





# Stage de Recherche & Projet de Fin d'Étude 2004/2005

Master: Génie des Systèmes Automatisés **INSA\_GE Option: ISIP** 

**Tuteurs LAGEP:** 

P. DUFOUR

Y. LEGORREC

Réalisé par :

Tarik HAMANE







<u>Projet</u>: IMPACT « Innovation Mécanique Passive et Active pour les suspensions moteurs des avions du futur »

<u>Sujet</u>: Contrôle et Synthèse d'une loi de commande pour les suspensions moteurs d'avions supersoniques, afin d'améliorer la dynamique des structures et réduire les vibrations transmises à l'habitacle







# Plan de la présentation

- Introduction
- Présentation du projet IMPACT
- Cahier des charges
- Modélisation et étude du système
- Dimensionnement et commande de l'actionneur
- Synthèse d'une loi de commande H∞
- Introduction des incertitudes
- Conclusion et Perspectives







## **Introduction**

- Le confort dans les avions est un argument déterminant pour les compagnies aériennes
- Le bruit et les vibrations sont les principaux perturbations transmises vers l'habitacle
- Le moteur est la source principale des vibrations mécaniques transmises par la voilure et mesurées jusque dans le fuselage







# Présentation du projet IMPACT

- Objet: Filtration des vibrations émises par le moteur dans un domaine de fréquence et d'amplitude étendu
- Objectif: Trois types de sources seront particulièrement étudiées
  - Force dues aux mouvements d'ensemble du moteur
    - >Actionneur électro-magnétique ( CEGELY & LAGEP)
  - Force dues au balourd résiduel des partie tournante du moteur
    Actionneur piézo-électrique (LAGEP & LTDS)
  - Force dues au balourd consécutif à une perte d'aube
    >Actionneur nano-poreux hydrophobe (LTDS)
- La commande de ces actionneurs est réalisée par le LAGEP







# **Présentation «récapitulatif»**

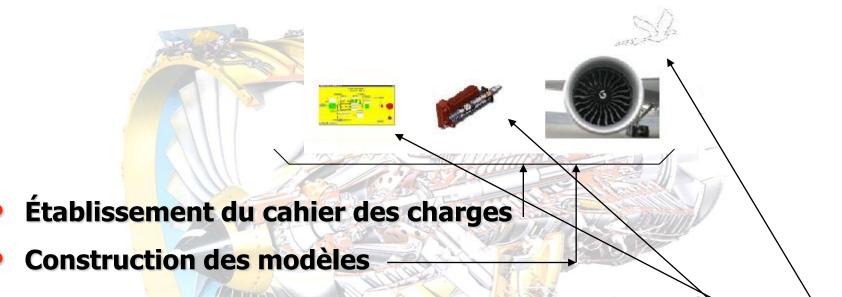
- Introduction
- Présentation du projet IMPACT
- Cahier des charges
- Modélisation et étude du système
- Dimensionnement et commande de l'actionneur
- Synthèse d'une loi de commande H∞
- Introduction des incertitudes
- Conclusion et Perspectives







# Cahier des charges



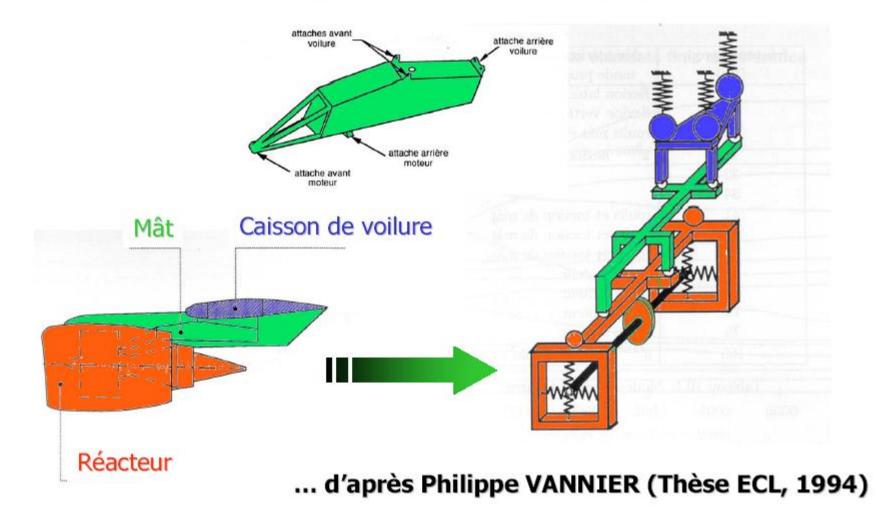
- Dimensionnement des organes de commande actif
- Élaboration des lois de commande
- Identification et Introduction des incertitudes et non linéarités
- La mise en oeuvre effective du contrôle







## Modélisation simplifiée de l'ensemble propulsif









## Modélisation du système



La relation dynamique reliant les commandes et les perturbations aux sorties:

$$M y''(t) + [C+G(\Omega)] y'(t) + K y(t) = Bo U(t) + Eo Up(t)$$

#### Avec:

- y(t)(n x1): Vecteur des déplacements
- Up(n x1): Vecteur des efforts extérieurs de la forme: Up( $\Omega$ ) = Upc.cos( $\Omega$ t) + Ups.sin( $\Omega$ t)

On cherche donc une solution:

$$y(t) = yc \cos(\Omega t) + ys \sin(\Omega t)$$

- 204 ddl dont 62 indépendants et non liés
- 6 ddl à étudier (soit 2 Translations en 3 points)





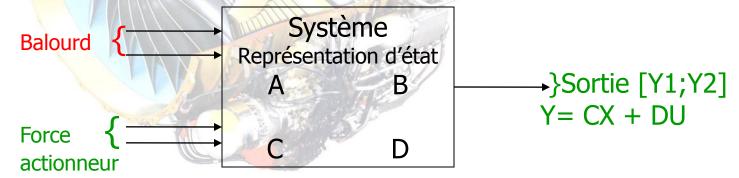


# Représentation d'état

$$X'(t) = A.x(t) + B.U(t) + Br.Up(t)$$

## Modèle initial

- A(144,144) donc 144 états
- B[B1 B2 B3 B4] car chaque entrée influe de manière différente
  - Force Actionneur=> U=[U1;U2]
  - Perturbations=>Balourd=> Up=[U3;U4]



13/07/2018 — Master GSA — 1







#### **Stabilité & Réduction**

- Mauvais conditionnement de A [1.10+18]
- Stabilité mais v.p trop proches de l'axe imaginaire

#### Modèle réduit

- Utilisation de la réduction balancée
- Seulement 57 états => meilleure intégration numérique
- Un meilleur conditionnement [7.10+9]
- Stabilité maintenue





Modèle réduit = Modèle de synthèse







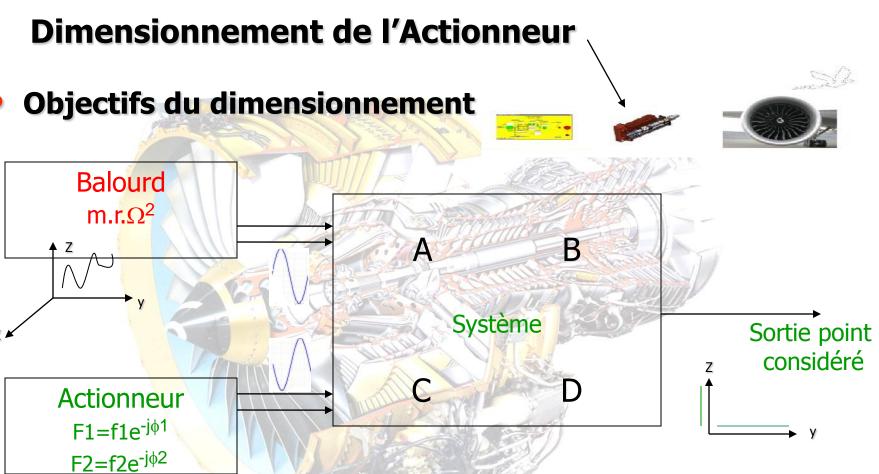
# **Présentation «récapitulatif»**

- Introduction
- Présentation du projet IMPACT
- Cahier des charges
- Modélisation et étude du système
- Dimensionnement et commande de l'actionneur
- Synthèse d'une loi de commande H∞
- Introduction des incertitudes
- Conclusion et Perspectives











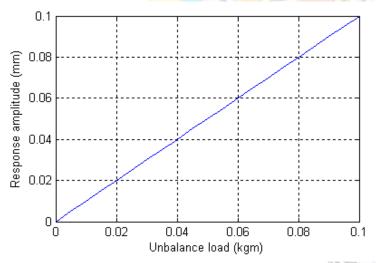




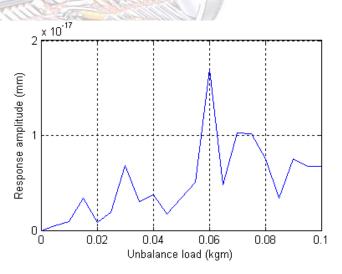
## Dimensionnement des organes de commande actif

- Évaluation de l'ordre de grandeurs des commandes à atteindre pour:
  - Le cas nominal (moteur en régime de croisière ) pour un balourd = 0.001 kgm et une Vitesse  $\Omega$  = 6000 tr/mn l'amplitude des forces à développer par les actionneurs:

f1=5,7exp(-j90,4°) kN et f2=5,8exp(-j86,3°) kN



Réponse sans contrôle



Réponse avec contrôle optimal



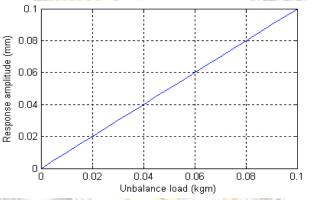




## Dimensionnement des organes de commande actif

Un balourd connu ou inconnu

Pour des grandes variations de balourd les amplitudes des réponses tendent vers des valeurs obtenues sans contrôle.



Un origine des phases inconnu

L'amortissement recherché de l'effet balourd varie très fortement selon le déphasage

Déphasage   (°)	1	5.7	10	50	100	180
Amortissement de l'effet balourd (%)	-98.4	-90	-84	-15	+53	+100







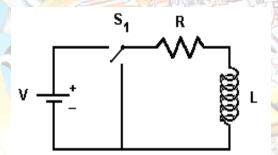
# Commande de l'actionneur électromagnétique

#### **Performances attendues**

- Force : amplitude 6 KN et fréquence 100 Hz
- Temps de réponse : la ms

#### **Modélisation**

**Tension** 





## Prise en compte:

- De la non linéarité
- De la saturation



Modèle linéarisé

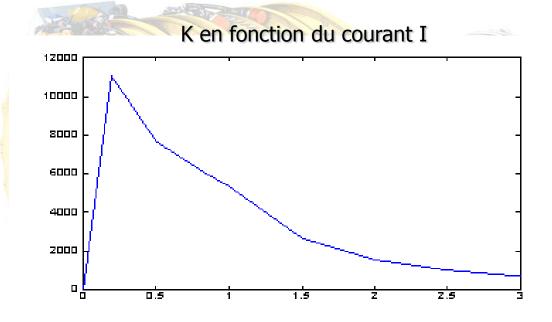






## Linéarisation

Modèle linéaire



$$K(I) = 10^{-6} [-0.01^*I^8 + 0.0115^*I^7 - 0.542^*I^6 + 1.351^*I^5 - 1.929^*I^4 + 1.587^*I^3 - 0.715^*I^2 + 0.148^*I]$$

13/07/2018 — Master GSA 1







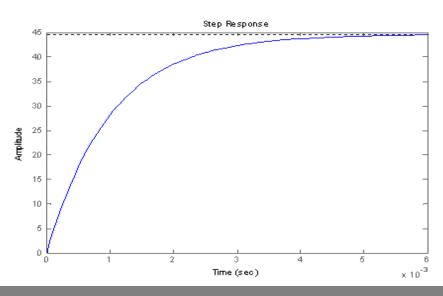
## **Modèle Linéarisé**

Point de fonctionnement

$$I_0 = 75\%Imax = 0.9 A/mm^2 on a :$$

- Domaine non saturé
- $\delta F(t) = 6852.3 \partial I$
- Avec une tension de commande théorique de 154.32V

La réponse en échelon (entrée de 45 V) du modèle linéarisé autour de Io=0.9A/mm<sup>2</sup>







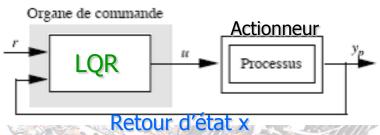


# Commande de l'actionneur électromagnétique

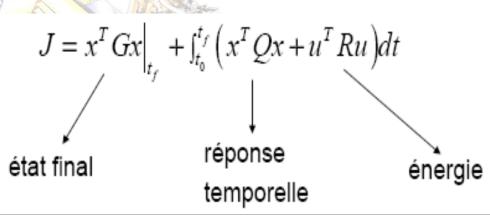
**Commande LQR** 

Principe: Rechercher une commande optimale U selon J

Résultat  $U(t) = -R^{-1}B^{T}Sx(t)$ 



- Une notion de compromis entre l'énergie dépensée et la rapidité de la réponse.
- - > Accès aux paramètres







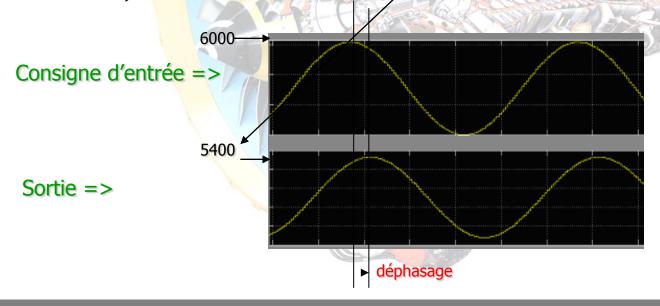


## **Résultats Obtenus**

- Déphasage en sortie de 10%
  atténuation de 80%
- Mais erreur statique assez importante

#### **Solution**

introduire l'inverse du gain statique dans le système bouclé



Intégrateur



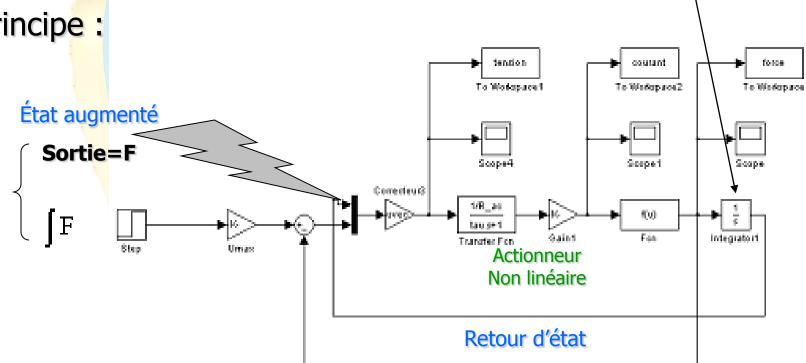




## LQR avec Intégrateur

- But : Éliminer l'Erreur Statique
- Idée : Introduire un intégrateur









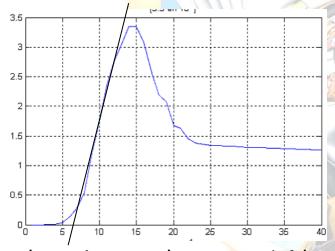


## Résultats

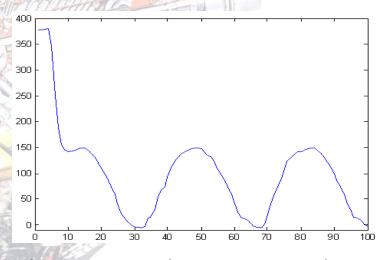
- Un déphasage limité < 10 %</li>
- Erreur statique nulle
- Temps de réponse 3 ms

Atténuation de plus de 87 % de l'effet balourd

#### Sollicitation de la commande



dynamique sur le courant 1 A/ms



dynamique sur la tension 900 V/ms



Résultats conformément au cahier des charges







# Présentation «récapitulatif»

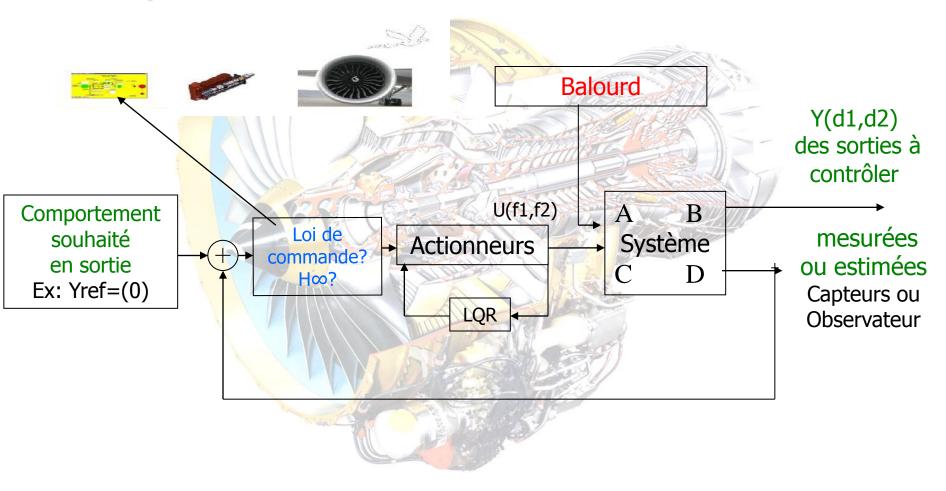
- Introduction
- Présentation du projet IMPACT
- Cahier des charges
- Modélisation et étude du système
- Dimensionnement et commande de l'actionneur
- Synthèse d'une loi de commande H∞
- Introduction des incertitudes
- Conclusion et Perspectives







# L'objectif du contrôle est de faire suivre au procédé un comportement souhaité









# Synthèse d'une loi de commande H∞

- Quelques notions
  - valeurs singulières

Soit un système LTI:

$$s(t)=G(j\omega)Ee^{j\omega t}$$

>Pour un SISO le gain à ω



 $G(j \omega)$ 

>Pour un MIMO => notion de valeurs singulières

$$\sigma_i(G(jw)) := \sqrt{\lambda_i(G(jw)G(-jw)^T})$$

avec i =1,min[dim(vecteur entrée),dim(vecteur sortie)]



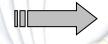




# Synthèse Standard

- Norme H∞
- Pour un système LTI :

<u>La norme H∞</u>



$$\|\mathbf{G}(\mathbf{s})\|_{\infty} := \sup_{w \in R} \bar{\sigma}(G(jw))$$

Valeur la plus élevée du gain sur l'ensemble des pulsations

- Approche standard
  - Utilisation d'outils fréquentiels



Filtres de pondération Wi

Optimisation par H∞





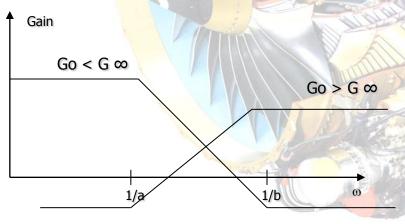






# Synthèse Standard H∞

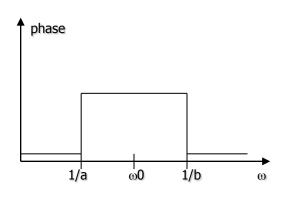
- Les filtres de Pondérations
  Comportement désiré
- G∞=gain à l'infini
- **G**₀=gain Statique
- ω<sub>0</sub>=pulsation de coupure



$$W_i(s) = \frac{G_{\infty}\sqrt{|G_0^2 - 1|}s + G_0\omega_0\sqrt{|G_{\infty}^2 - 1|}}{\sqrt{|G_0^2 - 1|}s + \omega_0\sqrt{|G_{\infty}^2 - 1|}}$$

## Filtres du 1er Ordre

$$W = \frac{a \cdot p + 1}{b \cdot p + 1}$$









# Application à notre système

- Choix des Filtres
  - W1 => Perturbation [ Balourd nominal 628 rad/s = 100 Hz ]
  - W2 => Commande [ Comportement en hautes fréquences ]
  - W<sub>3</sub> => Erreur [ Domaine concerné ]

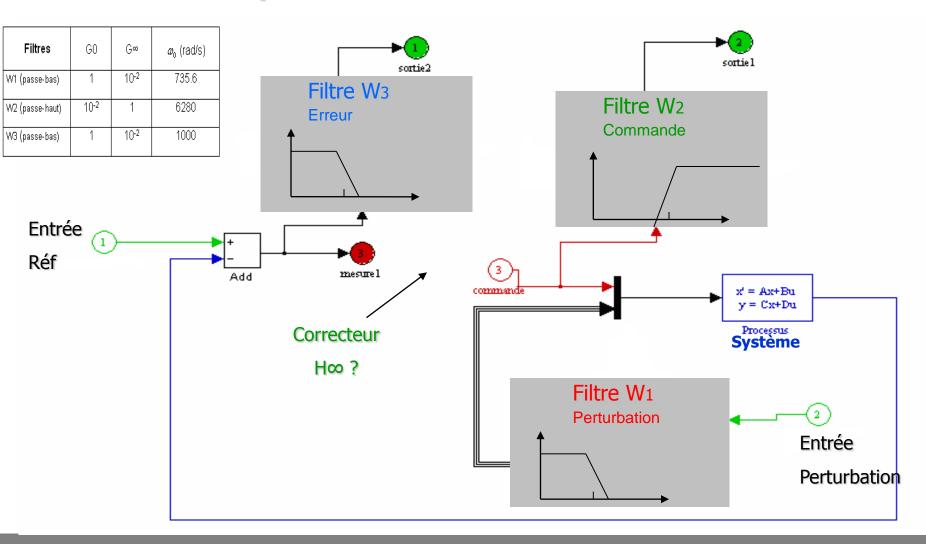
Filtres	G0	G8	$arphi_0$ (rad/s)
W1 (passe-bas)	1	10-2	735.6
W2 (passe-haut)	10-2	1	6280
W3 (passe-bas)	1	10-2	1000







## Schéma de synthèse







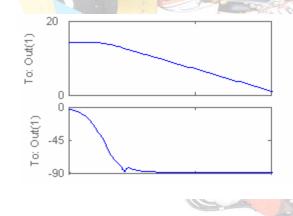


#### **Le correcteur H**∞

- Résultats
  - >Norme
- γ=1.09
- >Correcteur Ordre 27



## Réduction de modèle



### Ordre 22

Diagramme de Bode

- -gain élevé basses fréquences
- -décroit en hautes fréquences







## Application au système

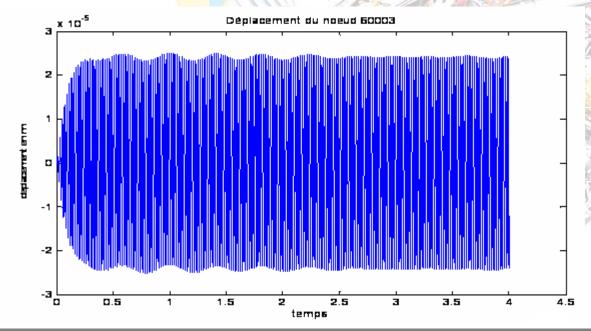
Amplitude de la réponse pour un balourd de 1 g/m

- Sans contrôle: 1,610-3

- Avec contrôle:



2,4.10-5



Régime stabilisé au bout de <u>6s</u>







# **Présentation «récapitulatif»**

- Introduction
- Présentation du projet IMPACT
- Cahier des charges
- Modélisation et étude du système
- Dimensionnement et commande de l'actionneur
- Synthèse d'une loi de commande H∞
- Introduction des incertitudes
- Conclusion et Perspectives







## **Introduction des incertitudes**

- Nature:
  - Amplitude du Balourd



Incertitudes sur l'entrée

- Incertitude du modèle

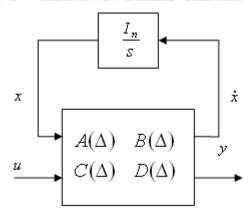


Incertitudes paramétrique sur l'état du système

Modélisation:

$$\dot{x} = A(\Delta) x + B(\Delta) u$$
$$y = C(\Delta) x + D(\Delta) u$$





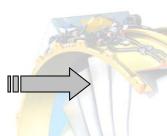
Représentation LFT d'un système linéaire







# **Application au Système**



$$\dot{x} = (A_0 + \Delta_A) x + (B_0 + \Delta_B) u$$
$$y = C x + Du$$

Incertitudes sur l'état



Incertitudes v.p





$$\Delta_A = 10\% * canon(A_0)$$

Incertitudes sur balourd ....



+/- 100 %



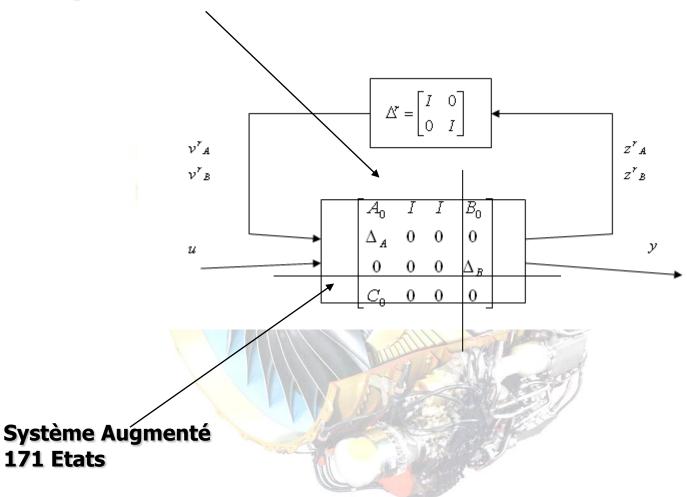
$$\Delta_B = B_0$$
,







# **Système Incertain**









# Présentation «récapitulatif»

- Introduction
- Présentation du projet IMPACT
- Cahier des charges
- Modélisation et étude du système
- Dimensionnement et commande de l'actionneur
- Synthèse d'une loi de commande H∞
- Introduction des incertitudes
- Conclusion et Perspectives







# **Conclusion et Perspectives**

- Amélioration du comportement dynamique du système en BF
- Meilleure modélisation du système
- Nouvelles connaissances acquises
- Démarche progressive
- Travail en collaboration avec d'autres équipes
- Utilisation modèle final
- Intégration Matlab des différentes parties
- Etude de la robustesse par **µ-analyse**

Merci à tous







# **Bibliographie**

- Les différents documents des partenaires relatives au projet
- Thèse Isolation Active d'un Moteur d'Avion [P. Vannier 94 ECL]
- Commande H∞ et µ—Analyse [G. Duc & S. Font Supélec]
- Commande des Systèmes Linéaires [P. De Larminat]
- Conception de Commandes Robuste [J. Bernussou]
- Linear Franctional Representation [J-F. Magni ONERA]
- Design of a robust self-scheduled missileautopilot by multi-model eigenstructure assignement [Y. LEGORREC Lagep]
- Multimodel-Based Approach to Robust and Self-Sheduled Control Design [Y. LEGORREC]
- Thèse Commande Robuste avec contrainte d'ordre pour la norme H∞ et LMI [Valentin]
- Thèse Validation de modèle de systèmes incertains [O. Mouhib Supélec]
- Thèse Commande Multivariable Robuste pour les approches LQG/LTR et H∞ [Mammar]
- Thèse Commande Robuste pour l'Assistance au Contrôle d'un Véhicule [T. Raharijaona]
- ......







