

Ajustement de lois de commande

Application en aéronautique

Yannick Losser

Directeurs de Thèse : Philippe Mouyon & Christelle Cumer

ONERA Centre de Toulouse
Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace

Toulouse, 24 mars 2006

Plan de la présentation

- 1 Présentation générale
- 2 Techniques d'ajustement pour un critère H_2
 - Introduction
 - Outils LMI
 - Techniques de Lyapunov
 - Application
 - Conclusion
- 3 Recherche de domaine admissible
 - Introduction
 - Outil d'analyse et algorithme
 - Tests sur l'application
 - Conclusion
- 4 Conclusion

Introduction

Cadre de travail

Commande des systèmes Monde aéronautique

La synthèse d'une loi pour réguler ou asservir un système :

- doit satisfaire un ou plusieurs critères établis par un cahier des charges
- peut être un processus long et complexe
- s'effectue sur des modèles s'efforçant de représenter *au mieux* le système réel
- nécessite une vérification sur un modèle de validation

Motivations de l'ajustement de lois en aéronautique

- systèmes complexes et fortes contraintes : processus de synthèse long et difficile
 - nombreux critères en jeu : sécurité des passagers, qualité de vol, charges structurelles, dommage par fatigue, performances...
 - évolution des avions (augmentation de la taille, avions souples)
 - synthèse sur un modèle assez simplifié de la réalité
- **ajuster = éviter de reprendre tout le processus de synthèse**
 - objectifs non validés sur le système réel
 - modification du modèle de synthèse (meilleure connaissance du système réel, harmonisation de la loi en plusieurs points de fonctionnement)
 - modification de certains critères, ajout de nouveaux objectifs

Données du problème

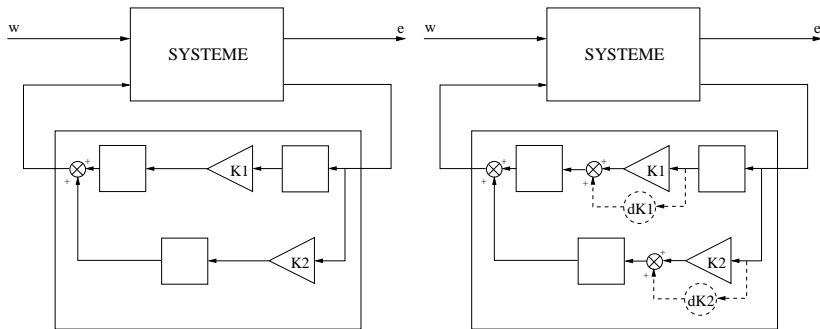
Le problème posé est de réduire des charges pour un modèle avion en vol longitudinal soumis à un vent turbulent vertical. Nous avons ainsi :

- un système : le **modèle avion** fourni
- une loi de commande : le bouclage du système sur une **loi initiale** établie selon un cahier des charges
- un critère à améliorer : il s'agit de réduire la variance de 4 sorties charges. Nous travaillerons avec une **norme H_2** .
- des degrés de liberté : l'industriel autorise la modification de **5 gains** de la loi

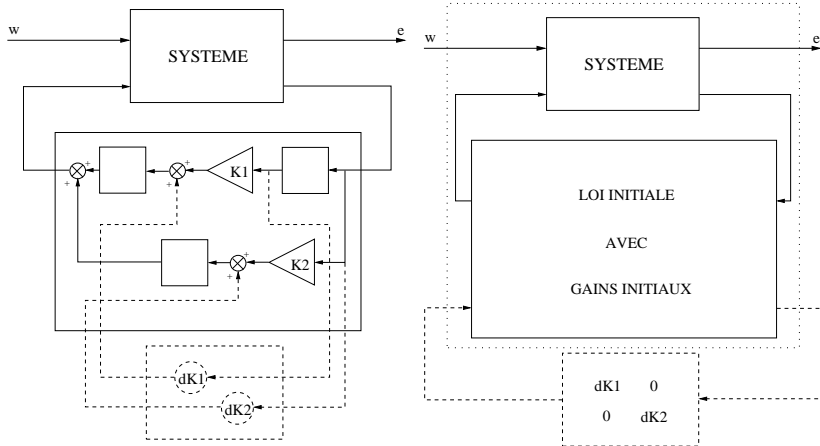
Ainsi

Nous sommes dans le cadre de l'**ajustement de loi de commande**.

Mise en forme du modèle (1/2)



Mise en forme du modèle (2/2)



Ainsi

- Le but est de réduire une norme H_2 .
- Nous pouvons modifier 5 gains. Ceux-ci sont *repérés* dans la loi, *isolés*, regroupés dans un *retour statique*.
- La structure du retour statique est *diagonale* (c'est le dK).

Objectif

Réduire la norme H_2 du transfert $w \rightarrow e$ en agissant uniquement sur cinq gains. La matrice de gains doit rester diagonale pour respecter le câblage (et donc la structure) de la loi initiale.

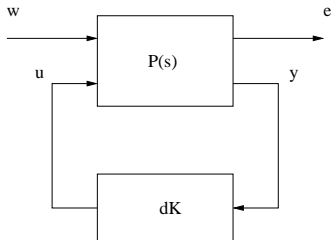
Objectifs de travail

- développement d'outils d'ajustement de loi pour un critère de performance (H_2 , H_∞)
- contraintes de développement
 - ordre du correcteur imposé à 0
 - structure du retour statique fixée
 - dimension importante du système

Voies de travail

- améliorer le critère en modifiant les gains
- chercher des gains admissibles pour une valeur donnée du critère

Problème H_2 standard



Formulation des 2 voies :

- trouver dK qui stabilise la BF et minimise $\|\mathcal{F}_l(P(s), dK)\|_2$
- trouver l'ensemble des dK qui stabilisent la BF et assurent $\|\mathcal{F}_l(P(s), dK)\|_2 < \gamma$

Techniques d'ajustement pour un critère H_2

Notre problème

Trouver $dK(s) = dK$ diagonale qui stabilise la BF et minimise $\|\mathcal{F}_l(P(s), dK)\|_2$

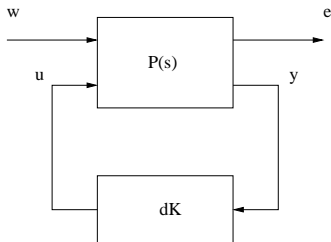
Deux bases théoriques

- LMI (Inégalités Matricielles Linéaires)
 - outil de synthèse de correcteurs $H_\infty \longrightarrow H_2$
 - espace d'état
 - problème optimal, problème sous-optimal
- équations de Lyapunov
 - caractérisation plus traditionnelle
 - espace d'état

Synthèse statique

- problème non convexe, non linéaire
- pas de solution "*toute faite*"

Caractérisation BMI



Posons :

- $P(s) \sim \left[\begin{array}{c|cc} A & B_w & B_u \\ \hline C_e & D_{ew} & D_{eu} \\ C_y & D_{yw} & 0 \end{array} \right]$
- $dK(s) = dK$

Nous avons $\|\mathcal{F}_l(P(s), dK)\|_2 < \gamma$ ssi

$$\exists P = P^T \quad \exists N = N^T$$

$$\begin{pmatrix} (A + B_u dK C_y)^T P + P(A + B_u dK C_y) & (C_e + D_{eu} dK C_y)^T \\ (C_e + D_{eu} dK C_y) & -\gamma^2 I \end{pmatrix} < 0$$

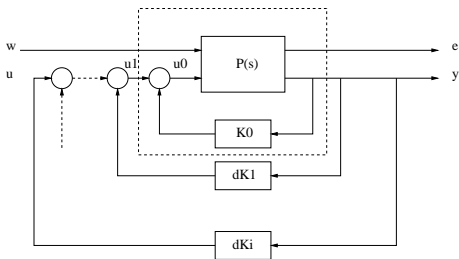
$$\begin{pmatrix} N & (B_w + B_u dK D_{yw})^T P \\ P(B_w + B_u dK D_{yw}) & P \end{pmatrix} > 0 \quad \text{Tr}(N) < 1$$

Discussion et résolution des BMI

- ajustement \iff synthèse d'un retour dK statique
- plusieurs formulations possibles équivalentes des BMI
- simplifications possibles si $D_{eu} = 0$ et/ou $D_{yw} = 0$
 - \longrightarrow Si $D_{yw} = 0$, seule la 1ère inégalité dépend de dK .
- 6 LMI à résoudre + une contrainte de type $XY = I$
 - Lagrangien augmenté : contrainte $\text{Tr}(XY - I)^2$
 - méthodes spectrales : essayer d'obtenir $\lambda_i(XY - I) = 0$
 - algorithme *min/max* : min sur α et max sur β tels que $\beta I \leq XY \leq \alpha I$
 - projections alternées sur des ensembles mathématiques simples associés aux différentes contraintes inégalités
 - saturation de contrainte : minimisation de $\text{Tr}(X_{k+1}Y_k + Y_{k+1}X_k)$
 - optimisation itérée par composante (relaxation)

Structure algorithmique 1

- solution retenue : **optimisation itérée par composante**
 - retenue car simple à mettre en oeuvre
 - autres heuristiques peu adaptées pour ordre 0



- fixer certaines variables pour calculer les autres de manière alternative
- rechercher une variation dK_i à chaque itération qu'on ajoute aux précédentes

Structure algorithmique 2

- 1 Initialisation à $K = K_0$ stabilisant. Poser $i = 0$.
- 2 Calculer les matrices d'état du système bouclé en K_i .
- 3 Optimisation 1 : (variables P_i et N_i)
 - $\min \gamma_i$ sous contraintes LMI (avec $dK_i = 0$ fixé) \longrightarrow donne P_i^*
 - calcul de la norme H_2 courante
- 4 Optimisation 2 : (variable dK_i)
 - $\min \gamma_i$ sous contraintes LMI (à $P_i = P_i^*$ et $N_i = N_i^*$ fixés) \longrightarrow donne dK_i
- 5 Tests d'arrêt :
 - si $\gamma_i < \gamma_{\text{souhaité}}$ ou si $\left| \frac{\gamma_i - \gamma_{i-1}}{\gamma_i} \right| < \varepsilon$, stop
 $\gamma_{\text{final}} = \gamma_i$ et $K_{\text{final}} = K_0 + \sum_i dK_i$
 - sinon, poser $K_{i+1} = K_i + dK_i$ et $i = i + 1$ et reprendre à l'étape 2.

Remarques

- Avantages :

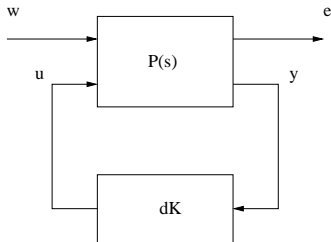
- possibilité de conserver la structure d'une loi
- stabilité de la boucle fermée assurée quel que soit le correcteur trouvé
- adaptation simple pour le cas H_∞ . Caractérisation LMI pour $G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$:

$$\|G\|_\infty < \gamma \iff \exists X = X^T > 0 / \begin{pmatrix} A^T X + XA & XB & C^T \\ B^T X & -\gamma I & D^T \\ C & D & -\gamma I \end{pmatrix} < 0$$

- Limitations :

- pas adapté pour les systèmes de grandes dimensions (ordre > 50)
- arrêts prématurés possibles (convergence optimisation itérée par composante \neq optimum local)

Caractérisation à base d'équations de Lyapunov



Posons :

- $P(s) \sim \left[\begin{array}{c|cc} A & B_w & B_u \\ \hline C_e & D_{ew} & D_{eu} \\ C_y & D_{yw} & 0 \end{array} \right]$
- $dK(s) = dK$

$$J(dK) = \|\mathcal{F}_l(P(s), dK)\|_2^2 = \text{Tr} \left\{ (C_e + D_{eu}dK C_y) P (C_e + D_{eu}dK C_y)^T \right\}$$

avec :

$$(A + B_u dK C_y) P + P (A + B_u dK C_y)^T + (B_w + B_u dK D_{yw})(B_w + B_u dK D_{yw})^T = 0$$

Différentes approches possibles

Deux choix :

- Conditions d'optimalité : elles sont obtenues en introduisant un Lagrangien dont nous chercherons à annuler les dérivées partielles en fonction de dK , P et Λ (paramètres de Lagrange).
- Optimisation mono-dimensionnelle : choisir une direction de variation pertinente de K permettant d'améliorer le critère (gradient, sensibilité maximale, techniques ordre 2)

Élément commun

Quelle que soit la méthode choisie, nous aurons à résoudre un système d'équations de Lyapunov non linéaires en les inconnues.

Conditions d'optimalité : méthode

→ Nous introduisons un Lagrangien et calculons ses dérivées partielles. Celles-ci sont nulles à l'optimum.

$$(A + B_u dK C_y)P + P(A + B_u dK C_y)^T + B_w B_w^T = 0 \quad (1)$$

$$(A + B_u dK C_y)^T \Lambda + \Lambda(A + B_u dK C_y) + (C_e + D_{eu} dK C_y)^T (C_e + D_{eu} dK C_y) = 0 \quad (2)$$

$$[D_{eu}^T C_e + D_{eu}^T D_{eu} dK C_y + B_u^T \Lambda] P C_y^T = 0 \quad (3)$$

- optimum pour J (norme H_2) atteint si le système d'équations $\{(1), (2), (3)\}$ est résolu en dK , $P = P^T > 0$, $\Lambda = \Lambda^T > 0$
- (1), (2) : 2 équations de Lyapunov non linéaires
- système simplifié pour un retour d'état ($C_y = I$)

Conditions d'optimalité : méthode

→ Nous introduisons un Lagrangien et calculons ses dérivées partielles. Celles-ci sont nulles à l'optimum.

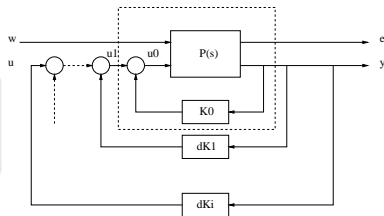
$$(A + B_u dK C_y)P + P(A + B_u dK C_y)^T + B_w B_w^T = 0 \quad (1)$$

$$(A + B_u dK C_y)^T \Lambda + \Lambda(A + B_u dK C_y) + (C_e + D_{eu} dK C_y)^T (C_e + D_{eu} dK C_y) = 0 \quad (2)$$

$$[D_{eu}^T C_e + D_{eu}^T D_{eu} dK C_y + B_u^T \Lambda] P C_y^T = 0 \quad (3)$$

Comment faire ?

Recherche de dK de manière itérative par calcul successif de dK_j .



Conditions d'optimalité : méthode

→ Nous introduisons un Lagrangien et calculons ses dérivées partielles. Celles-ci sont nulles à l'optimum.

$$(A + B_u dK C_y)P + P(A + B_u dK C_y)^T + B_w B_w^T = 0 \quad (1)$$

$$(A + B_u dK C_y)^T \Lambda + \Lambda(A + B_u dK C_y) + (C_e + D_{eu} dK C_y)^T (C_e + D_{eu} dK C_y) = 0 \quad (2)$$

$$[D_{eu}^T C_e + D_{eu}^T D_{eu} dK C_y + B_u^T \Lambda] P C_y^T = 0 \quad (3)$$

- 1 résoudre en P_i et Λ_i les équations de Lyapunov (1), (2) avec $dK_i = 0$
- 2 résoudre en dK_i l'équation (3) avec P_i et Λ_i fixés
- 3 poser $K_{i+1} = K_i + dK_i$, $i = i + 1$ et reprendre

Conditions d'optimalité : remarques

- Le calcul de dK_i est fait par les moindres carrés, ce qui permet de structurer dK_i et donc K_{final} .
- $$K_{final} = K_o + \sum_i dK_i$$
- La stabilité n'est pas assurée, on se doit de la vérifier à chaque itération.
- Nous pouvons optimiser l'algorithme en prenant $K_{i+1} = K_i + \alpha_i dK_i$ avec $\alpha_i \in (0, 1]$ minimisant le critère. Un tel algorithme **converge vers un optimum** s'il existe. [Moerder & Calise, 85]

Optimisation mono-dimensionnelle : problématique

Nous utilisons une approximation au premier ordre de l'évolution du critère.

$$J(K + dK) \approx J(K) + \text{Tr} \{ dK^T S \}$$

But

Faire varier dK dans une direction de descente de sorte que $J(K + dK) - J(K) < 0$.

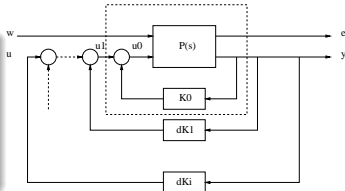
⇒ Utilisation de la matrice de sensibilité $S = \frac{\partial J}{\partial K}$.

Optimisation mono-dimensionnelle : sensibilité

- Choix de la direction de descente :
 - gradient : $dK^* = -S$
sensibilité selon toutes les directions de K
 - sensibilité maximale : $dK^* = -u_1 v_1^T / \sigma_1$
sensibilité associée à la plus grande valeur singulière de S

Ajustement proposé

- déplacement de K : $dK_i = \alpha_i J_i dK_i^*$
- le pas α_i donne la variation de J :
 $J_{i+1} \approx (1 - \alpha_i) J_i$



Optimisation mono-dimensionnelle : remarques

- Nous avons $\frac{\partial J}{\partial K} = \frac{\partial L}{\partial K}$ où L est le Lagrangien du problème vu dans les conditions d'optimalité
→ nous avons le même système d'équations (Lyapunov)
- Nous pouvons faire une optimisation mono-variable sur la direction de descente :
 - plage d'ajustement, par exemple $\alpha_i \in [1\%, 10\%]$
 - exploration locale sur un maillage : $\alpha_i \in \{0.1, 0.3, 0.7, 1\} * \alpha_{max}$
- La stabilité n'est pas assurée, on se doit de la vérifier à chaque itération.
- La structure de K est conservée dans la mesure où elle est dictée par celle de dK^* .

Remarque générale

Constat

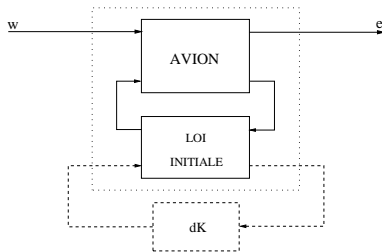
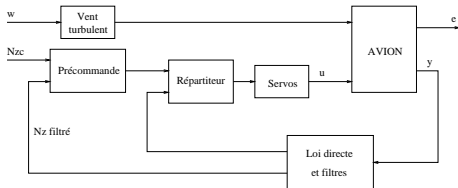
Les techniques présentées traduisent des approximations de la variation du critère à l'ordre 1 et à l'ordre 2.

Nous avons :

$$\begin{aligned} J(K + dK) - J(K) &\approx \text{Tr} \left\{ dK^T \frac{\partial J}{\partial K} \right\} + \frac{1}{2} J''(K)(dK, dK) \\ &\approx \text{Tr} \left\{ dK^T \frac{\partial J}{\partial K} \right\} + q_1(K, dK) + q_2(K, dK) \\ &\qquad\qquad\qquad (a) \qquad\qquad\qquad (b) \qquad\qquad\qquad (c) \end{aligned}$$

- (a) ordre 1 : gradient, **sensibilité maximale**
- (a) + (b) ordre 2 : descente d'Anderson-Moore = **conditions d'optimalité**
- (a) + (b) + (c) ordre 2 : descente de Gauss-Newton

Modèle



- w = 1 entrée de perturbation (vent)
- e = 4 sorties charge
- N_{zc} = 1 entrée de précommande
- y = 5 signaux de mesure rebouclés
- u = 5 entrées de commande

Rappel

- réduire $\|T_{w \rightarrow e}\|_2$
- 5 gains

Etude du système : 206 états

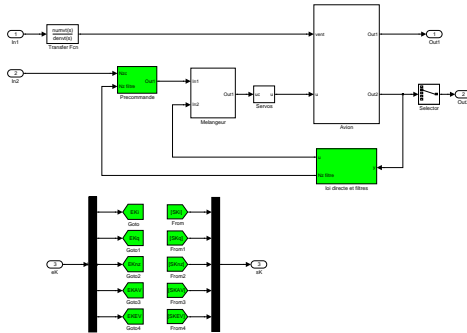
$$A = \begin{bmatrix} A_{rig\&flex} & A_{rfret} & A_{rfvent} & A_{rfservos} \\ \leftarrow A_{retaaero} \rightarrow & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{filtvent} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{servos} \end{bmatrix} \begin{matrix} \updownarrow 60 \\ \updownarrow 120 \\ \updownarrow 13 \\ \updownarrow 13 \end{matrix}$$

- 60 états correspondant aux position et vitesse de 2 états rigides (l'altitude z et l'assiette θ) et à 28 paires de modes flexibles
- 120 états correspondant à la modélisation de retards aérodynamiques
- 13 états correspondant au filtrage du vent
- 13 états correspondant à la modélisation des servos

Commentaires

- système de très grande dimension, mal conditionné
 - nécessite une réduction d'ordre
 - plusieurs techniques de réduction d'ordre selon les états (changement de base, réduction équilibrée, troncature dans la base modale)
 - transferts (BO, BF) et lieux des racines conservés
- ⇒ on passe de 206 à 34 états en BO et de 230 à 58 en BF
- L'ajustement est réalisé sur le modèle réduit, mais il faut pouvoir conclure sur le modèle complet pour répondre au problème posé.
- les 3 outils d'ajustement (LMI, conditions d'optimalité, sensibilité maximale) sont testés et comparés en performance de réduction du critère et en vitesse d'exécution.

Démarche



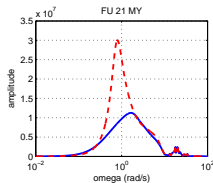
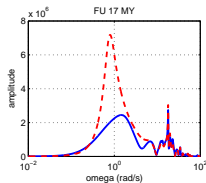
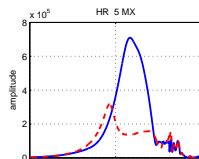
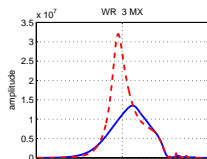
Critères

- ajustement fait sur : $T_{w \rightarrow e_i}$
- évaluation de l'ajustement sur : $T_{w \rightarrow e_j}$ et $T_{N_{z_c} \rightarrow N_z}$

Sorties charges

- flexion voilure
- flexion empennage
- flexion fuselage avant
- flexion fuselage arrière

Résultats : ajustement pour la sortie *flexion empennage 1*

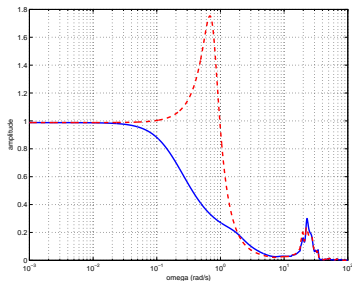


Méthode : ordre 1 + maillage

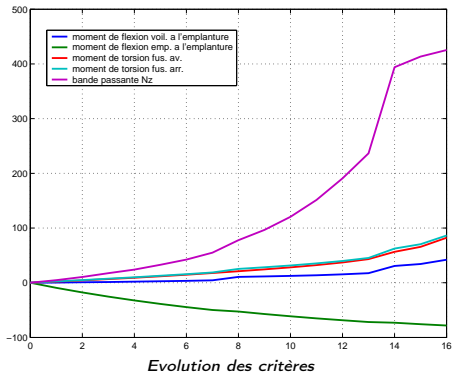
	LMI	CO	AL1	AL2
réd. (%)	-	-39	-77	-81
N iter	0	14	17	100
durée	-	26	6	280

sortie (AL1)	réd (%)	compl (%)
fl voilure	41	42
fl empennage	-77	-78
fl fuselage avant	80	82
fl fuselage arrière	83	86

Résultats : ajustement pour la sortie *flexion empennage 2*



Transfert $N_{z_c} \rightarrow N_z$



Analyse

Outils

- technique LMI inefficace : échec face à la dimension du système (même réduit)
- techniques du 1er ordre plus efficaces que le 2e ordre
- maillage légèrement moins efficace que l'optimisation locale sur α , mais nettement plus rapide

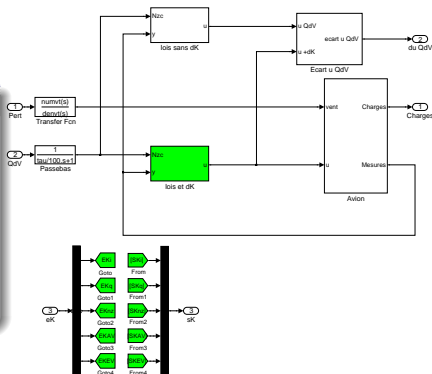
Application

- ajustement validé sur le modèle complet
- autres critères dégradés (normes H_2 pour les autres sorties charges, bande passante pour $N_{z_c} \rightarrow N_z$). **Des compromis sont nécessaires.**

Compromis

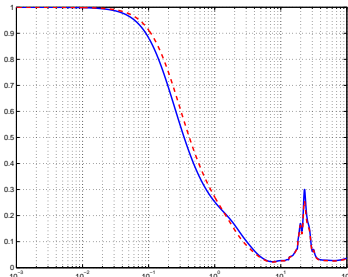
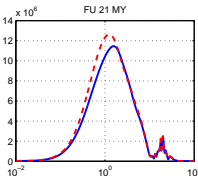
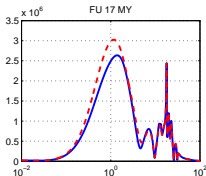
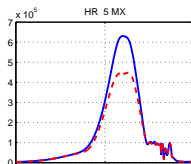
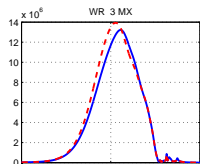
Possibilités

- traiter plusieurs sorties charges simultanément avec pondérations de chacune d'elle
- maintien des QdV : nouveau critère
 - système augmenté
 - 2 lois (avec et sans dK)



$$J = (1 - \rho) \frac{\|T_{wvent \rightarrow e_{charges}}\|_2^2}{\|T_{wvent^0 \rightarrow e_{charges}}^0\|_2^2} + \rho \frac{\|T_{Nzc \rightarrow e_{QdV}}\|_2^2}{\|T_{Nzc^0 \rightarrow e_{QdV}}^0\|_2^2}$$

Ajustement pour la sortie *flexion empennage* et QdV 1



ρ	voilure	empennage	fus avant	fus arrière	BP
0.999998	2	-37	11	11	23

Ajustement pour la sortie *flexion empennage* et QdV 2

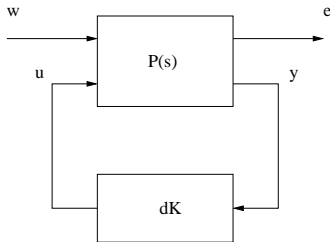
- Le maintien de la bande passante du transfert $N_{z_c} \rightarrow N_z$ est contrôlé.
- Les résultats sont très sensibles à de petites variations de la pondération ρ .
- Les compromis peuvent être cumulés : nous pouvons traiter plusieurs sorties charges en maintenant les QdV.
Cependant : le succès de l'ajustement n'est pas garanti.
- Pas de termes croisés dans le critère.

Résumé

- d'un point de vue théorique :
 - formulation du problème d'ajustement comme un problème de synthèse statique itérative
 - mise en relation des approches existantes pour la synthèse statique et développement de méthodes adaptées à l'ajustement
 - comparaison de techniques de descente et approximations au 1er et 2e ordre de l'évolution du critère
- d'un point de vue applicatif :
 - mise en oeuvre d'outils fonctionnels sur une application industrielle exigeante (grande dimension du système)
 - complémentarité des outils d'ajustement et ceux de réduction d'ordre d'un correcteur
 - pas de termes croisés dans le critère

Recherche d'un domaine admissible

Problème H_2 standard



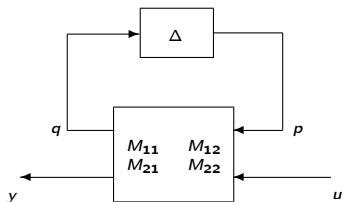
Formulation des 2 voies :

- trouver dK qui stabilise la BF et minimise $\|\mathcal{F}_I(P(s), dK)\|_2$
- trouver l'ensemble des dK qui stabilisent la BF et assurent $\|\mathcal{F}_I(P(s), dK)\|_2 < \gamma$

Notre problème

Trouver l'ensemble des $dK(s) = dK$ diagonaux, pour γ fixé, qui stabilise la BF et assure $\|\mathcal{F}_I(P(s), dK)\|_2 < \gamma$

Outil d'analyse selon Paganini



Nous avons :

$$\sup_{\Delta} \|\mathcal{F}_u(M, \Delta)\|_2 < \gamma$$

si

$$\left\{ \begin{array}{l} \exists X(\omega) \text{ une matrice de scalings relative à } \Delta \text{ et } Y(\omega) = Y^*(\omega) \text{ telles que} \\ M^*(j\omega) \begin{pmatrix} X(\omega) & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} M(j\omega) - \begin{pmatrix} X(\omega) & 0 \\ 0 & Y(\omega) \end{pmatrix} < 0 \\ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{Tr}(Y(\omega)) d\omega < \gamma^2 \\ \|\Delta\|_{\infty} < 1 \end{array} \right.$$

Commentaires

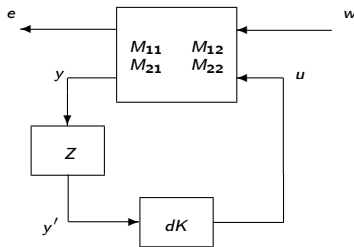
- Le théorème de Paganini assure une borne supérieure de la norme H_2 d'un système soumis à des incertitudes.
- Il se limite dans l'état à des incertitudes de module < 1
- La démonstration du théorème laisse présager un fort conservatisme.

$$\|\mathcal{F}_u(M, \Delta)\|_2^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{Tr}(\mathcal{F}_u^* \mathcal{F}_u) d\omega < \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{Tr}(Y) d\omega < \gamma^2$$

Exploitation

- LMI traitant des matrices de transferts : pas de problème de dimension
- extension à des incertitudes (les dK) non normalisées
- inverser l'approche pour permettre de retrouver dK à partir de γ

Modification de l'outil d'analyse de Paganini



Nous avons :

$$\sup_{\Delta} \|\mathcal{F}_l(M, dK)\|_2 < \gamma$$

si

$$\left\{ \begin{array}{l} \exists X(\omega) \text{ une matrice de scalings relative à } \Delta \text{ et } Y(\omega) = Y^*(\omega) \text{ telles que} \\ M^*(j\omega) \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & ZX(\omega)Z \end{pmatrix} M(j\omega) - \begin{pmatrix} Y(\omega) & 0 \\ 0 & X(\omega) \end{pmatrix} < 0 \\ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{Tr}(Y(\omega)) d\omega < \gamma^2 \\ \|dK\|_{\infty} < 1 \quad \text{avec } Z^* = Z \end{array} \right.$$

Remarques sur la modification

L'introduction de la matrice Z permet de :

- trouver des dK_{ii} non normalisés (en posant $|Z_{ii}| < c_i$)
- ne pas se limiter à un hypercube pour le domaine recherché (c_i pas tous égaux)
- limiter le nombre de gains à ajuster (autres $c_i = 0$)

Cependant :

- La méthode reste très conservative.
- Les LMI sont résolues pour un nombre fini de pulsations.

Objectif

Trouver $dK_{opt} = \alpha_{opt} Z_0$ tel que $J(dK_{opt}) \approx J_{opt}$.

Algorithme

- 1 définir une valeur cible J_{opt} pour le critère
- 2 définir les proportions voulues entre les coefficients de dK que l'on place dans Z_0
- 3 choisir α_0 tel que $J(\alpha_0 Z_0) > J_{opt}$ ($\alpha_0 Z_0$ définit un domaine plus grand que le domaine admissible)
- 4 chercher α_{opt} tel que $J(\alpha_{opt} Z_0) \approx J_{opt}$ en faisant une **dichotomie**
 - ⇒ Pour chaque nouveau dK , on vérifie la borne supérieure de la BF avec Paganini.
 - ⇒ Le domaine admissible sera

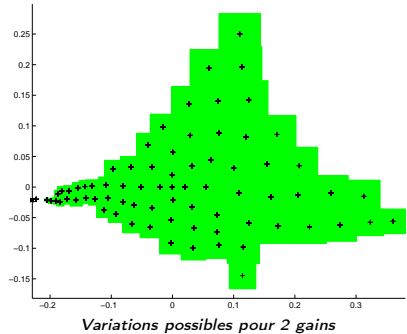
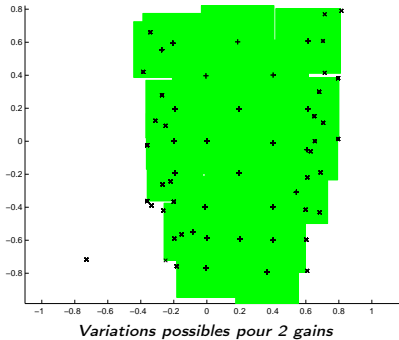
$$\{K + dK / -\alpha_{opt} Z_{0ii} \leq dK_{ii} \leq \alpha_{opt} Z_{0ii}\}$$

Résultats sur l'application avion 1

- Nous avons 5 gains. Nous pouvons travailler avec les 5 simultanément ou avec un nombre réduit.
- Les tests ont été faits pour une augmentation de 10% du critère initial.
- Le domaine admissible recherché est de type $K_{admis} = K_0 \pm \alpha I$, soit un carré (2 gains) ou un hypercube (5 gains) centré autour de la valeur initiale K_0 .

nbr de gains	α	J_0	J_{final}	N	t	t/N
2	0.3093	3.5269e+14	3.8788e+14	7	28s	4s
5	0.00782	3.5269e+14	3.8784e+14	10	107s	10.7s

Résultats sur l'application avion 2



Résumé

- d'un point de vue théorique :
 - exploitation d'un outil d'analyse de performance H_2 pour un contexte d'ajustement
→ conservatisme de la méthode
 - inversion de l'outil dans le cadre de la recherche d'un domaine admissible
- d'un point de vue applicatif :
 - permet le traitement simultané de plusieurs gains, selon des pondérations paramétrables
 - apporte une aide à l'ingénieur dans sa recherche d'un domaine admissible (intervention de l'utilisateur dans l'orientation de recherche)

Conclusion

Les travaux effectués au cours de cette thèse traite du domaine particulier de l'ajustement de loi de commande.

Ils ont été centrés autour des 2 thèmes d'études :

- la recherche d'outils permettant la réduction d'une norme H_2 en ne travaillant qu'avec quelques gains de la loi initiale
- la recherche d'un domaine admissible pour ces gains pour une valeur du critère donnée a priori

Conclusion

Techniques d'ajustement :

- Apport de la thèse :
 - ajustement \Leftrightarrow synthèse de correcteur statique
 - développement de méthodes appropriées \Rightarrow structure algorithmique itérative selon plusieurs bases théoriques
 - rapprochement de plusieurs techniques (LMI, conditions d'optimalité, sensibilité max) et amélioration par approximations aux 1er et 2e ordre
 - algorithmes adaptés aux systèmes de grande dimension
- Limitations :
 - optimisation itérative \Rightarrow arrêt prématuré des algorithmes (faux minima)
 - monitoring nécessaire de la stabilité
- Perspectives :
 - outils de résolution BMI, support des systèmes de grande dimension
 - optimisations plus sophistiquées

Conclusion

Domaine admissible :

- adaptation d'un outil d'analyse de performance $H_2 \Rightarrow$ variations des gains vues comme des incertitudes non normalisées
- méthode très conservatrice \Rightarrow domaine admissible assez pessimiste

Application avion :

- outils d'ajustement fonctionnels donnant des résultats probants
- dimension très importante
 - \Rightarrow contrainte forte pour les techniques d'ajustement
 - \Rightarrow élaboration directe de modèles moins volumineux
- définition d'une méthodologie pour prendre en compte des critères multiples (charges, QdV)