
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

École Nationale Polytechnique

Département d'Automatique



Projet de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme
De Master en Automatique
Thème :

Modélisation, Simulation, Conception de lois de Commande et Diagnostic d'un Système d'Inversion de Poussée d'un Avion.

Étudié par :

MOKRANE Hani Kamil
BENSALAH Amina

Proposé et dirigé par :

M.DEBIANE Achour
M.TADJINE Mohamed

Juin 2013

Remerciements

À l'issue de ces cinq années de dures labeurs à l'Ecole Nationale Polytechnique, nous tenons à remercier l'ensemble des personnes ayant contribué à notre épanouissement tant sur le plan intellectuel que social.

Après quatre mois de stage au sein du pôle R&D de l'entreprise CERTIA, nous remercions en premier lieu son manager M.DEBIANE Achour qui nous a d'abord gratifié de sa confiance en nous mettons au cœur du développement d'un projet de l'envergure de PRESAGE “ Plateforme Réelle Et Simulée d'Actionnement Générique et Évolutif ”, plus encore, il n'a cessé de nous encourager et nous aider en nous prodiguons de précieux conseils dans notre démarche scientifique.

Nous tenons aussi à remercier notre encadreur à l'Ecole Nationale Polytechnique M.TADJINE Mohamed qui avec ses compétences et qualités scientifiques a permis le développement de nombreuses idées innovantes.

Nous exprimons ainsi toute notre reconnaissance aux deux personnes cités ci haut pour leur soutien permanent et sympathie dont ils ont su faire preuve tout en espérant que la collaboration entre l'Ecole Nationale polytechnique et CERTIA R&D ne s'arrêtera pas en si bon chemin.

Nous tenons à exprimer notre gratitude et notre plus grande estime à M.BOUCHERIT Mohamed Seghir qui nous a fait l'honneur d'être le président de ce jury.

Aussi, nous exprimons nos plus vifs remerciements à M.CHAKIR Messaoud qui nous honore en participant à l'évaluation de ce travail.

Par ailleurs, nous tenons à adresser nos plus sincères remerciement à toutes l'équipe CERTIA R& D, équipe tellement unis que vous êtes devenu une famille : Nassim le polytechnicien,

Abdelkader, Hicham, Smati, Yacine, Nassim, Saber et Taous sans oublier Mme RARRBO Ouahiba et le restaurateur “ BNINE ” sans qui nos pauses déjeuner aurait été bien ternes .

Nous tenons à remercier tous nos enseignants et encadrement pédagogique de l'Ecole Nationale polytechnique et toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à tous ceux qui comptent, famille et amis, pour leur soutien sans faille.

Nous saluons enfin le lecteur de ces lignes et espérons qu'il trouvera ce qu'il est venu chercher dans les pages qui suivent.

Dédicace

Je dédie ce travail à mes parents qui ont toujours été là pour moi, mes amis : Dalia, Amina et leurs moments de folie, Mourad, Chafik, Moh... à tous ceux que j'ai oublié...

À une amie qui m'est très chère, Aziza, une personne qui m'a soutenu avec un état d'esprit « no stress ».

Mes cousines Racha et Mimi qui m'ont témoigné leurs soutiens dans les bons comme dans les mauvais moments.

L'équipe CERTIA R&D ne pouvait répondre absente à ces dédicaces : Au poste de roi du Matlab et du Mupad NASSIM, expert « bond graph » ABDELKADER et sans oublier le géant du mailing HICHEM. Par ailleurs, je voudrais adresser un vif remerciement à mon binôme AMINA, pas seulement pour son travail sans relâche, son professionnalisme, son sérieux, son abnégation et sa volonté de fer, mais aussi et surtout pour sa capacité me supporter par moment ...

Kamil

Dédicace

À la mémoire de ma grand-mère

À mes chers parents,

À mes sœurs Asma et Nour el Houda,

À mes frères Ibrahim et Ilyes,

À toute ma famille,

À mon binôme Kamil,

À toutes mes amies de NEW,

À Krimo, Hayet, Rekia et Mohamed,

À Louisa et ses parents,

À Salima et Lyna,

À toute l'équipe de CERTIA R&D,

À tous mes amis de l'ENP,

À tous ceux que j'aime,

Je dédie ce travail,

Amina

Table des matières

Acronymes	viii
Introduction Générale	1
1 Diagnostic des défauts	4
1.1 Introduction	4
1.2 Définition et généralités sur les défauts	6
1.2.1 Définitions	6
1.2.2 Types de défauts	7
1.2.3 Méthodes de diagnostic des défauts	7
1.3 Identification des défauts sur le système d'inversion de poussée cas test "PRE-SAGE"	9
1.4 Le diagnostic par l'analyse en composante principale(ACP)	9
1.5 Construction du modèle PCA	10
1.5.1 Détermination d'un modèle ACP en absence de bruit et de perturbation	15
1.5.2 Détermination d'un modèle ACP en présence de perturbation	15
1.5.3 Détermination d'un modèle ACP en présence de bruit	15
1.5.4 Génération de résidu	16
1.6 Détection de défaut	17
1.6.0.1 Indice de SPE	17
1.6.0.2 Indice T^2 de Hotelling	17
1.6.0.3 Indice combiné	18
1.7 Localisation de défauts	18
1.7.1 Structuration des résidus	19
1.8 Application au système d'inverseurs de poussée	20
1.8.1 Paramètres mesurés	20
1.9 Conclusion	22

4

4

Conclusion Générale

23

Bibliographie

25

Table des figures

1.1	Différents types de défauts	8
1.2	Principe de la méthode PCA	11
1.3	L'espace principal et l'espace résiduelle	14
1.4	Interprétation graphique de l'ACP en 2D	14
1.5	Courant Rotorique	21
1.6	Résidu pour le courant Rotorique	22

Liste des tableaux

1.1 Exemple d'une matrice de signateur théorique (quatre variables) 19

Nomenclature

Notation	Dénomination	Unité
l_{tube}	Allongement du tube	m
BL	Bras de Levier	
n	Bruit de mesure	
K_{em}	Coefficient de force contre-électromotrice	$N.m.A^{-1}$
PV	Constante du système vis-écrou	$m.rad^{-1}$
C_2	Couple appliqué à l'arbre de sortie du réducteur	$N.m$
C_1	Couple appliqué à l'arbre d'entrée du réducteur	$N.m$
x_{tube}	Déplacement du bras de levier	m
e	Erreur entre la référence et la sortie du système	
ϕ_{La}	Flux magnétique à travers le bobinage du moteur	T
$S(s)$	Fonction de sensibilité	
$T(s)$	Fonction de sensibilité- inverse	
F_{vis}	Frottement de la vis	$N.m.s.rad^{-1}$
δ_{f_i}	Incertitudes des fonctions non linéaires	
r	Indice de réduction	
L_a	Inductance statorique	H
J_c	Inertie de la charge	$kg.m^{-2}$
J_{vis}	Inertie de la vis	$kg.m^{-2}$
J_a	Inertie des parties tournantes de l'actionneur	$kg.m^{-2}$
Σ	Matrice de covariance des données	
X_d	Matrice de données représentant le fonctionnement normal du système	
Ξ	Matrice diagonale contenant les valeurs propres de Σ	
$h_{J_{porte}}$	Moment cinétique de la porte	$Kg.m^2.s^{-1}$

X_{cr}	Matrice des données centrées représentant le fonctionnement normal	
$h_{J_{vis}}$	Moment cinétique de la vis	$Kg.m^2.s^{-1}$
h_{J_m}	Moment cinétique de l'arbre	$Kg.m^2.s^{-1}$
N	Nombre de mesures effectuées	
m	Nombre de variables mesurées	
l	Nombre des composantes principales	
ψ_{MR}	Non linéarité du système de conduite -vis-	
ψ_{tube}	Non linéarité du système de conduit -tube-	
K_{arbre}	Raideur de l'arbre	$N.m.rad^{-1}$
K_{tube}	Raideur du tube	$N.m^{-1}$
ν	Rendement du réducteur	
R_a	Résistance statorique	Ω
u	Signal de commande	
d	Signal de perturbation en sortie	
r	Signal de référence	
$x(k)$	Vecteur de mesure à l'instant k	
ω_2	Vitesse de l'arbre de sortie du réducteur	$rad.s^{-1}$
ω_1	Vitesse de l'arbre d'entrée du réducteur	$rad.s^{-1}$
ω_m	Vitesse du moteur	$rad.s^{-1}$

ACRONYMES

ACP	Analyse en composantes principales
EMA	ElectroMechanical Actuator'
PBW	Power-By-Wire
Dymola	Dynamic Modeling Laboratory
ETRAS	Electrical Thrust Reverser Actuation System
EDP	Equation aux Dérivées Partielles
EDA	Equation Différentielle et Algébrique
EDO	Equation Différentielle Ordinaire
HIL	Hardware-In-TheLoop
SPE	Squared Prediction Error

INDICES

c	Charge
aero	Charge aérodynamique
d	désiré
r	Espace résiduelle
p	Espace principale
m	Moteur
cr	Variable centrée

Introduction Générale

L'aéronautique est un domaine qui connaît et connaîtra un essor encore plus important dans les dix prochaines années .A titre d'exemple, la récente commande de la compagnie indonésienne Lion Air d'A320 Néo s'élevant à plus de 18 milliards d'euros est la preuve que ce secteur créera encore plus d'emploi à l'avenir. Par ailleurs, le monde dans lequel nous vivons aujourd'hui est en pleine mutation, la crise fait encore (et toujours) des dégâts dans pratiquement tous les secteurs d'activités. Ainsi, une entreprise aujourd'hui a besoin d'un excellent pôle R&D, qui sera à même d'assurer une innovation et une amélioration de ses performances au quotidien. Ce n'est qu'ainsi que cette entreprise assurera sa pérennité.

Aussi, c'est dans ce contexte socio-économique que s'est articulé notre projet de fin d'études non pas en faisant abstraction du monde qui nous entoure mais plutôt en jetant un regard attentif à ce dernier.

Notre projet s'inscrit comme une partie du vaste projet de recherche appelé PRESAGE “ Plateforme Réelle Et Simulée d'Actionnement Générique et Adaptive”, ce projet labélisé par le pôle de compétitivité Mov'eo et financé par deux organismes français, le ministère de la Défense et la DGA (Direction Générale de l'Armement). A travers son pôle R&D basé à Alger, l'entreprise CERTIA “ Centre d'Études et de Recherche pour les Techniques Industrielles Appliquées ” en collaboration avec notre encadrement pédagogique au département d'Automatique de l'ENP, nous a donné tous les moyens afin d'apporter nos connaissances acquises durant ces années de durs labeurs au service du développement de la R&D en Algérie à travers PRESAGE. L'objectif principal de ce projet est la virtualisation des processus de validation et de vérification en développant une plateforme d'essai virtuelle permettant par modélisation et simulation d'établir les tests désirés. Cette plateforme a pour but d'apporter une aide à la conception, la formation ainsi qu'à l'utilisation future des moyens d'essais.

PRESAGE doit aussi permettre des gains tant en termes d'optimisation qu'en terme de définition des essais (que doit-on faire avec le moyen d'essai, quelle sont les fonctions

nécessaires à tester, quelles sont les approches les plus optimisées...etc).

Les principales retombées scientifiques attendues sont de proposer une approche générique de construction de modèles pour les systèmes complexes, le développement d'une plateforme de co-simulation permettant de gérer des modèles de forme et de structure différente ou encore d'automatiser les procédures de tests sur bancs d'essais virtuels pour tout type de champ applicatif.

Du point de vue économique, PRESAGE vise à réduire considérablement les cycles et les coûts de développement des bancs d'essais d'intégration, rendre possible la simulation en cas de pannes sans avoir à endommager ou détruire des équipements réels et ainsi contribuer à la sécurisation des processus de développement.

Ce travail est en parfaite concordance avec la tendance " plus électrique " dans le domaine aéronautique. A fortiori, l'avion de ligne des années 2015-2025 verra un accroissement de ses fonctions électriques. Les Boeing 787 et l'Airbus A380 ouvrent la voie, les futurs monocouloirs moyen-courriers leur emboîtent le pas (A350 ou encore le prochain Comac C919 chinois).

Trois raisons expliquent cet engouement : d'abord l'objectif permanent de réduire la masse globale de l'avion et donc sa consommation en carburant. En effet, l'utilisation de systèmes électriques à la place de circuits hydrauliques donne de la flexibilité en termes de conception. Cela permet ainsi d'optimiser les architectures des systèmes de l'avion, et d'aboutir finalement à des gains de masse. Ensuite, cette même flexibilité de conception offre un important potentiel de customisation des systèmes. Enfin, la maintenance promet d'être plus efficace car les circuits électriques peuvent être contrôlés en temps réel et leur vérification est plus facile que la recherche d'une fuite hydraulique. Pour autant, pas questions pour les ténors du domaine de " remplacer " du jour au lendemain la canalisation et les pompes hydrauliques par des câbles et des moteurs électriques : le règne annoncé de l'énergie électrique est une véritable révolution qui engage l'architecture même des aéronefs pour obtenir des gains substantiels. Et parce que la conception des avions est un processus de longue haleine, les acteurs de la filière ont obligation de travailler ensemble dès aujourd'hui pour préparer l'avion du futur.

Le but de notre travail qui s'articule en trois parties est le suivant : apporter des améliorations et une plus-value au travail déjà réalisé sur la modélisation et la commande d'un système aéronautique particulier, l'inverseur de poussée. Ce dernier et dans le cas test PRESAGE, a été développé par la société AIRCELLE, filière du groupe SAFRAN.

En premier lieu, nous allons donner dans la partie modélisation une grande importance à la définition du système en question non sans expliquer son rôle prépondérant dans un aéronef.

En deuxième partie, nous allons exposer deux solutions que nous préconisons en termes de choix de techniques de commande robuste pour le système d'inversion de poussée, tout en comparant avec la commande réalisée en amont et basé sur un PID simple.

En troisième lieu, nous nous sommes attelés à étudier un problème récurrent et d'autant plus important dans les systèmes aéronautique, le diagnostic de défauts.

Nous présentons ci-dessous l'organisation du notre mémoire :

La première partie du notre mémoire englobera toute la terminologie du diagnostic nécessaire au développement de ce qui va suivre. En second lieu, nous exposerons les différents types de défauts ainsi que leurs comportements. La troisième partie décrira la méthodologie par Analyse en Composantes Principales, une approche de diagnostic « sans modèles » pour aboutir à la détection, localisation et présentation d'un résultat de simulation.

Diagnostic des défauts

1.1 Introduction

Dans notre souci de donner encore plus de valeurs à ce travail, nous nous sommes intéressés au diagnostic des défauts dans les systèmes physiques. En effet, afin de permettre aux avions de continuer leurs missions en cas de défauts, il est indispensable d'identifier les changements imprévus qu'on appelle défauts du système avant qu'ils ne conduisent à une situation de non-retour où, en d'autres termes à une incapacité totale qu'on appelle défaillance.

Nous avons vu dans le chapitre Commande par H_∞ Loopshaping un type de commande tolérante aux défauts (également appelé reconfiguration) passive, dans cette dernière on fait uniquement appel à la commande robuste. Cette dernière présente cependant quelques faiblesses. En effet, la commande tolérante aux défauts passive est valable seulement pour un certain type de défauts et pour une amplitude donnée de ces derniers.

Par ailleurs, la moindre défaillance sur un processus (en particulier un système aéronautique) est néfaste dans un environnement où le rendement est primordial. Il est donc plus que nécessaire de s'assurer en permanence du bon fonctionnement de processus vis-à-vis des objectifs qui lui ont été assignés. L'information permettant de traduire le comportement d'un système est donnée par les mesures des variables de celui-ci. La qualité des mesures est un élément essentiel pour permettre la surveillance et l'évaluation des performances d'un processus. La qualité de l'information peut être accrue en améliorant la précision de l'instrumentation et en multipliant le nombre de capteurs. Cependant et pour des raisons techniques et/ou financières, cette solution se montrera inadéquate dans un certain nombre de cas. De plus, cette redondance matérielle ne permet pas de se protéger contre une défaillance de certains

éléments communs de la chaîne de mesure : plusieurs capteurs mesurant la même grandeur sont généralement géographiquement voisins et alimentés par le même réseau électrique et ainsi une panne d'alimentation pourra entraîner un arrêt de tout le système de mesure.

L'exploitation de modèles à priori exactes liants différentes grandeurs mesurées offre un autre moyen de vérifier la fiabilité des mesures. Cette redondance analytique présente l'avantage de ne pas augmenter le coût de l'installation et de se dégager des contraintes matérielles. Dans le domaine du diagnostic, des méthodes basées sur le concept de redondance de l'information ont été développées. Leur principe repose généralement sur un test de cohérence entre un comportement observé du processus fourni par des capteurs et un comportement prévu fourni par une représentation mathématique du système. Ce dernier possède un certain nombre de paramètres dont les valeurs sont supposées connues lors du fonctionnement normal. La comparaison entre le comportement réel du système et le comportement attendu donné par le modèle fournit une quantité appelée résidu qui va servir à déterminer si le système est dans un état défaillant ou non et de préciser le cas échéant la partie ou le composant du système défaillant. Dans ce chapitre, nous allons décrire la procédure à suivre pour le diagnostic de défaut par la méthode de l'Analyse en Composantes Principales.

Par ailleurs, la première partie englobera toute la terminologie du diagnostic nécessaire au développement de ce qui va suivre dans les chapitres suivants. En second lieu, nous exposerons les différents types de défauts ainsi que leurs comportements.

La troisième partie décrira la méthodologie par Analyse en Composantes Principales, la détection, localisation et présentation d'un résultat de simulation.

1.2 Définition et généralités sur les défauts

1.2.1 Définitions

Défaut : C'est modification inattendue d'une propriété ou d'un paramètre caractéristique du système surveillé par rapport au fonctionnement acceptable ou habituel.

Défaillance : Interruption permanente de la capacité du système à accomplir sa mission, compte tenu de ses conditions de fonctionnement.

Panne : C'est une interruption permanente de la capacité du système à réaliser sa fonction requise.

Symptômes : C'est la traduction d'une modification d'un comportement d'une variable détectée par comparaison à des valeurs de référence.

Détection de défauts : C'est une modification suffisante et permanente des caractéristiques physiques d'un système ou d'un composant pour omettre la réalisation d'une fonction dans les conditions prévues. Les défaillances peuvent être classées en défaillances dures (hard failures) et défaillances soft (soft failures, ou défaillances progressives). Les premières sont dues à des événements soudains et difficiles à prédire, ces défaillances inattendues affectent gravement le fonctionnement normal du système. Les défaillances soft sont liées à une perte de performance plutôt qu'à une défaillance qui perturbe de façon évidente le fonctionnement normal du système. Son apparition n'est pas soudaine comme dans le cas des premières.

Localisation de défauts : Elle a pour but la classification des défauts suivant leurs type et leur emplacement dans le système.

Résidu : C'est un signal qui reflète la cohérence (ou la consistance) des données mesurées vis-à-vis d'un modèle comportemental du système.

Diagnostic : Le diagnostic d'un processus est par définition la détection d'un défaut, la recherche de l'origine de cette défaillance détectée et la prise de décision pour neutraliser l'effet de celle-ci afin de retourner à l'état normale.

La tolérance aux fautes : C'est la capacité d'un système asservi à maintenir les objectifs de la régulation en dépit de fautes de capteurs ou d'actionneurs. Cela peut se faire à l'aide d'une accommodation ou d'une reconfiguration.

L'accommodation aux fautes : C'est le fait de changer les paramètres du régulateur en vue de maintenir les objectifs sans changer les dimensions entre entrées et sorties du système.

La reconfiguration : C'est le fait de changer les paramètres ou la structure du régulateur en changeant les dimensions entre entrées et sorties du système.

1.2.2 Types de défauts

On peut classifier les défauts suivant l'élément du système qu'ils affectent.

- Défaut de capteur : C'est une variation anormale d'une mesure, telle qu'une erreur systématique entachant subitement les données issues d'un accéléromètre d'une centrale inertielle.
- Défaut système ou composants : Ce sont des changements dans les paramètres internes du système qui entraînent une modification de sa dynamique, par exemple une redéfinition inattendue des coefficients aérodynamique.
- Défauts actionneurs : Il représente un dysfonctionnement d'un dispositif agissant sur la dynamique du système, par exemple le blocage d'un aileron.

Par ailleurs, on dit qu'un défaut est additif si il affecte le comportement du procédé indépendamment des entrées connues (exemple : défauts actionneurs et capteurs). Et on dit qu'un défaut est multiplicatif (défauts système) si il affecte le processus d'une manière dépendante des entrées connues.

Par ailleurs, il est possible de distinguer trois types de défauts selon leurs évolutions temporelles :

- Les défauts progressif(dérives) : Ils représentent les changements lents des valeurs paramétriques. Ceci est souvent dus au vieillissement. Ces défauts sont assez difficile à détecter en raison de leurs dynamiques lente.
- Les défauts brusques (biais) Ces défauts se produisent instantanément et souvent à cause de dommages matériels. Habituellement, ils sont très graves car ils affectent les performances et/ou la stabilité du système. De tels défauts exigent de la commande tolérante aux défauts une réaction rigoureuse.

1.2.3 Méthodes de diagnostic des défauts

Il existe deux types de méthodes de diagnostic, les premières sont dites "sans modèles". En effet, lorsque nous n'avons pas de modèle du système qui soit correctement exploitable, la

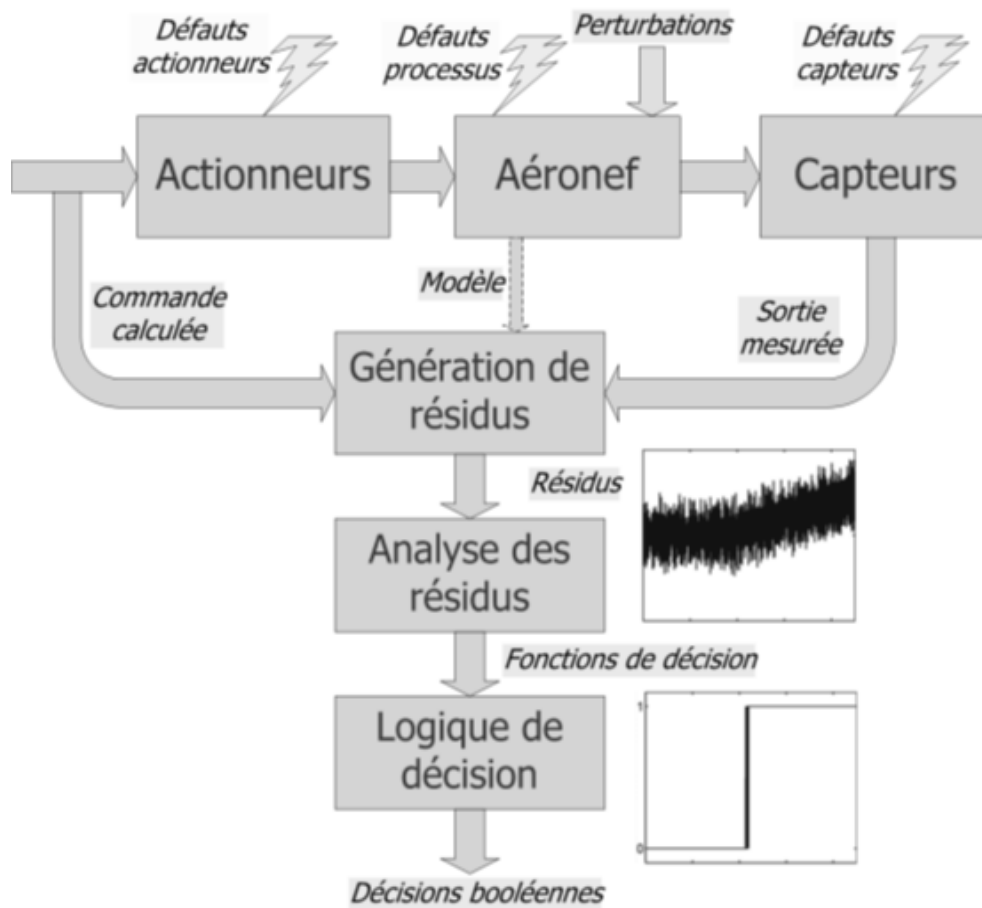


FIGURE 1.1 – Différents types de défauts

connaissance à priori du processus se limite aux mesures acquises en temps réel complétées par un éventuel historique du fonctionnement du processus. A partir de là, deux pistes peuvent être empruntées. La première est la régression, qui vise à créer un modèle empirique en exploitant la redondance inhérente à la base de données pour prédire les valeurs des différentes variables et la relation qui existent entre elles. Par la suite, nous pourrions générer des résidus en le comparant à leurs mesures (il s'agit de la méthodologie choisie dans ce qui suit et nous expliquerons plus en détail les raisons d'un tel choix).

La seconde approche est la classification, qui implique la construction de classes de fonctionnement dans la base de données de manière supervisée (avec l'aide d'un expert) ou semi-supervisée (création automatique de classes regroupant les éléments jugés proches, puis on fait appel à l'expert pour identifier ces classes). Un classeur est alors entraîné à distinguer ces classes pour permettre de placer un nouveau point dans une de celles-ci (selon que l'on soit dans un mode de fonctionnement défaillant ou pas).

Parmi les méthodes classées "sans modèles", on peut citer le diagnostic par reconnaissance de formes, l'approche par Analyse en Composantes Principales ACP, qu'on développera dans

ce qui suit, ou les approches qualitatives.

Par ailleurs, il existe des méthodes dites “ avec modèles ”, ces dernières se basent toujours sur une représentation mathématiques du systèmes, la génération de résidus se fera en comparant les résultats observés(ou construits) et les données mesurés. Parmi ces méthodes, on peut citer l'approche déterministe par observateur de Luenberger ([TAD11](#)), les méthodes d'identification([BOU10](#)), les approches stochastiques type Filtre de Kalman(FDK), à erreurs bornée ou encore l'espace de parité .

1.3 Identification des défauts sur le système d'inversion de poussée cas test “PRESAGE”

En se référant à la description du système donné en amont et aux commentaires des experts connaissant le système en question, nous avons pu lister un certain nombre de défauts pouvant se produire :

- Un grippage au niveau de la vis en bout de pallier.
- Augmentation/réduction de la tension d'un ressort
- Biais sur les différents capteurs (capteur de position pour la fonction d'autopilotage, capteur de position fournissant une image de la position de la porte vis-à-vis de la structure moteur)
- Augmentation de la friction dans les deux réducteurs (Réducteur de puissance, réducteur de mesure)
- Mauvais facteur d'échelle sur les différents capteurs .

1.4 Le diagnostic par l'analyse en composante principale(ACP)

Le choix de cette méthode n'est point fortuit, en effet, bien qu'elle pourra apparaitre au lecteur relativement fastidieuse, elle comporte bien plus d'avantages que d'inconvénients.

L'analyse en composante principales (PCA Principal Components Analysis en anglais) est initialement une méthode statistique qui permet de réduire la dimension d'une matrice de données. En effet, elle transforme un premier jeu de données en un second jeu de plus petite dimension composé de nouvelles variables qui sont des combinaisons linéaires des variables originelles. En d'autres termes, elle consiste en la projection de ces données d'apprentissages

sur les l vecteurs propres de la matrice de covariance qui sont associées aux valeurs propres supérieures à un certain seuil, nous reviendrons dans ce qui suit plus en détail sur le choix de l appelé nombre de composantes principales. L'ACP (Analyse en Composantes Principales) a été utilisé en premier temps de manière graphique pour synthétiser l'information des jeux de données de grandes dimensions.

La classification de cette méthode est un peu particulière, en effet, on trouvera dans la littérature que l'ACP est cataloguée avec les méthodes de diagnostic sans modèles. Cependant, l'ACP élabore un modèle du système à partir des données expérimentales prélevées sur le système, elle peut donc être considérée comme une méthode d'identification à part entière. Par ailleurs, il existe un lien entre l'ACP et les méthodes d'identification des sous-espaces. L'ACP permet d'établir sans optimisation non linéaire ni paramétrisation canonique, un modèle d'un système MIMO en estimant les paramètres et l'ordre approprié du modèle. La tâche de détermination du modèle d'état se montrant souvent délicate (nous avons vu cela avec le problème de conditionnement dont souffrait notre modèle d'état), l'ACP permet d'obtenir directement les relations de redondances analytiques entre les variables sans identifier les matrices de la représentation d'état. De plus, et contrairement à pas mal de méthodes d'identification, l'ACP considère que les variables d'entrées comme celles de sortie sont entachées d'erreurs de mesure. Cependant, l'ACP souffre de certaines faiblesses lié au fait que la validité du modèle ACP dépendra de la "richesse" des données expérimentales utilisées pour l'élaborer.

En résumé, pour le diagnostic d'un système, l'ACP permet de déterminer les relations de redondances entre les variables. Ces dernières sont ensuite utilisées pour détecter et localiser les défauts.

1.5 Construction du modèle PCA

Tout d'abord, on doit construire une matrice de données $X_d \in \mathbb{R}^{N \times m}$ sans effectuer de distinction entre les entrées et sorties du système. N est le nombre de mesures effectuées pour chacune des variables considérées et m est le nombre de ces variables.

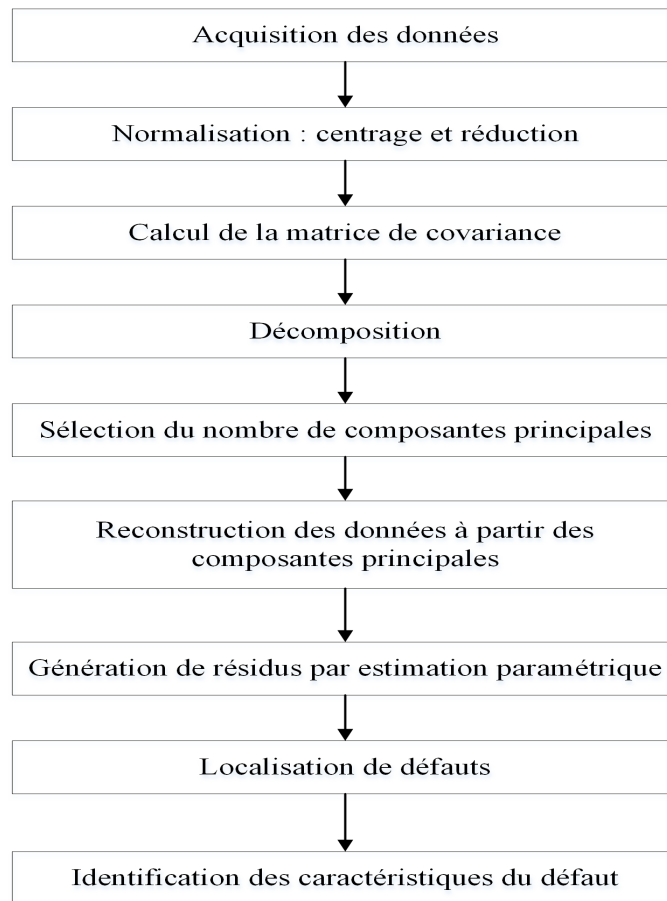


FIGURE 1.2 – Principe de la méthode PCA

En premier lieu, on peut écrire :

$$X_d = \begin{pmatrix} x_1(1) & x_2(1) & \cdots & x_m(1) \\ x_1(2) & x_2(2) & \cdots & x_m(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1(N-1) & x_2(N-1) & \cdots & x_m(N-1) \\ x_1(N) & x_2(N) & \cdots & x_m(N) \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

Puis généralement, pour appliquer l'ACP, on centre les données et afin de rendre le résultat indépendant des unités utilisées pour les différentes variables, on réduit ces dernières par rapport à leurs variances respectives.

On obtient finalement une matrice de donnée de la forme :

$$X_{cr} = (x(1) \ x(2) \ \cdots \ x(N)) \quad (1.2)$$

La matrice de covariance empirique \sum sera exprimée comme suit :

$$\sum = \frac{1}{N-1} X_{cr} X_{cr}^T \quad (1.3)$$

Ou encore :

$$\Sigma = \Theta \Xi \Theta^T \quad (1.4)$$

Avec :

$$\Theta \Theta^T = \Theta^T \Theta = I_m \quad (1.5)$$

Tel que Θ est la projection orthogonale formée par les vecteurs propre associés aux valeurs propres λ_i de la décomposition en valeurs et vecteurs propres de la matrice de covariance empirique Σ . Quant à $\Xi = \text{diag}(\lambda_1 \ \lambda_2 \ \dots \ \lambda_m)$, c'est la matrice diagonale des vecteurs propres où les termes diagonaux sont ordonnées dans l'ordre décroissant des amplitudes : $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_m$.

Le partitionnement des matrices cités plus haut donnera :

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Theta & \tilde{\Theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Xi & 0 \\ 0 & \tilde{\Xi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Theta & \tilde{\Theta} \end{bmatrix}^T \quad (1.6)$$

Avec :

$$\Theta = (\theta(1) \ \theta(1) \ \dots \ \theta(m))$$

Finalement, on obtient la matrice des composantes principales $\Psi \in \mathbb{R}^{N \times m}$ exprimée par :

$$\Psi = X_{cr} \Theta \quad (1.7)$$

L'étape qui va suivre est la plus importante de la méthode ACP. Elle consiste en la détermination du nombre de composante principales l . Il existe dans la littérature une multitude de méthode pour arriver à désigner ce nombre.

En général, ce sont des règles issues des méthodes heuristiques. Dans notre cas, la technique utilisée consiste en la détermination par un l'utilisateur d'un nombre qu'on notera N_{expert} . La détermination de l se fait comme suit :

$$\left(\frac{\sum_{i=1}^l \lambda_i}{\sum_{k=1}^m \lambda_k} \right) 100 \geq N_{expert} \quad , \quad l < m \quad (1.8)$$

Ainsi on aura :

$$\Psi = \left(\Psi_p^{N*l} \quad \Psi_r^{N*(m-l)} \right) \quad (1.9)$$

$$\Theta = \left(\Theta_p^{N*l} \quad \Theta_r^{N*(m-l)} \right) \quad (1.10)$$

$$\Xi = \begin{pmatrix} \Xi^{l*l} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \Xi^{(m-l)*(m-l)} \end{pmatrix} \quad (1.11)$$

$$C_p^{N*l} = \Theta_p^{N*l} \Theta_p^{(N*l)T} \quad (1.12)$$

Finalement,

$$X_{cr} = \Theta_p \Psi_p^T + \Theta_r \Psi_r^T \quad (1.13)$$

Où Ψ_p et Ψ_r sont respectivement la partie principale et résiduelle de la matrice des composantes principales.

et Θ_p et Θ_r sont respectivement la partie principale et résiduelle de la matrice de projection orthogonale.

Et notons :

$$X_{cr_p} = \Theta_p \Psi_p^T = \sum_{i=1}^l \Theta_i \Psi_i^T = X_{cr} C_p^{N*l} \quad (1.14)$$

et

$$E = X_{cr} - X_{cr_p} = X_{cr} (I - C_p^{N*l}) \quad (1.15)$$

On obtient la décomposition de notre modèle en deux espaces, l'espace principal et l'espace résiduelle.

$$X_{cr} = X_{cr_p} + E \quad (1.16)$$

L'ACP revient à effectuer une rotation du système d'axes initial puisque les vecteurs propres sont orthogonaux entre eux et constituent donc un nouveau repère de coordonnées. Les cosinus entre les nouveaux axes et les anciens sont les composantes des vecteurs propres.

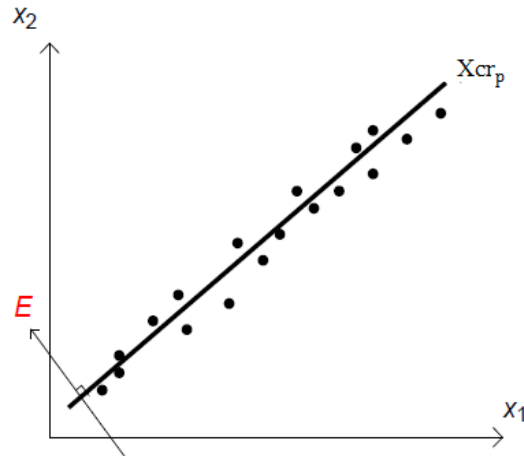


FIGURE 1.3 – L'espace principal et l'espace résiduelle

Pour démontrer encore plus l'avantage d'une telle représentation, considérons l'exemple suivant 1.4 qui représente l'interprétation graphique de l'ACP en 2D en prenant les deux variables x_1 et x_2 .

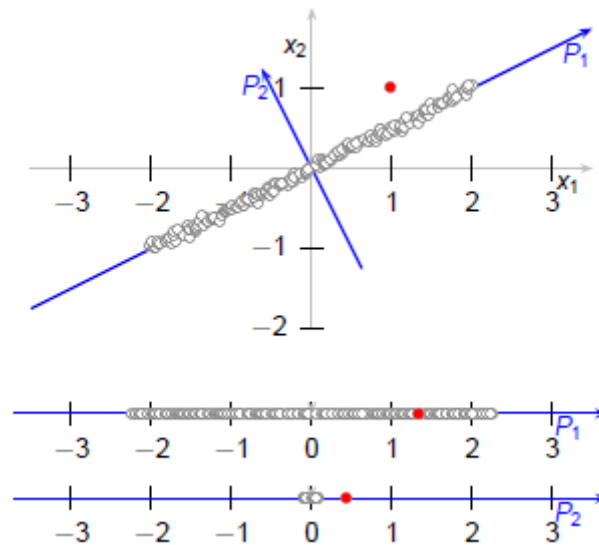


FIGURE 1.4 – Interprétation graphique de l'ACP en 2D

Dans le graphique précédent, on a l'exemple de l'introduction d'un défaut (point rouge), on peut ainsi avoir directement sa projection sur la partie principale P_1 et résiduelle P_2 du modèle ACP.

Par ailleurs, nous pouvons dire qu'il est possible de faire la reconstruction de n'importe quel modèle à condition bien sûr de disposer de données "saines" et suffisamment importante.

L'identification du modèle ACP consiste à estimer ses paramètres par une décompositions en valeurs et vecteurs propres de la matrice Σ et à déterminer le nombre l de composantes principales à retenir.

1.5.1 Détermination d'un modèle ACP en absence de bruit et de perturbation

Soit la matrice de données obtenue en absence de bruit et de perturbation X'_{cr} , construite de N observations. La matrice de covariance Σ' est définie par :

$$\Sigma' = \frac{1}{N-1} X'_{cr} X'^T_{cr} \quad (1.17)$$

La matrice de covariance Σ' possède donc $m-l$ valeurs propres nulles. En prenant en compte (1.11) l'équation (1.6) peut s'écrire de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} \Theta & \tilde{\Theta} \end{bmatrix}^T \Sigma' \begin{bmatrix} \Theta & \tilde{\Theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Xi & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

À partir de l'équation 1.17 on obtient :

$$\Theta'_r X'_{cr} = 0 \quad (1.19)$$

Les $(m-l)$ valeurs propres nulles de Σ' indiquent l'existence de $(m-l)$ relations linéaires entre les composantes de X_{cr} , Le vecteur X_{cr} permet donc de déterminer les équations de redondance, qui seront utilisées par la suite pour générer les indicateurs de défaillance.

1.5.2 Détermination d'un modèle ACP en présence de perturbation

Pour déterminer le modèle ACP en absence de bruit et en présence de perturbation il a été démontré que les vecteurs propres associés aux valeurs propres nulles de la matrice de covariance permettent d'éliminer l'effet des perturbations (QIN01). D'un point de vu identification de système, cette capacité de l'ACP est intéressante. Par contre, pour le diagnostic, la capacité à détecter et isoler les fautes diminue.

1.5.3 Détermination d'un modèle ACP en présence de bruit

Considérons un ensemble de N observations du système avec bruit :

$$X_{cr} = X'_{cr} + P \quad (1.20)$$

Où $P = \begin{pmatrix} p(1) & p(2) & p(3) & \cdots & p(k) \end{pmatrix}$ $k = 1, 2, \dots, N$ les erreurs de mesure sont des bruits blancs qui suivent une distribution Gaussienne de matrice de covariance ϱ . Le logarithme de ϱ s'écrit de la manière suivante :

$$\log \varrho = -\frac{N}{2} \log(2\pi) - \frac{N}{2} \log(|\varrho|) - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N p^T(k) \varrho^{-1} p(k) \quad (1.21)$$

Il s'agit donc de maximiser (vraisemblance) ϱ par rapport à Θ_r et à P sous la contrainte :

$$X_{cr} \Theta_r = 0 \quad (1.22)$$

Une approche a été proposée dans (MES12), sépare le problème en deux. On considère que la matrice de covariance est connue, et on estime les paramètres du modèle. Puis, les paramètres étant connues, on estime la matrice des erreurs de mesures.

1.5.4 Génération de résidu

En considérant un vecteur $x_0(k)$, composé de sa mesure sans défaut $x_0(k)$ perturbée par un bruit blanc $p(k)$ identiquement distribué de moyenne nulle et un défaut sur la $i^{\text{ème}}$ composante d'amplitude $f(k)$, défini comme suit :

$$x(k) = x_0(k) + p(k) + \zeta f_s(k) \quad (1.23)$$

Où $\zeta = [0 \ \cdots \ 1 \ \cdots \ 0]^T$, le 1 scalaire étant à la $i^{\text{ème}}$ position.

Le vecteur des dernières composantes principales est donné par :

$$t_p(k) = \Theta_p^T x(k) \quad (1.24)$$

La projection dans l'espace résiduel est alors :

$$t_r(k) = \Theta_r^T x(k) \quad (1.25)$$

En remplaçant l'équation (1.23) dans l'expression (1.25), la dans l'espace résiduel s'exprime finalement comme suit :

$$t_r(k) = \Theta_r^T (x_0(k) + p(k) + \zeta f_s(k)) = \Theta_r^T p(k) + \Theta_r^T \zeta f_s(k) \quad (1.26)$$

On remarque que la projection des observations dans l'espace résiduel est un résidu, car elle ne dépend que des défauts et des bruits de mesures, alors que pour la projection des observations dans l'espace principal, il reste l'influence des donnés.

Un défaut perturbe donc à la fois les projections des observations dans l'espace principal et dans le résiduel.

1.6 Détection de défaut

Pour détecter des défauts, plusieurs indices sont classiquement utilisés :

1.6.0.1 Indice de SPE

L'indice de SPE¹ réalise la détection de défauts dans l'espace résiduel (THA08) est donnée par :

$$SPE(k) = \|t_r(k)\| \quad (1.27)$$

Le processus est considéré en fonctionnement anormal à l'instant k si l'indicateur de détection de défauts $SPE(k)$ dépasse le seuil δ_a^2 :

$$SPE(k) \geq \delta_a^2 \quad (1.28)$$

Pour détecter un défaut, au lieu de construire un indicateur qui calcule m-1 quantités SPE, on construit m-1 indicateurs le premier SPE est calculé en considérant m-1 composantes principales, puis le second en considérant m-2 composantes principales ainsi de suite jusqu'à m-1 composantes principales. Si un indicateur parmi l'ensemble des indicateurs construits dépasse son seuil de détection le défaut est détecté.

1.6.0.2 Indice T^2 de Hotelling

L'indice T^2 de Hotelling être appliquée, dans le cas de l'analyse en composantes principales, sur les premières composantes principales (HAR03).

$$T^2(k) = t_p(k)^T \Xi t_p(k) \quad (1.29)$$

Cette quantité suit une distribution du χ^2 avec l degrés de liberté.

Le processus est supposé en défaut, à l'instant k , si :

$$T^2(k) > \chi_{l,\alpha} \quad (1.30)$$

Où α est le seuil de confiance. Si le nombre d'observations N est faible, alors le seuil de détection peut être approximé, par la relation :

$$T_\alpha^2 = \frac{l(N^2 - 1)}{N(N - l)} F_{l, N-l, \alpha} \quad (1.31)$$

1. Squared Prediction Error

Où $F_{l,N-l,\alpha}$ est la distribution de Fisher avec l et $N - l$ degrés de liberté.

1.6.0.3 Indice combiné

An d'assurer la détection de l'ensemble des défauts, un indice combiné associe le SPE et le T^2 a été proposé. L'indicateur combiné est défini de la manière suivante :

$$\eta(k) = \frac{T^2(k)}{\chi_\alpha^2} + \frac{SPE(k)}{\delta_\alpha^2} \quad (1.32)$$

on a encore :

$$\eta(k) = x(k)^T \Phi x(k) \quad (1.33)$$

avec :

$$\Phi = \frac{\Theta_p \Lambda \Theta_p^T}{\chi_\alpha^2} + \frac{I - \Theta \Theta^T}{\delta_\alpha^2}$$

Tel que χ_α^2 est le seuil de détection de l'indice T^2 et δ_α^2 le seuil de détection de l'indice SPE.

Pour assurer la détection d'un défaut en utilisant l'indice combiné, il faut que l'amplitude du défaut respecte :

$$\| \Phi^{1/2} x(k) \|^2 > 2g \chi_{h,a}^2 \quad (1.34)$$

avec :

$$g = \frac{\text{trace}(\Sigma \Phi)^2}{\text{trace}(\Sigma \Phi)}$$

1.7 Localisation de défauts

Lorsqu'un défaut est détecté, il est nécessaire d'identifier la ou les variables qui sont en cause, c'est la localisation de défaut. Plusieurs méthodes ont été développées pour réaliser cette tâche :

1. Approche par structuration des résidus.
2. Approche utilisant des bancs de modèles.
3. Par calcul des contributions à l'indice.

Dans notre cas, nous allons utiliser la localisation par structuration des résidus.

1.7.1 Structuration des résidus

À partir de l'équation (1.15) un ensemble des résidus primaires est obtenu en présence de défaut affectant la $j^{\text{ème}}$ variable :

$$e(k) = \Theta_r x(k) = \Theta_r (x_0(k) + \xi_j f_s(k)) = e_0(k) + \Theta_r \xi_j f_j(k) \quad (1.35)$$

avec $E = (e(1) \ \dots \ e(k))$

De façon générale, on cherche à transformer le résidu primaire $e(k)$ de la façon :

$$r(k) = We(k) = We_0(k) + W\Theta_r \xi_j f_s(k) \quad (1.36)$$

Où W est la matrice de transformation et $r(k)$ est le vecteur résidus structurés. Les résidus structurés sont conçus de façon à ce que chaque résidu soit sensible à un sous-ensemble particulier de défauts. Une matrice d'incidence est formée, elle est constituée de 0 et de 1. Les lignes de cette matrice représentent la structure des résidus et les colonnes représentent les signatures des défauts. Chaque élément de cette matrice correspond à l'intersection d'un résidu r_i et d'un défaut f_j . Un 1 dans cette intersection signifie que le $i^{\text{ème}}$ résidu est sensible au $j^{\text{ème}}$ défaut alors qu'un 0 indique que ce résidu n'est pas sensible à ce défaut. Une fois la matrice des signatures théoriques formée, Les lignes ω_i de la matrice W sont alors déterminée de manière à respecter la condition suivante :

$$\omega_i^T D^i = 0 \quad (1.37)$$

avec $D = \Theta_r^T$ et D^i représente une matrice regroupant les colonnes de la matrice D correspondant à des zéros dans la $i^{\text{ème}}$ ligne de la matrice d'incidence.

	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄
r ₁	0	1	1	0
r ₂	0	0	1	1
r ₃	1	0	0	1
r ₄	1	1	0	0

TABLE 1.1 – Exemple d'une matrice de signateur théorique (quatre variables)

Reprenant l'exemple 1.1, l'application de la procédure proposée ci-dessus nous donne : La première ligne de la matrice W doit satisfaire la condition :

$$\omega_1^T [b_1 \ b_4] = [0 \ 0] \quad (1.38)$$

La deuxième ligne de la matrice W doit satisfaire la condition :

$$\omega_2^T [b_1 \ b_2] = [0 \ 0] \quad (1.39)$$

La troisième ligne de la matrice W doit satisfaire la condition :

$$\omega_3^T [b_2 \ b_3] = [0 \ 0] \quad (1.40)$$

La quatrième ligne de la matrice W doit satisfaire la condition :

$$\omega_4^T [b_3 \ b_4] = [0 \ 0] \quad (1.41)$$

Donc, on doit chercher une matrice W telle que pour obtenir un zéro à l'intersection de la $i^{\text{ième}}$ ligne et la $j^{\text{ième}}$ colonne de la matrice de signatures théoriques.

1.8 Application au système d'inverseurs de poussée

1.8.1 Paramètres mesurés

Afin de faire un diagnostic de défauts du moteur, dans notre cas on a choisit comme paramètres mesurés :

1. Courant,
2. Tension,
3. Allongement du tube,
4. vitesse du moteur,

La matrice contenant les observations est donnée par :

$$X = \begin{pmatrix} 100.0000 & 34.4800 & -2.78e - 3 & 0.0002 \\ 200.0000 & 67.9550 & -7.50e - 3 & 0.00025 \\ 450.0000 & 150.0000 & -2.00e - 3 & 0.0026 \\ 500.0000 & 172.4100 & -1.01e - 3 & 0.0027 \\ 600.0000 & 180.3200 & -0.98e - 3 & 0.00275 \end{pmatrix}$$

Après calcul, on trouve les vecteurs des moyennes et d'écart-types :

$$Moyenne = [370.0000 \ 121.0330 \ -0.0029 \ 0.0017]$$

$$Ecart = [210.9502 \ 65.7692 \ 0.0027 \ 0.0013]$$

nous obtenons le Centrage des données :

$$X_{cr} = \begin{pmatrix} -391.0318 & -456.5518 & -491.0346 & -491.0316 \\ -291.0318 & -423.0768 & -491.0393 & -491.0316 \\ -41.0318 & -341.0318 & -491.0338 & -491.0292 \\ 8.9682 & -318.6218 & -491.0329 & -491.0291 \\ 108.9682 & -310.7118 & -491.0328 & -491.0291 \end{pmatrix}$$

Finalement, à partir des relations (1.4) la matrice diagonale des valeurs propres est alors donnée par :

$$\Xi = \begin{pmatrix} 742.0141 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 369.9119 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0152 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0047 \end{pmatrix}$$

La matrice des corrélations :

$$Cor = \begin{pmatrix} 0.000000000011292 & 0.000000000040209 & 0.000001042155186 & 0.000002090458711 \\ 0.000000000040209 & 0.0000000000324487 & 0.000010218540336 & 0.000020497392110 \\ 0.000001042155186 & 0.000010218540336 & 0.329929443314710 & 0.661806272804694 \\ 0.000002090458711 & 0.000020497392110 & 0.661806272804694 & 1.327518812290347 \end{pmatrix}$$

Lors de simulation dans le cas test « PRESAGE », nous présentons le cas d'un défaut système affectant la valeur du courant au niveau du rotor :

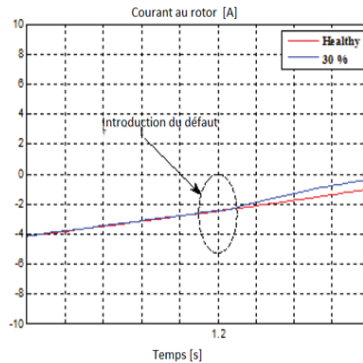


FIGURE 1.5 – Courant Rotorique

Discussion Il apparaît clairement que la valeur du résidu du courant au rotor se détourne de sa valeur moyenne nul à l'instant $t=1.2s$, ce qui est révélateur de l'apparition d'un défaut système au niveau du rotor à ce même instant.

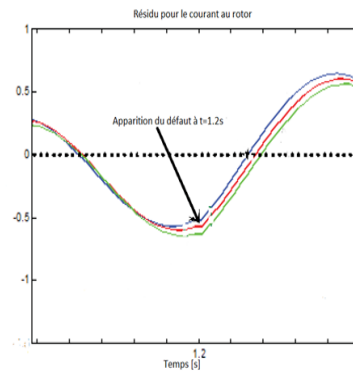


FIGURE 1.6 – Résidu pour le courant Rotorique

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordés une problématique stratégique qui est le diagnostic de défaut sur un système aéronautique. La méthode étudiée est une procédure “sans modèles”, l’Analyse en Composantes Principales, c’est une procédure adaptée au système pouvant fournir des données “saines” et permet de la même manière de considérer des bruits de mesures pour les entrées et les sorties. Un modèle ACP sera ainsi généré, par la suite nous avons vu la méthode de détection et de localisation via l’Analyse en Composantes Principales. L’application a été effectuée pour un défaut système (biais sur le courant au rotor).

Finalement, on peut dire que la méthode par Analyse en Composantes Principales s’adapte parfaitement aux progiciels tels Dymola et AMESim du fait de la possibilité d’utilisation d’un nombre très important de données représentant fidèlement le système en question.

Conclusion Générale

En abordant le travail qu'on nous a soumis, il fut clair que le but recherché fut une double contributions. En effet, d'une part aider au développement de la plateforme virtuelle de l'inverseur de poussée sous un progiciel (Dymola) et d'autre part apporter une réelle plus-value à la commande développée en amont et destinée à contrôler le système d'inversion de poussée dans le cas test " PRESAGE ". Cette dernière (commande) étant basée sur un PID simple, l'enjeu ne fut que plus important. En effet, il est connu que ce type de régulateur soit le plus (et le mieux) utilisée en industrie et ce pour sa grande efficacité prouvée jusque-là. Cependant, et comme dixit un grand journaliste et aviateur français Michel Polacco " Les enjeux de l'aéronautique demain sont : risque zéro ,moins de pollution avec un moindre cout ... ", c'est donc en toute logique que la recherche dans ce domaine se tourne vers des régulateurs ayant un plus fort potentiel de performance et de robustesse.

Dans le chapitre de l'élaboration de plateforme virtuelle sous Dymola, nous nous sommes attelées à adopter la méthodologie la plus optimale qui sera à même de nous garantir des résultats probants. En effet, tout en essayant d'apprendre à maîtriser le progiciel en question (Dymola/Modelica), nous avons travaillé en parallèle pour comprendre le fonctionnement du système multi-physique tout en s'inspirant de la modélisation effectuée sous AMESim. D'autre part, la validation des différents sous modèles a permis d'obtenir de très bon résultats pour la partie électromécanique et hydraulique. Ce dernier présente cependant sous Dymola quelques bémols qui seront à coup sûr effacés en approfondissant le développement et en ayant une meilleure maîtrise des différences existantes entre les deux progiciel (AMESim et Dymola). Nous ajouterons enfin que nous avons présentés les modèles développés sous Dymola à CERTIA ainsi qu'à DASSAULT SYSTEMES et ce pour avoir une vue d'ensemble de l'état d'avancement du projet " PRESAGE ²".

Pour ce qui concerne la partie commande, nous avons axé notre travail sur la recherche d'outils nous permettant d'aller vers plus de performances via des commandes présentant

2. Plateforme Réelle Et Simulée d'Actionnements Génériques et Evolutive

d'être robuste vis-à-vis des perturbation ainsi que des erreurs de modélisation. Pour ce qui est des résultats obtenus pour le Backstepping et le H_∞ Loopshaping et en les comparant aux précédent résultat obtenus avec un PID simple ,nous avons notés une nette amélioration des performances. En effet, bien que l'efficacité de cette dernière commande n'est en rien mise en cause, ses performances dans des environnements soumis à des incertitudes sont altérées. A fortiori, on peut envisager de pousser les recherches encore plus loin en intégrant un régulateur flou pour séquencer les différents régulateurs développées en H_∞ loopshaping en fonction des différentes phases et/ou configurations que peut rencontrer le système d'inversion de poussée. Aussi, pour ce qui est du Backstepping et la commande par trajectoire de référence, il serait judicieux comme perspective de développer d'autre commande du même type pour les différents cas que peut rencontrer le système (par exemple un décollage abandonnée).

En comparant les résultats obtenus, nous pouvons dire que le temps de réponse pour le Backstepping est légèrement meilleur que pour la méthode du H_∞ Loopshaping. Par contre, en termes de robustesse cette dernière s'est montré la plus adaptée au système considéré.

Pour ce qui de la partie où l'on a traité du diagnostic, nous nous sommes axés sur une méthode innovante, l'Analyse en Composantes Principales. Cette dernière, bien que jouissant d'une approche statistique à la base peut se montrer très intéressantes lors du diagnostic de notre système d'inversion de poussée. En effet, dans un environnement complexe ou l'éventualité même de considérer que le modèle est " certain " relève de l'hérésie intellectuelle, il est plus que judicieux de tenter une approche de diagnostic en se basant sur des données " saines " du système et non sur un modèle mathématique. Ce fut l'objet de la dernière partie de ce travail où après avoir introduit cette méthode dite " sans modèles ", nous avons expliqué la méthodologie à suivre lors du diagnostic de défauts sur notre système pour après présenter quelques résultats de simulation.

Comme perspectives, nous pouvons dire que cette dernière approche mérite plus d'attention et d'approfondissement car elle peut aux égards de son fort potentiel de robustesse, apporter une réelle plus-value dans le domaine du diagnostic des systèmes aéronautique.

Bibliographie

- [ABO03] H. Abou-Kandil, G. Freiling, G. Jank, et V. Ionescu, “*Matrix Riccati equations in control and systems theory*”, Birkhäuser, Suisse, 2003.
- [ABO04] H. Abou-Kandil et M. Jungers, “*Commande optimale multicritère : introduction à la théorie des jeux*, chapitre 5, Hermès, France, 2004.
- [AMM77] R.C. Ammer et H. Sowers, “*Thrust reverser design studies for an over-the-wing stol transport, General Electric company*”, NASA-CR-151958, NasaAmes Research Center, Mars 1977.
- [ARC11] L. Arcese. “*Modélisation et commande de microrobots magnétiquement guidés dans le système cardiovasculaire*”, Thèse de Doctorat, Discipline : Automatique et Traitement du Signal, Université d’Orléans, France, Novembre 2011.
- [ARZ02] D. Arzelier et D. Peacelle, “*An iterative method for mixed H_2/H synthesis via static output feedback* », *IEEE Conf Decision and Control*”, Las Vegas, USA, 2002.
- [ARZ04] D. Arzelier et D. Peacelle “*Multiobjective H/H impulse-to-peak synthesis : application to the control of an aerospace launcher*”, IFAC Symp Automatic Control in Aerospace (ACA), Saint-Petersbourg, Russie, 2004.
- [BEN11] O. Bennouna, N. Langlois, “*Commande tolérante aux fautes de l’inverseur de poussée d’une nacelle d’avion* ”, 4ème Workshop du Groupement d’Intérêt Scientifique ‘Surveillance, Sûreté ,Sécurité des Grands Systèmes’ GIS-3SGS’11, Valenciennes, Octobre 2011.
- [BLI99] L. Blin, “*Modélisation statistique et simulation des grandes échelles des écoulements turbulents application aux inverseurs de poussée*”, Thèse de Doctorat, Spécialité Mécanique des Fluides, Université De Rouen, France, Décembre 1999.
- [BOU10] M.Bouarroudj-Berkani, L.Dupont, “*Fatigue des composants électriques de puissance*”, Physique de défaillance, Technique de l’ingénieur d3126, Novembre 2010.

- [BOU11] M. S. Boucherit, “*Systèmes Asservis Linéaires Continus*”, Notes de cours de 3eme année Automatique, Ecole Nationale Polytechnique ,Alger ,2010-2011.
- [BRU02] D. Brück ,H. Elmqvist, S. Mattsson et H. Olsson, “*Dymola for Multi-Engineering Modeling and Simulation*”, 2nd International Modelica Conference, Proceedings, pp. 55-1 -55-8, Mars 2002.
- [BRU06] X. Brun, M. Smaoui et D. Thomasset, “*Systematic control of an electropneumatic system : integrator backstepping and sliding mode control*”, Transactions on Control System Technology, vol. 14, Issue 5, Sept.2006, p. 905- 913.
- [BUT04] J. Butterfield, H. Yao, M. Price, C. Armstrong, S. Raghunathan, E. Benard, R. Cooper et D. Monaghan , “*Enhancement of thrust reverser cascade performance using aerodynamic and structural integration*”, Queen’s University, Belfast, UK, Décembre 2004.
- [C6WP8] Projet : C6E2 WP2, “*État de l’art sur la conception des systèmes d’actionnement électromécaniques Cas test aéronautique MESSIER*”, Institut national des sciences appliquées de Toulouse et Le laboratoire de Génie Mécanique de Toulouse, Avril 2008
- [CAM10] L. Campbell, J. Chancelier et R.Nikoukhah, “*Modeling and Simulation in Scilab/Scicos with ScicosLab 4.4*”, Springer, Springer New York Dordrecht Heidelberg London, Springer Science+Business Media, LLC 2010.
- [CHE11] A. Chebbi, “*Commande Backstepping d’une machine asynchrone sans capteur de vitesse*”, Thèse de Magister, Option : Commande, Université de Batna, Algérie, Février 2011.
- [CHI96] M. Chilali et P. Gahinet , “ *H_∞ design with pole placement constraint : an LMI approach* ». *IEEE Trans Automatic Control*”, Tome 41, n3 pages 358-367, 1996.
- [CHO06] J. Choley, “*Mécatronique : une nouvelle démarche de conception des systèmes complexes, LiSM Laboratoire d’Ingénierie des Systèmes Mécaniques et des matériaux*”, Revue : ‘Technologies Formations’ n 127 ,Paris ,France, 2006.
- [CHO11] A. Choukhou Braham, B. Cherki et M. Djemai, “*A backstepping procedure for a class of underactuated system with tree structure*”. In IEEE International Conference on Communications, Computing and Control Applications, CCCA’11. Hypersciences, Mars 2011.

- [CNR06] Le Centre national de ressources textuelles et lexicales (CNRTL), www.cnrtl.fr/definition/mach, France, février 2006.
- [COG03] S. Cogeze, “*Etude Logiciel CES4*”, mémoire de Licence en Technologie Mécanique, Spécialité : Mécanique, Université du Havre, France, Juin 2003.
- [DAS07] Dassault Systèmes, “*Bulletin des annonces légales*” obligatoires, Publications périodiques, Bulletin n 48, Décembre 2007.
- [DAS81] Dassault Systèmes, “www.3ds.com/fr/company”, éditeur de logiciels et filiale du Groupe industriel Marcel Dassault.
- [DAY85] W. Dayawansa, W. M. Boothby et D. L. Elliott, “*Global state and feedback equivalence of nonlinear systems*”, *Systems Control Letters*, vol. 6, pp.229 -234 ,1985.
- [DEL08] A. Delehelle, “*Étude d’un concept innovant d’un actionneur électromécanique linéaire à effet magnétique et piézoélectrique en vue d’applications dans le domaine des commandes de vol*”, Thèse De Doctorat, Spécialité : Génie Électrique, L’Institut National Polytechnique de Toulouse, Juin 2008.
- [DEM06] M. Dempsey, “*Dymola for Multi-Engineering Modeling and Simulation*”, In Proc. of IEEE-VPCC’06, 6p. Windsor (UK), September 2006.
- [DOY81] J.C Doyle et G. Stein, “*Multivariable Feedback Design : Concepts for a classical/modern Synthesis*”, *IEEE Trans Automatic Control* 26, pages 4-16, 1981.
- [DYN05] Dynasim, PRESS RELEASE, “*DaimlerChrysler, BMW, Audi and Volkswagen choose Dymola for modeling and simulation of air conditioning systems*”, Mars 2005.
- [EJJ10] K. Ejjabraoui, “*Contribution à la conception de systèmes mécatroniques automobiles :méthodologie de pré-dimensionnement multi-niveau multi-physique de convertisseurs statiques*”, Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, France, Décembre 2010.
- [ELH08] B. El hefni et B. Bride, “*Modèles de fonctionnements thermo hydrauliques en régime permanent de centrales : Mira Fiori et biomasse Multi-configuration*”, présentation d’un projet d’EDF-RD (Électricité de France), La journée nationale des utilisateurs de logiciels dédiés la modélisation et au calcul scientifique (LMCS), France, Avril 2008.

- [ESH05] F. Eshbair, “*Modélisation et commande d’un système Multi-moteur par la technique de commande Backstepping*”, Mémoire Maîtrise en génie électrique, L’Université du Québec, Canada, Août 2005.
- [FIC04] P. Fichou, “*Bond graphs : une méthode pluridisciplinaire*”, Revues du CNDP, Technologie, Sciences et techniques industrielles, N133, Septembre-Octobre 2004.
- [FRI02] P. Fritzson, P. Aronsson, P. Bunus, V. Engelson, L. Saldamli, H. Johanson et A. Karström, “*The open source Modelica project*”, pages 297–306, In Proc. of 2nd International Modelica Conference, 2002.
- [FRI03] P. Fritzson, “*Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 2.1*”, IEEE press, Wiley-interscience, 2003.
- [GAA12] S. Gaaloul Chouikh, “*Interopérabilité basée sur Les standards Modelica Et composant logiciel pour la simulation énergétique des systèmes de bâtiment*”, Thèse De Doctorat, Spécialité : Génie Electrique, L’Université De Grenoble, France, Octobre 2012.
- [GOO84] G.C Goodwin et K. Sang Sin, “*Adaptative Filtering Prediction and Control*”, Prentice-Hall, New Jersey, États-Unis, 1984.
- [GUE12] L. Guessas, “*Backstepping Backstepping adaptatif pour le contrôle la poursuite et la synchronisation des systèmes dynamiques non linéaires chaotiques*”, Spécialité : Electronique, Université Ferhat ABBAS, Algérie, 2012.
- [HAD08] H. Hadj-Amor, “*Contribution au prototypage virtuel de systèmes mécatroniques basé sur une architecture distribuée HLA. Expérimentation sous les environnements OpenModelica-OpenMASK*”, Spécialité : Sciences et techniques industrielles, Thèse De Doctorat, Université du Sud Toulon Var, France, Décembre 2008.
- [HAL04] S. Hall, E. Benard et S. Raghunathan, “*Progress in developing innovative flow control in a cascade thrust reverser*”, 24TH International Congress Of The Aeronautical Sciences, School of Aeronautical Engineering, Queen’s University Belfast, UK, 2004.
- [HAM12] M. Hammadi, “*Contribution à l’intégration de la modélisation et la simulation multi-physique pour la conception des systèmes mécatroniques*”, Thèse de doctorat de l’école centrale de Paris, Spécialité génie industrielle, Janvier 2012.
- [HAR03] M.F. Harkat, “*Détection et Localisation de Défauts par Analyse en Composantes Principales*”, Thèse de Doctorat, spécialité Automatique et Traitement numérique du signal, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, Juin 2003.

- [JAN03] G. Jank et H. Abou-Kandil, “*Existence and uniqueness of open-loop Nash equilibria in linear-quadratic discrete time games*”, IEEE Trans. Autom. Control, tome 48, n 2, pages 267–271, 2003.
- [JAR08] Y. AI-Younes, M.A. Jarrah, “*Attitude stabilization of quadrotor UAV using backstepping fuzzy logic backstepping least-mean-square controllers*”, Proceeding of the 5th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA08), Amman, Jordanie, Mai, 2008.
- [JAR10] A. Jardin, “*Contribution a une methodologie de dimensionnement des systemes mecatroniques : analyse structurelle et couplage à l’optimisation dynamique*”, Thèse de Doctorat, Spécialité : Énergie et Systèmes, l’Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, Janvier, 2010.
- [JET08] C. Jettanasen, “*Modélisation par approche quadripolaire des courants de mode commun dans les associations convertisseurs-machines en aéronautique ; optimisation du filtrage*”, l’École Centrale De Lyon, France, Décembre 2008.
- [JMO09] “<http://www.jmodelica.org>” Copyright © 2009 Modelon AB.
- [KAN91] I. Kanellakopoulos, P. V. Kokotovic et R. Marino, “*An extended direct scheme for robust adaptive nonlinear control*”, Automatica, 1991.
- [KAR07] W. Karam, “*Générateurs de forces statiques et dynamiques à haute puissance en technologie électromécanique*”, Thèse De Doctorat, Spécialité : Mécanique, Université de Toulouse, France, 2007.
- [KHA01] H.K. Khalil, “*Nonlinear Systems*”, Systems, 3ème édition, Prentice Hall, 2001.
- [KRS95] M. Krstić, I. Kanellakopoulos, et P. Kokotovic. “*Nonlinear and Adaptive Control Design*”, Wiley-Interscience Publication, 1995.
- [LEC84] N.A. Lehtomaki, B.C. Levy et N.R. Sandell, “*Robustness and Modeling error characterization*”, IEEE Trans Automatic Control, 29(3), 1984.
- [LMS08] LMS FRANCE, “*LMS intègre la compatibilité avec Modelica dans sa plate-forme de simulation système LMS Imagine.Lab AMESim*”, Communiqués de presse du Syndicat de l’Instrumentation de Mesure, du Test et de la Conversion d’Énergie dans le domaine de l’électronique – SIMTEC, Novembre 2008.
- [MAC89] J.M. Maciejowski, “*Multivariable Feedback Design*”, Anddisson-Wesley, Wokingham, U.K, 1989.

- [MAM10] D. Mami, “*Définition, conception et expérimentation de structures d’actionneurs électromécaniques innovants incluant par conception des fonctionnalités de sûreté et de sécurité de fonctionnement*”, Thèse De Doctorat, spécialité : Génie Électrique, L’Université de Toulouse, France, Janvier 2010.
- [MCF92] D.C. McFarlane et K.Glover , “ *A loopshaping design procedure using Hinf synthesis* ”, IEEE Trans Automatic Control, Tome 37, n6 pages 759-769, 1992.
- [MES12] M. Messaadi , “*Commande backstepping appliquée à la machine synchrone a aimants permanents*”, Mémoire de Magister, Discipline : Commande des systèmes électromagnétiques, Universite Hadj Lakhdar, Batna,Algerie, Janvier 2012.
- [MES12] S. Narasimhan et L. Sirish, “*Model identification and error covariance matrix estimation from noisy data using PCA*”, In : IFAC ADCHEM. Hong Kong, Chine, Janvier 2004.
- [NFO06] G. Nfonguem, “*Contribution au développement d’actionneur plus électrique –Modélisation inverse et composants mécanique spécifiques a une application Aéronautique*”, Thèses de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse, France, Janvier, 2006.
- [PAS11] A. Pascoal, “ *Loopshaping (SISO case)*”, Instituto Superior Tecnico, Portugaile, 2011.
- [PLA09] R. Plateauxa, O. Penasa, F. Mhennia, J-Y. Choleya, B. Roumizadeha et A. Rivièrea, “*Vers un environnement intégré pour le pré dimensionnement –Modelica 3D*”, 19ème Congrès Français de Mécanique, France, août 2009.
- [POS09] R. Postoyan, “*Commande et construction d’observateurs pour des systèmes non linéaires incertains a données échantillonnées et en réseau*”, Thèse De Doctorat, Spécialité : Physique, Université Paris-Sud 11, France, Novembre 2009.
- [QIN01] S.J. Qin et W. Li , “*Consistent dynamic pca based on errors-in-variables subspace identification*”, Journal of Process Control, 11(6) : 661–678, 2001.
- [RUE10] J.RUEL, “*Developpement de simulateurs des procédés pour la commande automatique et l’optimisation approche de conception hybride avec modelica et matlab/simulink*”, Mémoire dans le cadre du programme de maîtrise en génie électrique, Université Laval, Québec ,Canada, 2010.

- [SAC84] D. Sacquepey et D.Spenlé , “*Précis de construction mécanique*”, Tome3, Calculs technologie et normalisation, AFNOR, NATHAN, Paris, France, 1984.
- [SAF81] M.G Safonov, A.J Land et G.L Hartman, “*Feedback Properties of Multivariable Systems : The role and use of the return difference matrix*”, IEEE Trans Automatic Control, 26(1), 1981.
- [SAN07] H. Sande, T.A. Johansen, G.O. Kaasa, S.R.Snare et C.Bratli, “*Switched backstepping control of an electropneumatic clutch actuator using on/off valves*”, Proceedings of the 2007 American Control Conference, New York, USA, Juin 2007.
- [SAO06] H. Saoud , “*Étude des problèmes unilatéraux : Analyse de récession, stabilité de Lyapunov et applications en électronique et en mécanique*”, Thèse de Doctorat, Discipline : Mathématiques et ses applications, Département Maths-Info, Laboratoire XLIM, Université De Limoges, France, juin 2009.
- [SCH95] C. Scherer, “*Multi-objective output feedback control via LMI optimization*”, IEEE Trans Automatic Control, tome 40, n6, pages 1054-1062, 1995.
- [SID10] L. Sidhom, X. Brun, E. Bideaux et D. THomasset, “*Suivi de trajectoire en position d’un servo-vérin hydraulique via la technique de Backstepping*”, Université de Lyon – INSA de Lyon , CIFA 2010 Conférence Internationale Francophone d’Automatique, France, 2010.
- [SMA04] M. Smaoui, X. Brun et D. Thomasset, “*A robust multivariable control for an electropneumatic system using backstepping design*”, Symposium on Nonlinear Control Systems, NOLCOS 6th, IFAC symposium, Stuttgart, 1-3 Septembre 2004, p 1193-1198.
- [SMA06] M. Smaoui, X. Brun et D. Thomasset, “*A study on tracking position control of electropneumatic system using backstepping design*”. CEP, vol.14, pp 923-933, 2006.
- [STE87] G. Stein et M.Athaus , “*The LQG/LTR Procedure for Multivariable Feedback Control Design*”, IEEE Trans Automatic Control, Tome 32, n2, 1987.
- [TAD11] M. Tadjine, “*Commande des systèmes multivariables*”, notes de cours de 4eme année, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2011.
- [THA08] Y. Tharrault, “*Diagnostic de fonctionnement par analyse en composantes principales : Application à une station de traitement des eaux usées*”, Thèse Doctorat, Spécialité Automatique et Traitement du signal, Institut National Polytechnique de Lorraine, Décembre 2008.

- [THA06] Y. Tharrault, G. Mourot et J. Ragot ,”Diagnostic de fonctionnement de capteurs d’un réseau de surveillance de la qualité de l’air par analyse en composantes principales itérative”, Centre de recherche en automatique de Nancy (CRAN), Avril 2006.
- [THM00] J. Thoma et B. Ould Bouamama, “*Modelling and simulation in thermal and chemical engineering : Bond graph Approach*”, Springer Verlag, 2000.
- [TUR10] K. Turki, “*Nouvelles approches pour la synthèse de lois de commande non linéaires robustes. Application à un actionneur électropneumatique et proposition d’une solution au problème du redécollage*”, Thèse De Doctorat, Formation Doctorale : Énergie des Systèmes, Institut National Des Sciences Appliquées De Lyon, France, Septembre 2010.
- [VER05] M. Verge, “*Modélisation pour l’ingénieur :approche par Bond Graph*”, 6 ème congrès Européen de Science des Systèmes, France, Septembre 2005.
- [YEG06] N. Yeganefar, “*Définitions et analyse de stabilités pour les systèmes à retard non linéaires*”, Thèse De Doctorat, Discipline : Automatique et Informatique Industrielle, École Centrale De Lille, France, Novembre 2006.
- [ZAU07] G. Zauner, D.l Leitner et F. Breitenecker, “*Modeling Structural - Dynamics Systems in MODELICA/Dymola, MODELICA/Mosilab and AnyLogic*”, 1st International Workshop on Equation-Based Object-Oriented Languages and Tools (EOOLT07), pp : 99-110, Berlin-Germany, juillet 2007.

ملخص:

هذا العمل يدخل في إطار مشروع واسع للبحث والتطوير تحت اسم "PRESAGE" منصة حقيقية ومحاكاة مشغلات ، عامة وقابلة للتطوير" ، يسعى هذا الأخير إلى إنشاء لوحات للتجارب الافتراضية لتحسين أداء النظم وخفض تكلفة التطوير والصيانة. ولتصميم هذه اللوحات استعنا ببرامج مكرسة لهذا النوع من النظم أولها Dymola/Modelica لتصميم الفيزيائي ، و MATLAB/Simulink لمحاكاة نظم التحكم.

النظام الذي تمت دراسته هو عاكس التوجه في طائرات ، واعتمدنا في كل من H_∞ و Backstepping بتتبع مسار مرجعي. في آخر هذا التقرير ، قمنا بتطبيق تقنية لتشخيص الأخطاء في النظام المدروسة ، هذه التقنية تتركز على قواعد إحصائية تتمركز حول تحليل المركبات الرئيسية ACP.

الكلمات المفتاحية: عاكس التوجه ، Dymola ، التحكم بالتراجع ، تقنية H_∞ ، التحليل بالمركبات الرئيسية ، المشغلات الكهرو-ميكانيكية.

Résumé :

Ce travail rentre dans le cadre d'un vaste projet de recherche appelé PRESAGE « Plateforme Réelle Et Simulée d'Actionnement ,Générique et Évolutive » , il vise à franchir une nouvelle étape dans la réalisation de bancs d'essais pour l'aéronautique en vitalisant le processus pour optimiser les performances recherchée. Le développement de la plateforme virtuelle s'est effectué sous Dymola/Modelica pour la modélisation et Matlab/Simulink pour la commande. Le système en question est l'inverseur de poussée, ce dernier revêt d'une importance capitale au sein de l'aéronef .Les commandes développés sont au nombre de deux: le H_∞ Loopshaping et le Backstepping par poursuite de trajectoire référence. En fin de mémoire, nous avons développé une technique pour le diagnostic des défauts basée sur méthode statistique, l'Analyse en Composantes Principales (ACP).

Mots clés : inverseur de poussée, Dymola, Modelica, Backstepping, H_∞ , Analyse en Composantes Principales, actionneur électromécanique.

Abstract :

This work is a part of a colossal scientific research project called "PRESAGE" the acronym of " Plateforme Réelle Et Simulée d'Actionnement ,Générique et Évolutive" (Real Stimulated Generic and Evaluative Platform of Actuation). Its aim is to pass a new stage in the realization of test beds in the aeronautic world by revitalizing the whole process in order to optimize the sought results. The virtual platform has been developed in Dymola/Modelica, while the modeling of the command has been done in Matlab/Simulink. The system is a thrust reverser, which is of a big importance in the aircraft domain. The are two developed commands: a H_∞ Loopshaping and a Backstepping command with tracking the reference trajectory. Finally, we developed a defects diagnosis technique based on a statistic method Principal component analysis (PCA).

Key words : thrust reversal, Dymola, Modelica, Backstepping, H_∞ , Principal component analysis, electromechanical actuator .