimut indépendamment de l'axe motorisé d'élévation.

Les résultats d'essais en vol montrent que l'axe qui subit le plus de perturbations est l'axe motorisé d'élévation. Les commandes des axes d'élévation et d'azimut étant indépendantes l'une de l'autre, la suite de l'étude se limitera uniquement à l'axe motorisé d'élévation.

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 fi-



FIGURE 9 – Intérieur du FLIR, vue des optiques des caméras liées à l'étage fin d'élévation

gures 9 et 10). Le premier étage, appelé étage gros d'élévation (g_e), 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 (f_e), est protégé des effets aérodynamiques grâce au carter sphérique solide 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.

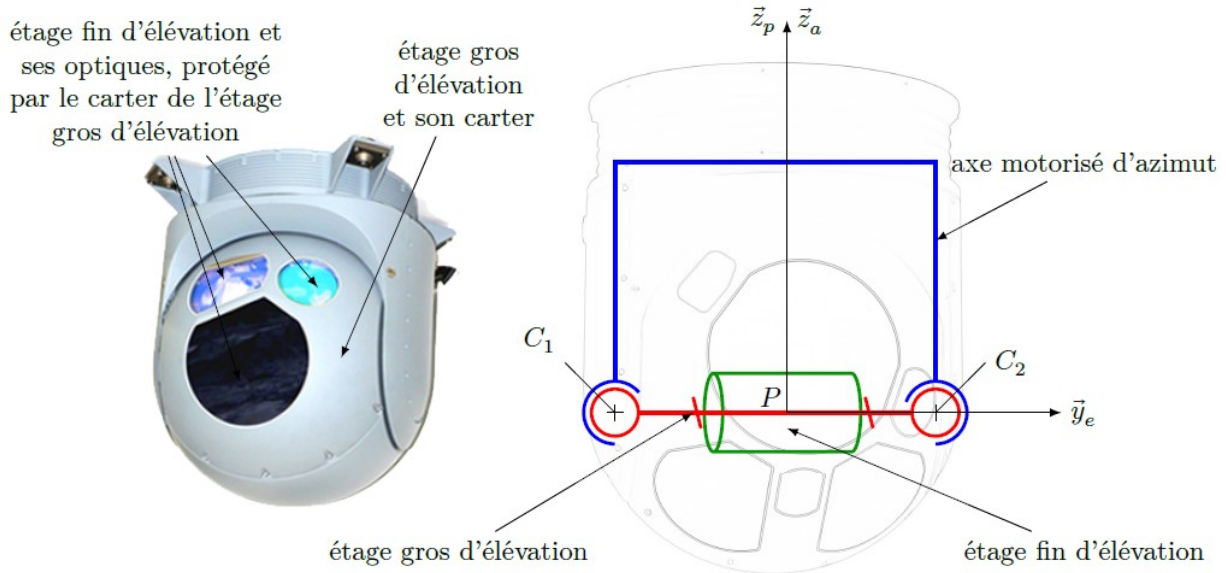


FIGURE 10 – FLIR et modèle cinématique de l'axe motorisé d'élévation

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 . Q7. À l'aide de la figure 10, 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.

Cette précharge, génère un couple de frottement qui s'oppose au mouvement des deux pièces (voir figure 11).

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 $0,18 \text{ N} \cdot \text{m}$

Q8. À l'aide de l'abaque donné figure 11, déterminer une valeur de réglage pertinente de la précharge

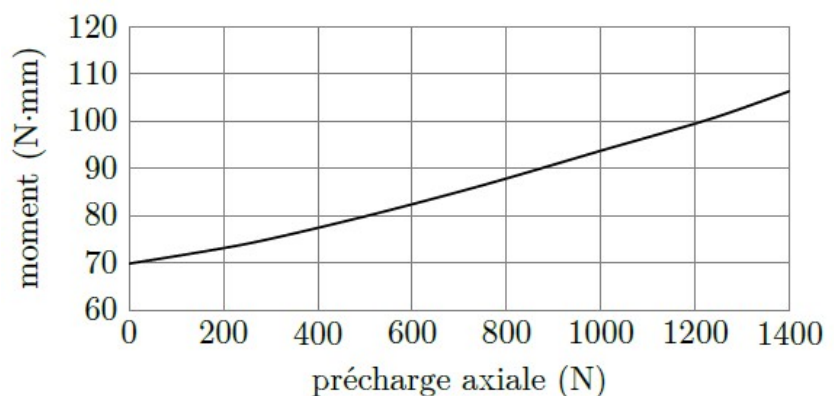


FIGURE 11 – Moment de frottement sec d'un seul composant à éléments roulants du guidage en rotation de l'étage gros d'élévation par rapport à l'axe motorisé d'azimut, en fonction de la précharge axiale (source : SKF)

du guidage en rotation de l'étage gros d'élévation par rapport à l'axe motorisé d'azimut.

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 12) :

- un disque plein et homogène d'axe (P_0, \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 $\overrightarrow{PP_0} = d \cdot \vec{x}_e$, est constante.

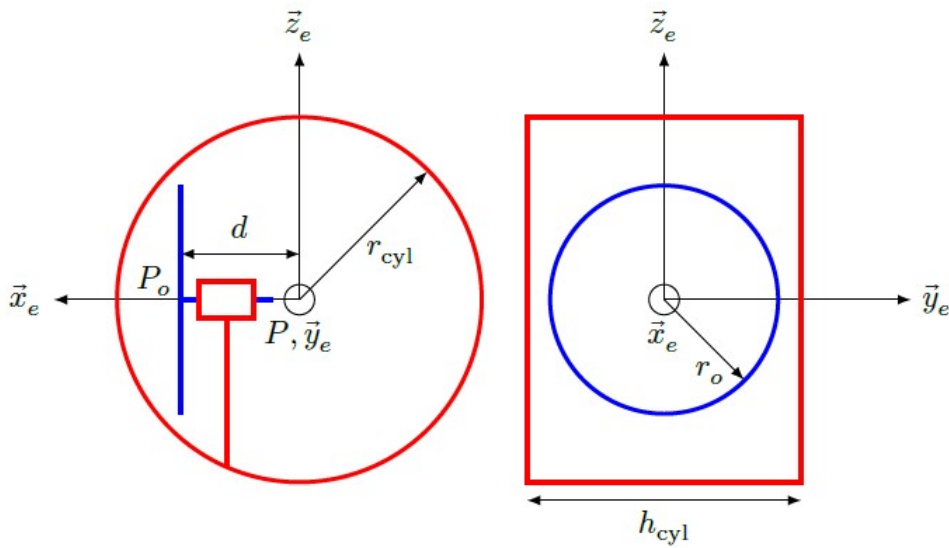


FIGURE 12 – Modélisation de la géométrie des masses de l'étage fin d'élévation

L'opérateur d'inertie du cylindre plein, noté cyl , est de la forme suivante :

$$\overline{\overline{\mathcal{I}_P(cyl)}} = \begin{pmatrix} A_{cyl} & 0 & 0 \\ 0 & B_{cyl} & 0 \\ 0 & 0 & A_{cyl} \end{pmatrix}_{P, \begin{matrix} \vec{x}_e, \vec{y}_e, \vec{z}_e \end{matrix}}$$

L'opérateur d'inertie des optiques, noté o , est de la forme suivante :

$$\overline{\overline{\mathcal{I}_{P_0}(o)}} = \begin{pmatrix} A_o & 0 & 0 \\ 0 & B_o & 0 \\ 0 & 0 & B_o \end{pmatrix}_{P_0, \begin{matrix} \vec{x}_e, \vec{y}_e, \vec{z}_e \end{matrix}}$$

L'étage fin d'élévation est noté f_e , sa masse est égale à $m_{f_e} = m_{cyl} + m_o$, son centre d'inertie est noté G_{f_e} .

Q9. Justifier la forme des deux opérateurs d'inertie.

Q10. Préciser les coefficients de $\overline{\overline{\mathcal{I}_P(cyl)}}$ en fonction de m_{cyl} , r_{cyl} et h_{cyl} et ceux de $\overline{\overline{\mathcal{I}_{P_0}(o)}}$ en fonction de m_o , r_o et d .

Q11. Déterminer littéralement l'opérateur d'inertie $\overline{\overline{\mathcal{I}_P(f_e)}}$ de l'étage fin d'élévation en fonction de A_{cyl} , B_{cyl} , A_o , B_o , d , m_o dans le repère R_e , puis exprimer le vecteur $\overrightarrow{PG_{f_e}}$ 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 $\phi(t)$, $\theta(t)$ et $\psi(t)$ sont constants et nuls ;
- $\theta_{ap}(t) = 0$;

- $\vec{z}_p = \vec{z}_a = \vec{z}_0$ vertical ascendant, $\vec{x}_p = \vec{x}_a = \vec{x}_0$ et $\vec{y}_p = \vec{y}_a = \vec{y}_0$;
- 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 $\theta_{e0}(t)$ de l'étage fin d'élévation par rapport à R_0 . Dans cette $\theta_{e0}(t) = \theta_{ea}(t)$;
- 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 $\vec{V}_{P,\text{porteur}/R_0} = v(t) \cdot \vec{z}_0$ et son accélération est notée $\vec{\Gamma}_{P,\text{porteur}/R_0} = \gamma(t) \cdot \vec{z}_0$.

Les dérivées d'un paramètre $x(t)$ par rapport au temps seront notées :

$$\dot{x}(t) = \frac{dx(t)}{dt} \text{ et } \ddot{x}(t) = \frac{d^2x(t)}{dt^2}.$$

Q12. Déterminer le torseur cinématique $\{V_{fe/R_0}\}$ de l'étage fin élévation par rapport au repère R_0 en G_{fe} centre d'inertie de l'étage fin d'élévation dans son mouvement par rapport à R_0 , en fonction de $v(t)$, $m_{cyl, 0}$, d , $\theta_{e0}(t)$ et $\dot{\theta}_{e0}(t)$ de la manière la plus simple possible puis en projection dans R_0 .

Q13. Par application du théorème du moment dynamique et en précisant rigoureusement les étapes de la démarche utilisée, écrire l'équation différentielle régissant le mouvement de l'étage fin d'élévation par rapport au référentiel galiléen R_0 . pour cela :

Q13a. Déterminer l'accélération du centre d'inertie G_{fe} de l'étage de fin élévation dans son mouvement par rapport au repère R_0 de la manière la plus simple possible.

Q13b. Déterminer le torseur cinétique $\{C_{fe/R_0}\}$ de l'étage de fin élévation dans son mouvement par rapport au repère R_0 en G_{fe} .

Q13c. Déterminer le torseur dynamique $\{D_{fe/R_0}\}$ de l'étage de fin élévation dans son mouvement par rapport au repère R_0 en G_{fe} .

Q13d. Déterminer, $\vec{\delta}_{P_{fe}/R_0}$, le moment dynamique en P de l'étage de fin élévation dans son mouvement par rapport au repère R_0 .

Q13e. Établir l'inventaire des actions mécaniques extérieures à l'étage fin élévation.

Q13f. Par application du théorème du moment dynamique écrire 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 : $m_o = 1,4 \text{ kg}$; $d = 0,01 \text{ m}$; $|\gamma(t)|_{MAXI \text{ NH90}} = 1,8 \cdot g$, avec $g \approx 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

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 $3 \text{ N} \cdot \text{m}$.

Q14. 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.