



Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système
IMS - UMR 5131 CNRS – Département du LAPS
Université de Bordeaux I - France

<http://www.laps.u-bordeaux1.fr/aria>



Alexandre Falcoz

Directeur de thèse: Ali ZOLGHADRI

Codirecteur de thèse: David HENRY



Diagnostic de pannes à bord des véhicules expérimentaux de rentrée atmosphérique

“ Application à la phase d’atterrissage du HL-20 ”

Sommaire

- **Contexte**
- **La rentrée atmosphérique: L'enjeu du diagnostic**
- **Modèle dynamique du HL-20 et de son GNC**
- **Diagnostics des actionneurs du HL-20**
- **Conclusions & Perspectives**

Contexte

- **Présentation du projet SICVER**

- **Contexte de la thèse**
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives



- Incline dans le pôle de compétitivité Midi-Pyrénées – Aquitaine AESE (Aéronautique, Espace et Systèmes Embarqués),
- Intégré dans les activités Stratégiques Accès à l'Espace et infrastructures orbitales,
- Constitue un des thèmes du projet global Véhicules Expérimentaux de Rentrée (VER) – Véhicules d'Exploration Planétaire (VEP)

- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives



- Développement de stratégies innovantes pour le guidage, la navigation et le contrôle et l'autonomie des RLV



➤ Scindé en 2 thèses:

- ↪ 1- Guidage et replanification de trajectoires . Algorithmes basés sur la théorie de la platitude et les techniques de collocation,
- ↪ 2- Conception d'un système embarqué de diagnostic de panne et de reconfiguration pour les véhicules expérimentaux de rentrée .

- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives



La rentrée atmosphérique: L'enjeu du diagnostic

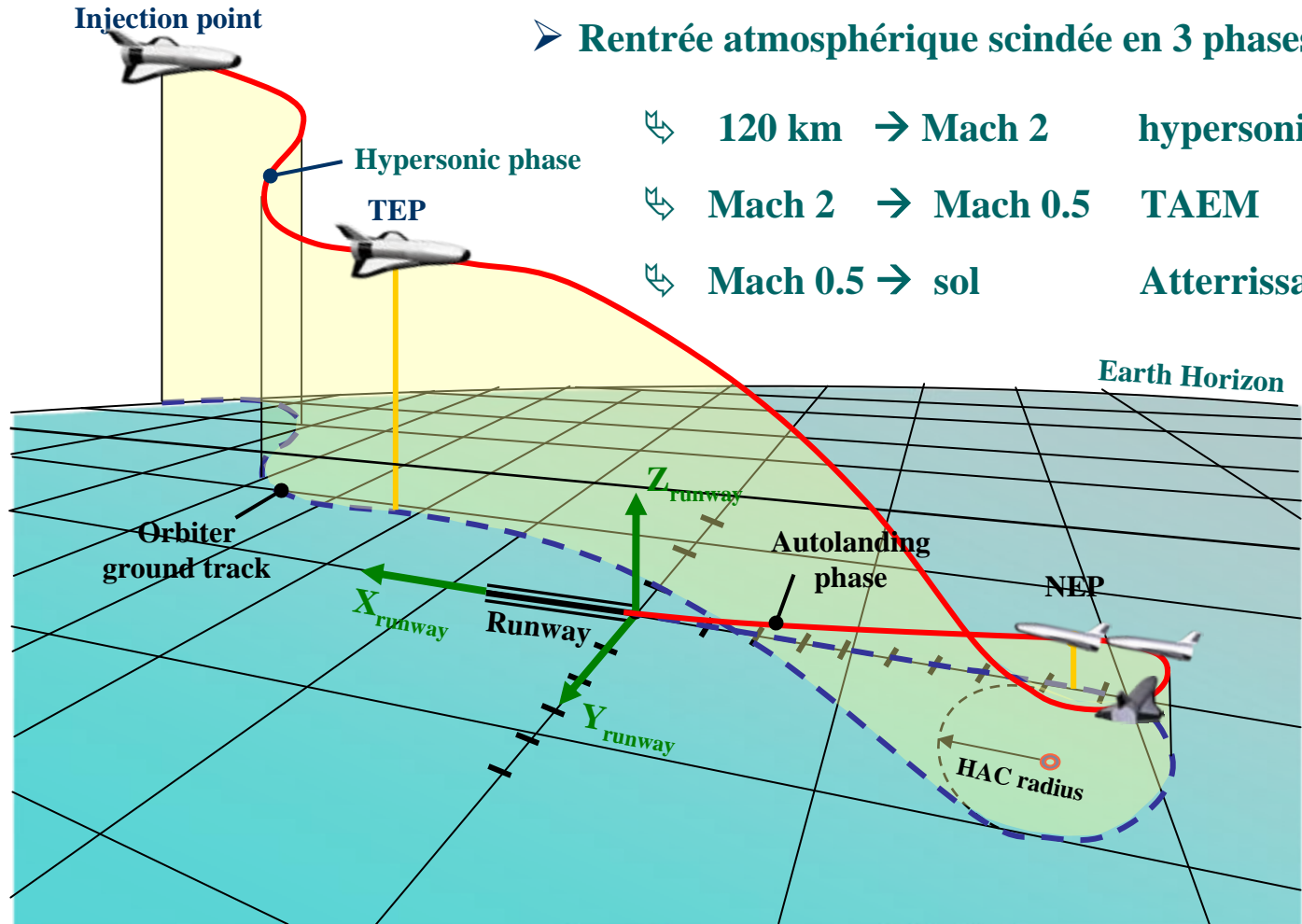
- Caractéristiques d'une rentrée atmosphérique
- Contraintes et spécifications du système de diagnostic
- Présentation du HL-20 et des scénarios défailants considérés

- Contexte de la thèse
- **Problématique liée à la rentrée atmosphérique**
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives

Caractéristiques d'une rentrée atmosphérique

➤ Rentrée atmosphérique scindée en 3 phases:

- ↪ 120 km → Mach 2 hypersonique
- ↪ Mach 2 → Mach 0.5 TAEM
- ↪ Mach 0.5 → sol Atterrissage



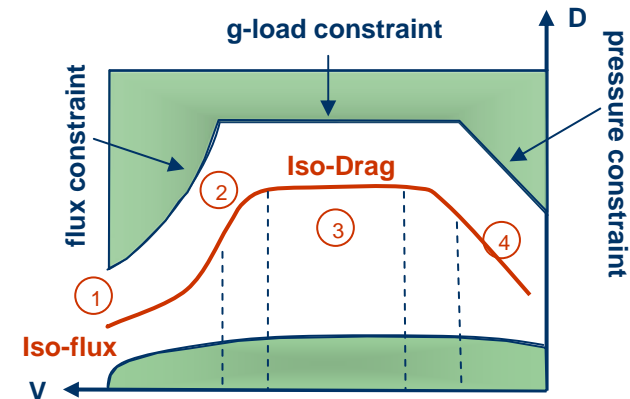
- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives

Caractéristiques d'une rentrée atmosphérique

● Contraintes à respecter:

- Phase hypersonique caractérisée par un niveau énergétique important à dissiper graduellement pendant la descente en respectant les contraintes sur:

- ↪ le flux thermique, pression dynamique
- ↪ le facteur de charge
- ↪ contrainte de non-rebond et point visé



- Phase TAEM également caractérisée par un niveau énergétique encore élevé :

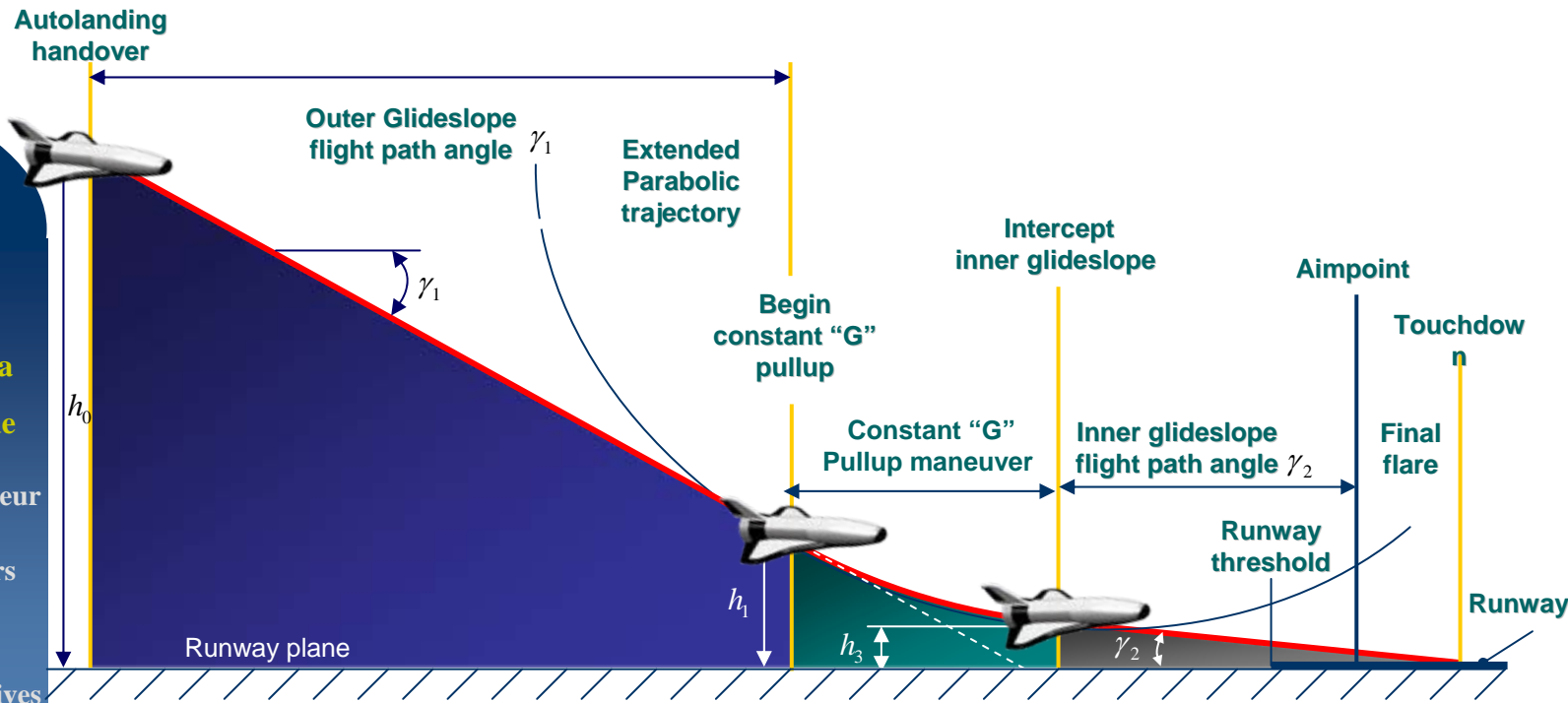
- ↪ contraintes principales sur le facteur de charge et la pression dynamique,
- ↪ contraintes sur les conditions cinématiques finales (positions, vitesse),

- Contexte de la thèse
- **Problématique liée à la rentrée atmosphérique**
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives

Caractéristiques d'une rentrée atmosphérique

➤ Phase Auto-Landing caractérisée par:

- Enveloppe de vol réduite (vitesse, rayon de virage,...),
- Apparition d'un défaut: risque de perte du véhicule (décrochage,...)



- Contexte de la thèse
- **Problématique liée à la rentrée atmosphérique**
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives

➤ Mettre en place un système de diagnostic :

- ↪ permettant de détecter et d'isoler des défauts actionneurs (et capteurs)
- ↪ avec un retard à la détection le plus faible possible pour engager au plus tôt des actions de reconfiguration de lois de guidage, pilotage et replanification de trajectoire,....
- ↪ robuste:
 - vis-à-vis d'une grande classe de perturbations exogènes liées aux conditions atmosphériques (vents, turbulences,..) et bruits de mesure (parasites atmosphériques, ...), ordres de guidage
 - vis-à-vis des incertitudes de modèle (masse, CoG, moment d'inertie) ou des incertitudes liées à la méconnaissance des phénomènes atmosphériques (densité, pression, coeff aéro,...),
- ↪ Facilement embarquable en termes:
 - charge de calcul (ordre du filtre le plus faible possible),
 - de stratégie de décision (éviter le découplage longi/lateral)
- ↪ Adaptable à toutes les phases de vol d'une rentrée atmosphérique:
 - phase hypersonique critique (Blackout)

- Contexte de la thèse
- **Problématique liée à la rentrée atmosphérique**
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives



- **Conçu pour effectuer des missions spatiales habitées:**
 - ↪ missions de secours orbitale,
 - ↪ Echange d'équipage, ravitaillement de l'ISS,
 - ↪ missions d'observation , réparation de satellites.

➤ 7 Surfaces de contrôle:

- ↪ 1 rudder, 4 body flaps, 2 wing flaps
- ↪ 7 servocommandes indépendantes

➤ Système de navigation:

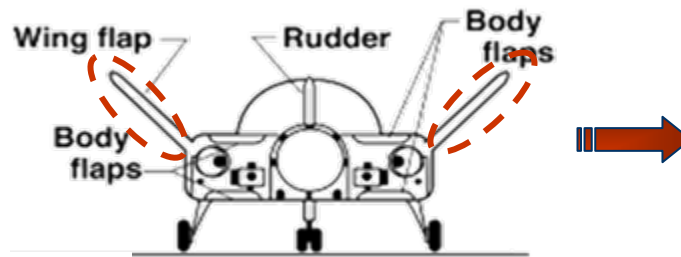
- ↪ 1 FAD, 2 IMS, 1 GPS
- ↪ Couplage GPS/IMS

Principales caractéristiques	
Max (L/D)	3.2
Masse à vide	10 400 Kg
Longueur	8.32 m
Surface de référence	26.61 m ²
Envergure	4.2 m

➡ **Dynamique implantée dans un simulateur**

- Contexte de la thèse
- **Problématique liée à la rentrée atmosphérique**
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives

➤ Défauts actionneur: "Wing flaps" droit et gauche



1: *blocage de la servocommande* à sa valeur courante (dysfonctionnement de la chaîne de commande de vol électrique, ...)

- Apparition du défaut: $t=30s \rightarrow$ atterrissage

2: *Embardée du volet* en position extrême ($+30^\circ$) à sa vitesse maximale (dysfonctionnement du circuit hydraulique)

- Apparition du défaut: intervalle [25 30s]

➤ Défauts capteur: vitesse de roulis et lacet de la centrale inertielle (IMS)

1: *biais / dérive: dû à la dégradation du capteur pendant la phase hyper (forte température,...), imperfection du capteur, désalignement,...*

- Contexte de la thèse
- **Problématique liée à la rentrée atmosphérique**
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives

Mise sous forme augmenté du simulateur HL-20

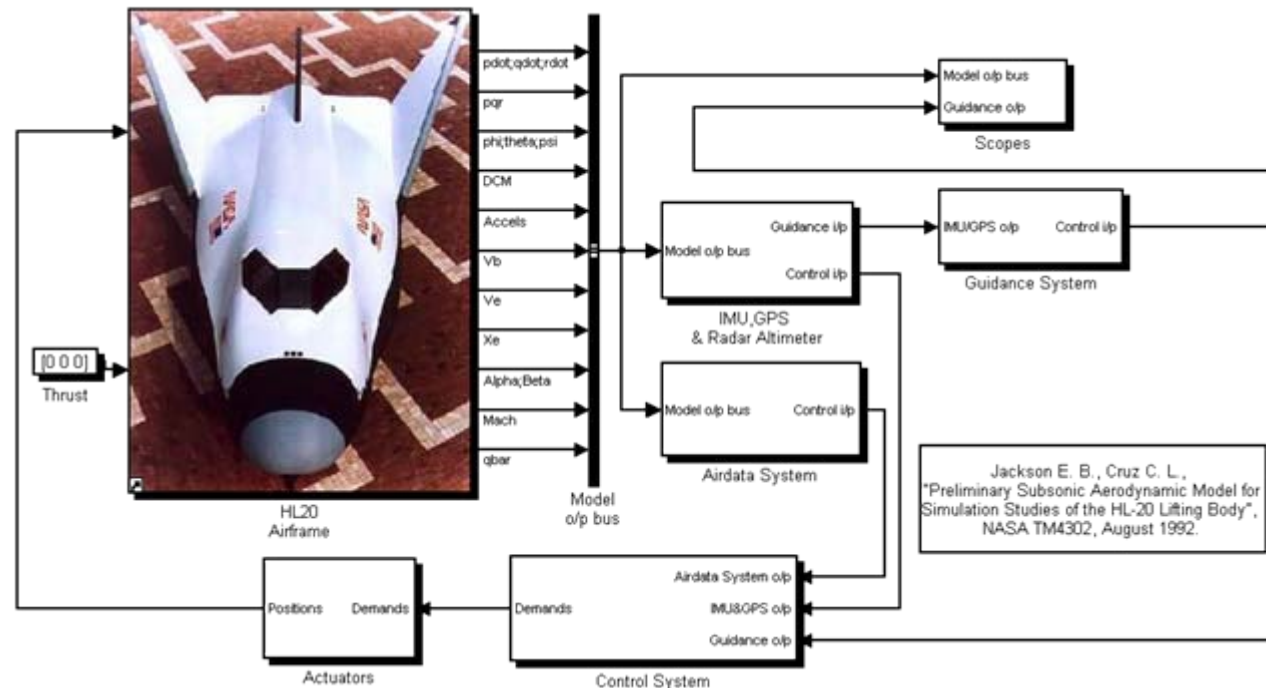
- **Présentation du simulateur HL-20,**
- **Modélisation de la dynamique du véhicule,**
- **Modélisation de la boucle de contrôle d'attitude,**
- **Validation du modèle linéarisé**

- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- **Modélisation du simulateur**
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives

Présentation du simulateur HL-20

➤ Simulateur HL-20 basé sur un modèle 6 degré de liberté incluant:

- ↪ modèles atmosphérique (pression, gravité, densité,...) et de vents (turbulences, rafales, cisaillement)
- ↪ une architecture GNC dédiée à la phase d'atterrissage

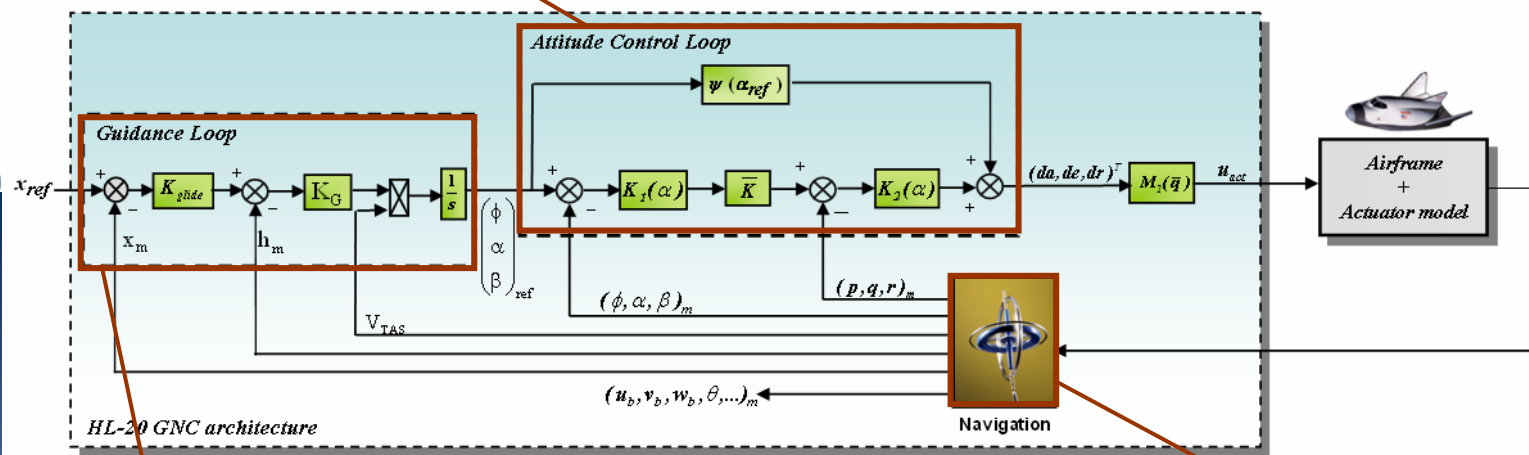


- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives

Présentation du simulateur HL-20

- Constitué de 4 modules principaux:
 - boucle de guidage,
 - boucle de pilotage,
 - modèle NL du véhicule + modèle actionneur
 - module de navigation

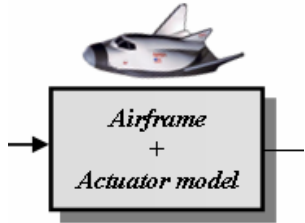
-Calcul les ordres de braquages gouverne correspondant aux signaux de guidage



-Calcul les angles: - gîte
- incidence
- dérapage

fourni en temps réel les informations de position et d'attitude du véhicule:
- mesures corrompues par des bruits HF

- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives



Equations de la dynamique du HL-20 :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos(\varphi) \cos(\theta) + v(\cos(\varphi) \sin(\theta) \sin(\phi) - \sin(\varphi) \cos(\theta)) + w(\cos(\varphi) \sin(\theta) \cos(\phi) + \sin(\varphi) \sin(\phi)) \\ \dot{y} &= u \sin(\varphi) \cos(\theta) + v(\sin(\varphi) \sin(\theta) \sin(\phi) + \cos(\varphi) \cos(\theta)) + w(\sin(\varphi) \sin(\theta) \cos(\phi) - \cos(\varphi) \sin(\phi)) \\ \dot{h} &= -u \sin(\theta) + v \cos(\theta) \sin(\phi) + w \cos(\theta) \cos(\theta) \\ \dot{\varphi} &= \frac{1}{\cos(\theta)} (q \sin(\phi) + r \cos(\phi)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{u}_b &= rv_b - qw_b - g \sin(\theta) + \frac{1}{2m} \rho S V^2 C_x \\ \dot{v}_b &= pw_b - rv_b - g \cos(\theta) \sin(\phi) + \frac{1}{2m} \rho S V^2 C_y \\ \dot{w}_b &= qu_b - pv_b - g \cos(\theta) \cos(\phi) + \frac{1}{2m} \rho S V^2 C_z \\ \dot{p} &= \frac{1}{2I_{xx}} (\rho S b V^2 C_l - qr(I_{zz} - I_{yy})) \\ \dot{q} &= \frac{1}{2I_{yy}} (\rho S V^2 (dC_m - X_{cg} C_z) - pr(I_{xx} + I_{zz})) \\ \dot{r} &= \frac{1}{2I_{zz}} (\rho S V^2 (bC_n + X_{cg} C_y) - pq(I_{yy} - I_{xx})) \\ \dot{\phi} &= p + \tan(\theta)(q \sin(\phi) + r \cos(\phi)) \\ \dot{\theta} &= q \cos(\phi) - r \sin(\phi) \end{aligned}$$

Coefficients aérodynamique:

$$C_x = f_1(\delta_e, \delta_a, \delta_{f+}, \delta_{f-}, \delta_{\Delta f}, \delta_r)$$

$$C_y = f_2(\delta_r, \delta_a, \delta_{\Delta f})$$

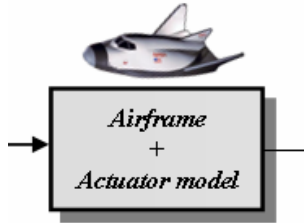
$$C_z = f_3(\delta_e, \delta_a, \delta_{f+}, \delta_{f-}, \delta_{\Delta f}, \delta_r)$$

$$C_l = f_4(\delta_a, \delta_{\Delta f}, \delta_r, p, r, V, \beta)$$

$$C_m = f_5(\delta_e, \delta_a, \delta_{f+}, \delta_{f-}, \delta_r, q, V)$$

$$C_n = f_6(\delta_a, \delta_{\Delta f}, \delta_r, p, r, V)$$

- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives



➤ Représentation d'état non-linéaire de la dynamique du véhicule:

$$\begin{cases} \dot{x}_b = f(x_b, u) + Ew \\ y = g(x_b) \end{cases} \quad (1)$$

Avec:

$$\begin{cases} x_b = [u_b, v_b, w_b, \phi, \theta, p, q, r]^T \\ y = [u_b, v_b, w_b, \phi, \theta, p, q, r, \alpha, \beta]^T \end{cases}$$

➤ $u \in \mathbb{R}^7$ représente le vecteur de commande intégrant la dynamique des actionneurs:

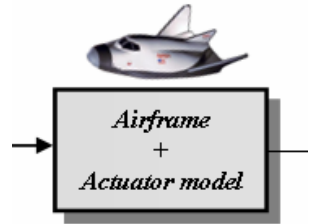
$$\begin{cases} \dot{x}_p = A_p x_p + B_p u_{act} \\ u = M_c C_p x_p \end{cases} \quad (2)$$

Avec:

$$u_{act} = [\delta_{wfl}, \delta_{wrl}, \delta_{bfl}, \delta_{bfl}, \delta_{bfur}, \delta_{bful}, \delta_r]^T$$

M_c : **Matrice d'allocation** $u = M_c u_{act}$

- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- **Modélisation du simulateur**
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives



➤ modélisation des défauts actionneurs:

$$\begin{cases} u_{act}^f(t) = (I_7 - \chi)u_{act}(t) \\ \chi = \text{diag}(\chi_l, \chi_r, 0_5) \end{cases} \quad (3)$$

cas du blocage actionneur:

$$\chi_i = 1 - \frac{c}{\delta_{wfi}(t)} \quad i = l, r$$

cas de l'embarquée en butée:

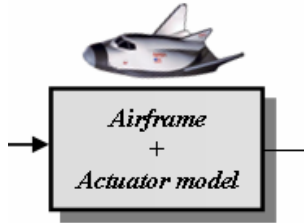
$$\chi_i = 1 - \frac{a(t)}{\delta_{wfi}(t)}$$

➤ A partir des équations (1) et (3), la dynamique du HL-20 est décrite par:

$$\begin{aligned} \dot{x}_b &= f(x_b, u) + Ew \\ \dot{x}_p &= A_p x_p + B_p (I_7 - \chi)u_{act} \\ u &= M_c C_p x_p \\ y &= g(x_b) \end{aligned}$$

- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- **Modélisation du simulateur**
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives

• Linéarisation du modèle :



➤ Linéarisation autour de la trajectoire de référence (Auto-landing):

$$\xi \dot{x}_b = A(\theta) \xi x_b + B(\theta) \xi u + E w$$

$$\xi y = C(\theta) \xi x_b + D(\theta) \xi u$$

$$\dot{x}_p = A_p x_p + B_p (I_7 - \chi) \xi u_{act}$$

$$\xi u = M_c C_p x_p$$

Approximation
Additive du défaut

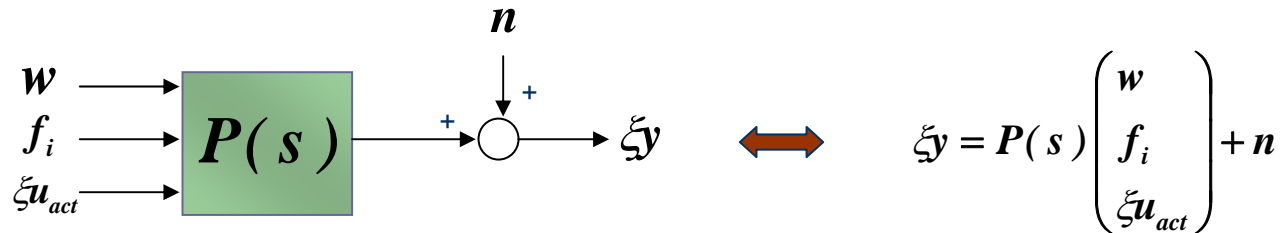
$$\dot{x}_p = A_p x_p + B_p \xi u_{act} + \sum_{i=1}^2 K_i f_i$$

Avec:

$$K_1 = \text{diag}\left(1 - \frac{c}{\delta w_{fr}}, 1 - \frac{c}{\delta w_{fl}}, 0_5\right)$$

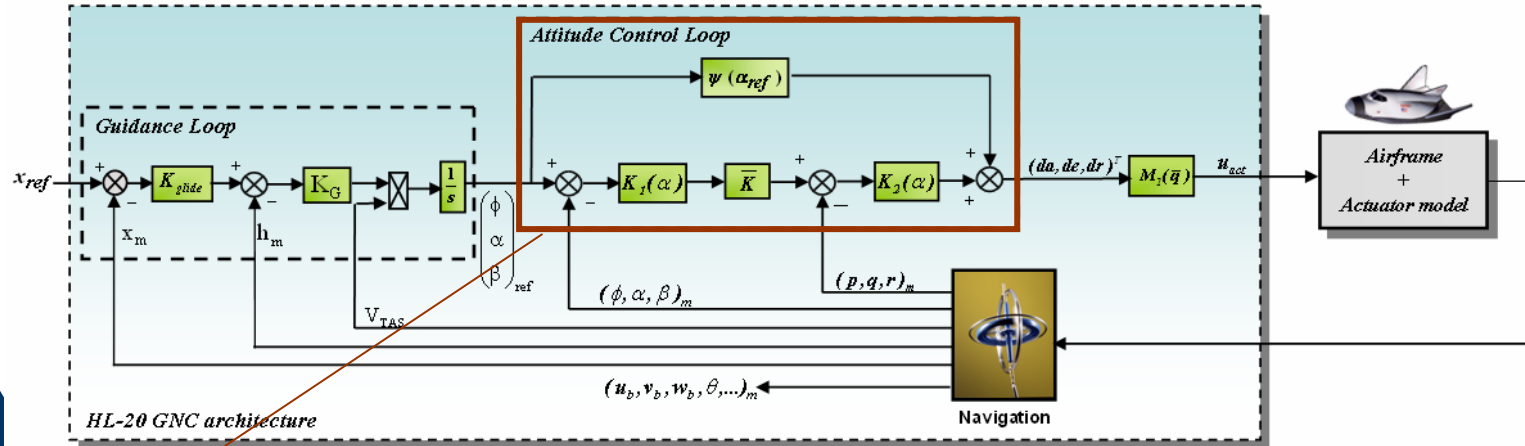
$$K_2 = \text{diag}\left(1 - \frac{at}{\delta w_{fr}}, 1 - \frac{at}{\delta w_{fl}}, 0_5\right)$$

➤ La dynamique du HL-20 peut finalement d'écrire:



- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives

Modélisation de la boucle de contrôle d'attitude



HL-20 GNC architecture

$$\begin{pmatrix} da \\ de \\ dr \end{pmatrix}_{ref} = \varphi(\alpha_{ref}) + K_2(\alpha) \bar{K} K_1(\alpha) \begin{pmatrix} \phi_{ref} - \phi_m \\ \alpha_{ref} - \alpha_m \\ \beta_{ref} - \beta_m \end{pmatrix} - K_2(\alpha) \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix}_m$$

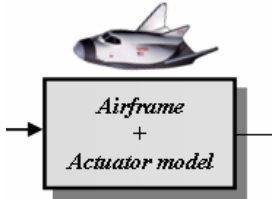
➤ En fixant α et \bar{q} à leur valeur moyenne, il vient:

$$K(s) = M_1(\bar{q}) K_2 \bar{K}(s) (\Delta\Phi, \Delta\alpha, \Delta\beta)^T - M_1(\bar{q}) K_2(p, q, r)^T$$

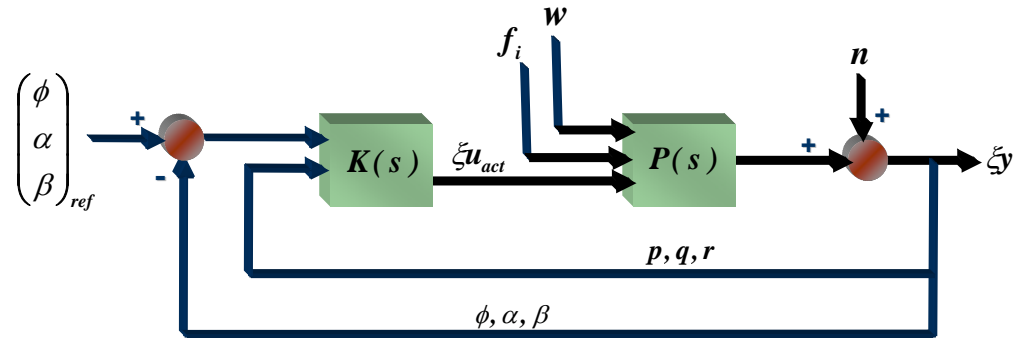
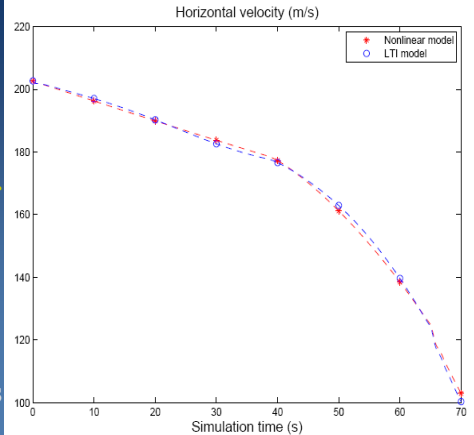
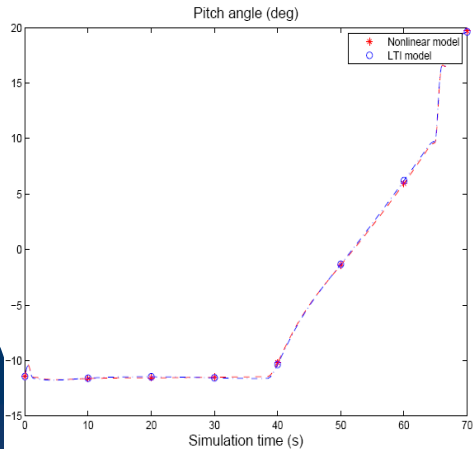
- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives

Validation du modèle linéarisé

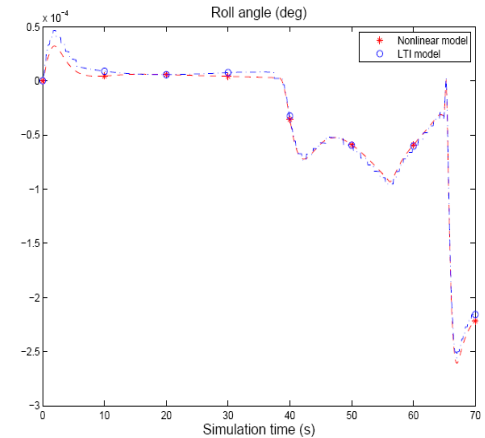
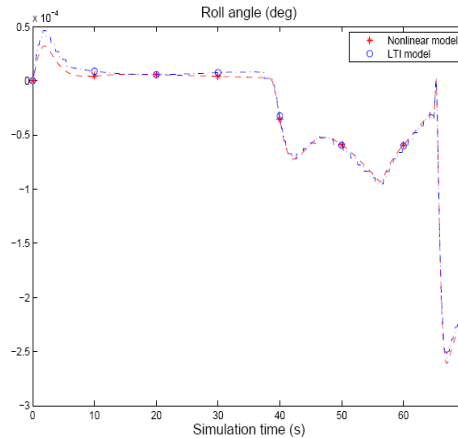
• Représentation du système global



Validation du modèle LPV



$$\xi y = \bar{P}(w, n, f, \phi_{ref}, \alpha_{ref}, \beta_{ref}, \xi u_{act})^T$$



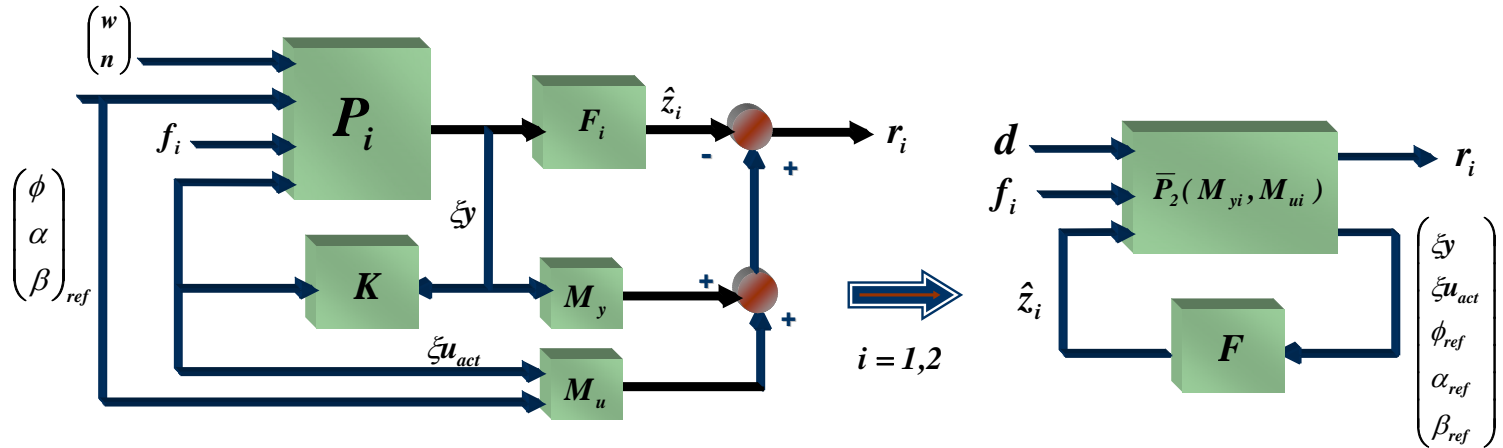
- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives

Diagnostic des actionneurs du HL-20

- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- **Diagnostic des actionneurs du HL-20**
- Conclusions & Perspectives

- **Formulation du problème de diagnostic**
- **Spécification des objectifs de synthèses**
- **Résolution du problème**
- **Résultats expérimentaux**

Formulation du problème de diagnostic



➤ Générer un vecteur de résidus tel que:

$$r_i = z_i - \hat{z}_i = M_{yi} \xi y + M_{ui} \xi u_{act} - F_i(s) \begin{pmatrix} \xi y \\ (\xi u_{act}, \phi_{ref}, \alpha_{ref}, \beta_{ref})^T \end{pmatrix} \quad i = 1,2$$

➤ Déterminer M_y , M_u et F tel que r soit:

↪ robuste vis-à-vis des perturbations exogènes (bruits mesures, vents, ordre de guidage) → contexte H_∞

↪ sensible vis-à-vis des défauts à détecter → contexte H_-

- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives

Formulation du problème de diagnostic

- ↪ formulation des objectifs de synthèses par des pondérations fréquentielles:

$$\|W_d\|_\infty \leq \gamma_1 \quad \|W_f\|_- \geq \gamma_2$$

- ↪ formulation de la contrainte de robustesse comme un problème de minimisation formulé dans un contexte H_∞ :

$$\min_{(M_y, M_u, F)} \|T_{d \rightarrow r}\|_\infty \iff \min_{(M_y, M_u, F)} \gamma_1 \quad (\text{S.1})$$

s.t. $\|T_{d \rightarrow r}\|_\infty < \gamma_1$

Avec: $d = (w, n, \phi_{ref}, \alpha_{ref}, \beta_{ref})^T$

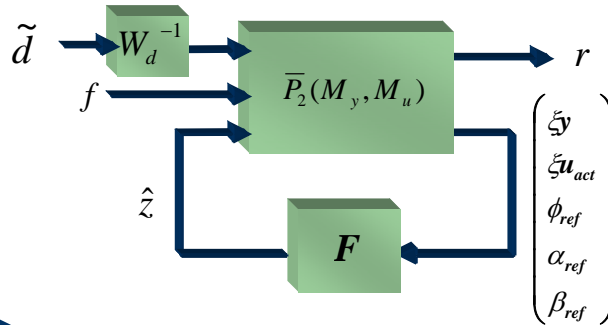
- ↪ formulation de la contrainte de sensibilité comme un problème de maximisation formulé dans un contexte H_- :

$$\max_{(M_y, M_u, F)} \|T_{f \rightarrow r}\|_- \iff \max_{(M_y, M_u, F)} \gamma_2 \quad (\text{S.2})$$

s.t. $\|T_{f \rightarrow r}\|_- > \gamma_2$

- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- **Diagnostic des actionneurs du HL-20**
- Conclusions & Perspectives

Formulation de la contrainte de robustesse:



En considérant un signal fictif \tilde{d} tel que:

$$\tilde{d} = W_d d$$

Alors ssi:

$$\|T_{r \rightarrow d} W_d^{-1}\|_{\infty} < 1 \Leftrightarrow \|T_{r \rightarrow \tilde{d}}\|_{\infty} < 1$$

La contrainte de robustesse est satisfaite !

Formulation de la contrainte de sensibilité:

Lemme: (Henry & Zolghadri, 2005)

- Soit $W_f(s)$ un filtre dynamique stable traduisant les objectifs de sensibilités : $\|W_f\|_{-} \geq \gamma_2$

- Soit $W_F(s)$ un filtre dynamique inversible de dimension approprié tel que :

$$\|W_f\|_{-} = \frac{\gamma_2}{\lambda} \|W_F\|_{-} \quad , \quad \|W_F\|_{-} > \gamma_2 \quad , \quad \lambda = 1 + \gamma_2$$

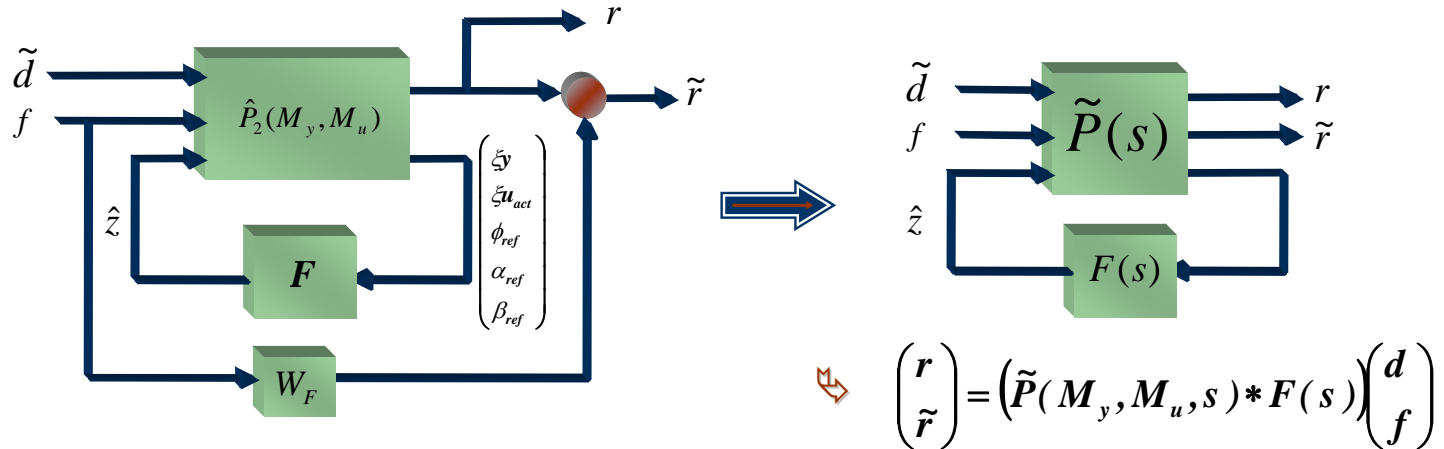
- Soit \tilde{r} un signal fictif t.q: $\tilde{r}(s) = r(s) - W_F(s)f(s)$

$$\|T_{rf} - W_F\|_{\infty} < 1 \Leftrightarrow \|T_{\tilde{r}f}\|_{\infty} < 1$$

Condition suffisante

- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives

↳ Mise sous forme “standard” du problème:



$$\begin{pmatrix} r \\ \tilde{r} \end{pmatrix} = \left(\tilde{P}(M_y, M_u, s) * F(s) \right) \begin{pmatrix} d \\ f \end{pmatrix}$$

Avec
$$\tilde{P} = \begin{bmatrix} \tilde{A} & \tilde{B}_1 & \tilde{B}_2 \\ \tilde{C}_1(M) & \tilde{D}_{11}(M) & \tilde{D}_{12} \\ \tilde{C}_2 & \tilde{D}_{21} & \tilde{D}_{22} \end{bmatrix}, \quad \tilde{B}_2 = 0, \quad \tilde{D}_{22} = 0, \quad \tilde{D}_{12} = \begin{pmatrix} -I \\ -I \end{pmatrix}$$

➤ D’après le théorème du petit gain, une condition suffisante pour que les spécifications (S.1) et (S.2) soient satisfaites est:

$$\left\| \left(\tilde{P}(M_y, M_u, s) * F(s) \right) \right\|_{\infty} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \text{Résolution du problème par technique LMI}$$

- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives

Application du lemme réel borné à notre problème

Lemme: (Henry & Zolghadri, 2005)

$$\|(\tilde{P}(M_y, M_u, s) * F(s))\|_{\infty} \leq 1 \quad \text{s.s.} \exists X_{cl} = X_{cl}^T > 0 \in \mathfrak{R}^{\dim(\tilde{A})}, \gamma < 1, M_y \in \mathfrak{R}^{q \times p}, M_u \in \mathfrak{R}^{q \times m}$$

Solution du problème SDP: $\min \gamma$

$$\begin{pmatrix} A_{cl}^T X_{cl} + X_{cl} A_{cl} & X_{cl} B_{cl} & C_{cl}^T(M) \\ B_{cl}^T X_{cl} & -\gamma \mathcal{I} & D_{cl}^T(M) \\ C_{cl}(M) & D_{cl}(M) & -\gamma \mathcal{I} \end{pmatrix} < 0$$

Où: $\tilde{P} = \begin{bmatrix} A_{cl} & B_{cl} \\ C_{cl} & D_{cl} \end{bmatrix} : F_l(\tilde{P}, F), \quad A_{cl} = \begin{pmatrix} \tilde{A} & 0 \\ B_F \tilde{C}_2 & A_F \end{pmatrix}, \quad B_{cl} = \begin{pmatrix} \tilde{B}_1 \\ B_F \tilde{D}_{21} \end{pmatrix}$

$$C_{cl}(M) = (\tilde{C}_1(M) + \tilde{D}_{12} D_F \tilde{C}_2 \quad \tilde{D}_{12} C_F), \quad D_{cl}(M) = \tilde{D}_{11}(M) + \tilde{D}_{12} D_F \tilde{D}_{21}$$

Inégalité matricielle non conjointement affine en $X_{cl}, A_F, B_F, C_F, D_F, M_y, M_u$

- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives

• Solution du problème SDP

↪ Utilisation du lemme de projection

↪ **Proposition:** (Henry & Zolghadri, 2005).

Soit $W = (\tilde{C}_2 \quad \tilde{D}_{21})^\perp$, le problème SDP est solvable s.si:

$$\exists R = R^T > 0 \in \mathfrak{R}^{\dim(\tilde{A})}, S = S^T > 0 \in \mathfrak{R}^{\dim(\tilde{A})} \quad \gamma < 1, M_y \in \mathfrak{R}^{q \times p}, M_u \in \mathfrak{R}^{q \times m}$$

$$\begin{pmatrix} \tilde{A}R + R\tilde{A}^T & \tilde{B}_1 \\ B_1^T & -\gamma I \end{pmatrix} < 0$$

$$\begin{pmatrix} W & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \tilde{A}^T S + SA & S\tilde{B}_1 & \tilde{C}_1^T(M) \\ \tilde{B}_1^T S & -\gamma I & \tilde{D}_{11}^T(M) \\ \tilde{C}_1(M) & \tilde{D}_{11}(M) & -\gamma I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} < 0$$

$$\begin{pmatrix} R & I \\ I & S \end{pmatrix} \geq 0$$

- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives

● Résumé de la technique de synthèse

1. Résolution du système LMI $\Rightarrow R, S, My, Mu, \gamma$
2. Calcul de 2 matrices inversibles \bar{M} et \bar{N} tel que $\bar{M}\bar{N}^T = I - RS$
3. Construction de la matrice X_{cl} du lemme réel borné vérifiant:

$$X_{cl} \begin{pmatrix} R & I \\ \bar{M}^T & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I & S \\ 0 & \bar{N}^T \end{pmatrix}$$

4. Résolution:

$$\begin{pmatrix} A_{cl}^T X + X A_{cl} & X B_{cl} & C_{cl} \\ B_{cl}^T X & -\mathcal{A} & D_{cl}^T \\ C_{cl} & D_{cl} & -\mathcal{A} \end{pmatrix} < 0$$

Algèbre linéaire
(Gahinet & Apkarian, 94)

Techniques LMI



Obtention de A_F, B_F, C_F, D_F

- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives

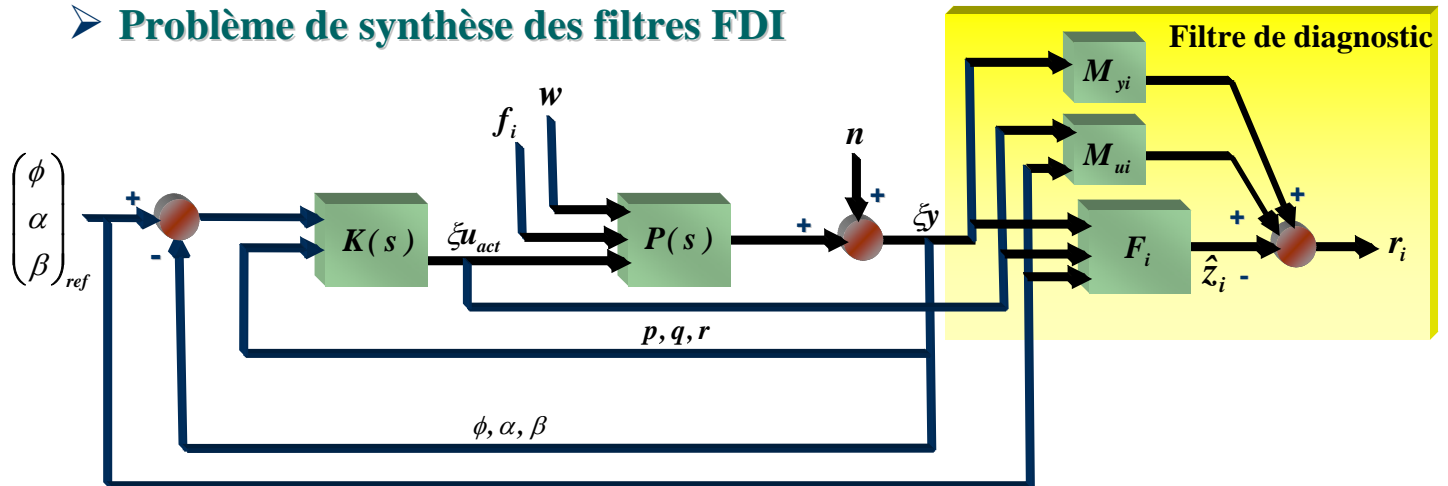
- Objectifs de diagnostic:

- synthétiser 2 filtres de diagnostic LTI tel que:

- ↪ F_1 soit sensible vis-à-vis du défaut flap gauche
 - ↪ F_2 soit sensible vis-à-vis du défaut flap droit

Robustes vis-à-vis des bruits de mesures, signaux de guidage et perturbations atmosphériques (vent, turbulence,...)

- Problème de synthèse des filtres FDI



- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives

➤ pondérations relatives à la contrainte de robustesse:

$$W_d = \text{diag}(W_g, W_w, W_n) \quad \left\| \begin{array}{l} W_g = \text{diag}(W_{\phi_{ref}}, W_{\alpha_{ref}}, W_{\beta_{ref}}) \longrightarrow W_g = \gamma_g I_3 \\ W_w = \text{diag}(W_u, W_v, W_w, W_p, W_q, W_r) \longrightarrow W_w = \gamma_w I_6 \\ W_n = \gamma_n \frac{1 + 0.005s}{1 + 0.0125s} \cdot I_{10} \end{array} \right.$$

➤ pondérations relative aux objectifs de sensibilité

$$W_{Fi}(s) = \lambda_{fi} \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_{fi}}} \quad \text{où} \quad \lambda_{fi} = 1 + \gamma_{2i}, \quad i = 1, 2$$

Objectif: minimiser $\gamma_g, \gamma_w, \gamma_n$ et maximiser γ_{2i}, ω_i

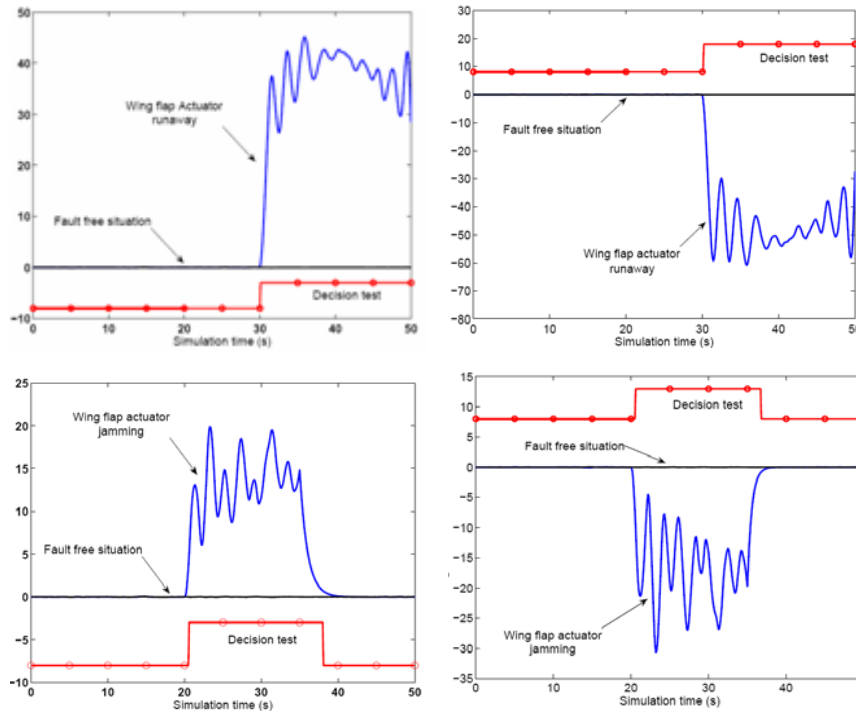
➤ Valeurs numériques obtenues après optimisation LMI

	γ_g	γ_w	γ_n	γ_2
F_1	$2.2e^{-3}$	0.005	0.05	0.5
F_2	$4.1e^{-3}$	0.005	0.01	0.45

- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- **Diagnostic des actionneurs du HL-20**
- Conclusions & Perspectives

● Simulation des défauts actionneurs (1/3):

- ↪ Algorithme de décision: test séquentiel de Wald sur la moyenne
- ↪ Probabilité de non détection (PN) et fausse alarme (PF) fixés à : 10^{-6}



Embardée en butée

➡ Retard à la détection: 30ms

Blocage à la valeur courante

➡ Retard à la détection: 35ms

- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives

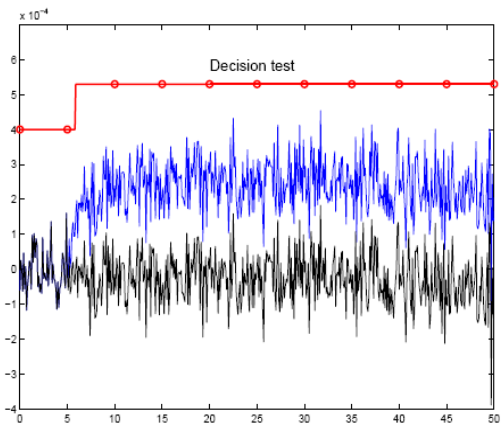
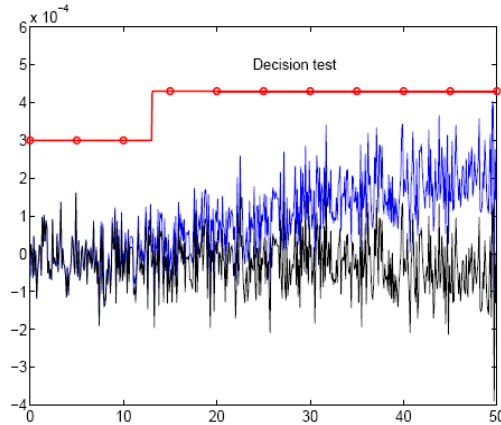
➤ Illustration du scénario défaillant: blocage du “Wing flap” droit:



- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- **Diagnostic des actionneurs du HL-20**
- Conclusions & Perspectives

● Application aux défauts capteurs (2/2):

➤ Application aux gyromètres d'accélération de roulis et lacet



➤ Comparaison avec une stratégie de cross-checking:

Capteur lacet	Biais: 0.02 rad/s	Dérive: 1.5 deg/h
Cross-checking	1.1s	7.8s
filtre H_{∞} / H_{-}	0.8s	7.9s
Capteur roulis	Biais: 0.04 rad/s	Dérive: 3 deg/h
Cross-checking	0.9s	22.1s
filtre H_{∞} / H_{-}	1.4s	19.6s



Performances de détection comparables



Possibilité d'accroître les performances du Cross-checking par un affinement du post-filtrage



L'approche à base de filtre ne nécessite pas de redondances matérielles.

- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives

● Bilan

⇒ **Mise sous forme linéaire d'un simulateur complexe de rentrée atmosphérique incluant la dynamique du véhicule, les boucles de guidage et de contrôle d'attitude,**

⇒ **Mise en place d'une stratégie de diagnostic:**

- **tenant en compte le couplage des modes longitudinal et latéral du véhicule**
- **robuste vis-à-vis d'une grande classe de perturbations exogènes (vents, bruits de mesures, signaux de guidage)**

⇒ **Validation de la méthode sur des défauts capteurs et actionneurs**

- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- **Conclusions & Perspectives**

● Perspectives

⇒ Mise en place d'une stratégie de localisation

⇒ Validation des performances des filtres en présence d'incertitudes de modèle (masse, CoG, Inertie,...) par post-analyse (μg)

⇒ Utilisation du formalisme LPV polytopique et LFT sur la phase d'atterrissage du HL-20

- évaluation du compromis performance / complexité

⇒ Mise en place de critères aéronautiques permettant de quantifier l'impact des défaillances sur les performances de vol du véhicule.

- Contexte de la thèse
- Problématique liée à la rentrée atmosphérique
- Modélisation du simulateur
- Diagnostic des actionneurs du HL-20
- Conclusions & Perspectives

Merci...