



HAL
open science

Contribution à la modélisation et à la commande avancée des moteurs Diesel Composition du Jury

Nicolas Langlois

► **To cite this version:**

Nicolas Langlois. Contribution à la modélisation et à la commande avancée des moteurs Diesel Composition du Jury. Automatique / Robotique. Université de Rouen, France, 2008. tel-01394272

HAL Id: tel-01394272

<https://hal.science/tel-01394272v1>

Submitted on 9 Nov 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Mémoire présenté pour l'obtention

Habilitation à Diriger des Recherches

Contribution à la modélisation et à la commande avancée des moteurs Diesel

Le 8 octobre 2008

Par Nicolas LANGLOIS

Enseignant-Chercheur à l'ESIGELEC

Composition du Jury

Rapporteurs : Ahmed EL HAJJAJI, Professeur à l'Université de Picardie Jules Verne
Gérard Léon GISSINGER, Professeur à l'Université de Haute Alsace
Xavier MOREAU, Professeur à l'Université de Bordeaux 1

Directeur : Houcine CHAFOUK, Professeur à l'ESIGELEC

Examineurs : Olivier SENAME, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble
Michel TRINITÉ, Directeur de Recherche CNRS au CORIA

*A mon épouse Sandrine,
A mes enfants Julien, Nicolas et Valentin,
A mes Parents*

REMERCIEMENTS

J'adresse mes plus respectueux remerciements à Messieurs Ahmed EL HAJJAJI, Professeur à l'Université de Picardie Jules VERNE, Gérard Léon GISSINGER, Professeur à l'Université de Haute Alsace et Xavier MOREAU, Professeur à l'Université de Bordeaux 1 pour avoir accepté d'être rapporteurs de mon Jury. Qu'ils soient assurés de ma plus profonde reconnaissance pour l'attention qu'ils ont portée à ce manuscrit et pour le temps qu'ils ont consacré à son évaluation. Conscient du travail qu'il me reste encore à effectuer et de ce qui est perfectible, je m'attacherai à suivre humblement leurs conseils et recommandations avisés.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Messieurs Olivier SENAME, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble et Michel TRINITÉ, Directeur de Recherches au CORIA qui me font l'honneur de participer à ce Jury en tant qu'examineurs.

J'adresse mes plus cordiaux remerciements à Houcine CHAFOUK, mon Directeur de Recherche pour m'avoir autant impliqué dans les activités de l'équipe « Automatique & Systèmes », pour la confiance dont il fait preuve à mon égard et pour l'expérience qu'il m'a permis d'acquérir dans bien des domaines au cours de ces huit années.

J'adresse mes plus sincères remerciements à Messieurs Claude GUILLERMET, Directeur Général de l'ESIGELEC et Belahcene MAZARI, Directeur de l'IRSEEM pour leur soutien sans faille de mes activités de pédagogie et de recherche.

Je tiens à exprimer toute ma sympathie à Ghaleb HOBLOS, Enseignant-chercheur de l'équipe « Automatique & Systèmes » pour la qualité de la relation humaine que nous avons tissée mutuellement au fil des ans.

Je remercie enfin chaleureusement Olivier, Mounir, Jean-François, Ali, Khaoula et Marcelin ainsi que tous les étudiants que j'ai encadrés et qui ont contribué aux travaux présentés dans ce mémoire.

Table des matières

Introduction générale.....	6
1 Résumé de carrière.....	8
1.1 Curriculum Vitae.....	8
1.2 Déroulement de carrière	8
1.3 Résumé des activités d'enseignement.....	9
1.3.1 Enseignement en 1 ^{ère} année du cycle ingénieur	9
1.3.2 Enseignement en 2 ^{ème} année du cycle ingénieur	10
1.3.3 Enseignement en 3 ^{ème} année du cycle ingénieur	11
1.4 Résumé des activités de recherche	12
1.4.1 Travaux de thèse.....	12
1.4.2 Travaux de recherche au sein de l'IRSEEM	13
1.4.3 Co-encadrement de thèses soutenues.....	14
1.4.4 Co-encadrement de thèses en cours	15
1.4.5 Co-encadrement de formations post-doctorales	16
1.4.6 Encadrement de stages de Master Recherche 2.....	17
1.4.7 Projets de recherche.....	18
1.4.8 Production scientifique	21
1.4.9 Activités annexes liées à la recherche.....	22
2 Travaux de recherche	27
2.1 Contribution à la modélisation des moteurs Diesel.....	27
2.1.1 Elaboration et validation d'un modèle à valeurs instantanées.....	28
2.1.2 Etude et validation de modèles pour la synthèse de contrôleurs	34
2.1.3 Amélioration du modèle de Jankovic	41
2.2 Contribution à la commande avancée des moteurs Diesel	46
2.2.1 Rappel sur la notion de degré relatif	46
2.2.2 Synthèse de contrôleurs par passivation et platitude.....	48
2.2.3 Synthèse de contrôleurs par bouclage dynamique et platitude.....	55
2.2.4 Synthèse de contrôleurs à partir de la GPC à base d'état.....	60
2.2.5 Synthèse de contrôleurs à partir de la NCGPC	70
2.2.6 Synthèse d'un contrôleur à base de logique floue.....	78
3 Activités de transfert vers l'industrie	94

3.1	<i>Contrat sur la validation de données</i>	94
3.2	<i>Contrat sur la détection de défauts</i>	95
3.3	<i>Contrat sur l'analyse de la stabilité</i>	96
4	Références	99
4.1	<i>Références personnelles</i>	99
4.1.1	<i>Revue internationale</i>	99
4.1.2	<i>Communications invitées dans des conférences internationales</i>	99
4.1.3	<i>Communications dans des conférences internationales IFAC</i>	100
4.1.4	<i>Communications dans des conférences internationales IEEE</i>	100
4.1.5	<i>Conférences internationales avec actes</i>	101
4.1.6	<i>Conférences nationales avec actes</i>	102
4.1.7	<i>Ouvrages collectifs de recherche</i>	102
4.1.8	<i>Rapports de fin de contrats industriels</i>	103
4.1.9	<i>Rapports de Master Recherche</i>	103
4.2	<i>Références bibliographiques</i>	104
5	Conclusion et perspectives	107
	Annexe : Nomenclature	114

Introduction générale

Dans ce Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, je présente les différentes activités que j'ai effectuées dans le domaine de l'Automatique depuis huit ans en tant qu'enseignant chercheur à l'ESIGELEC. Pour ce faire, j'ai organisé ce mémoire en quatre parties comme suit :

La première partie résume brièvement mon parcours professionnel ainsi que mes différentes activités d'enseignement et de recherche : elle décrit de manière synthétique le contenu et les objectifs pédagogiques de chacun des modules d'enseignement dans lesquels je suis intervenu (ou continue d'intervenir) à l'ESIGELEC. Les différentes activités que j'exerce au sein de l'équipe « Automatique & Systèmes » de l'IRSEEM sont ensuite passées en revue afin de situer globalement ma contribution en tant que chercheur permanent de cette équipe.

La seconde partie décrit dans le détail les travaux que je mène en modélisation et commande avancée du moteur Diesel. Ces travaux ont pour objectif de faire suivre des trajectoires de référence à certaines variables d'état de ce système malgré l'existence de couplages physiques et d'une dynamique de zéros instable. Dans un premier temps, j'expose ma contribution dans l'étude et la validation expérimentale de modèles de moteur Diesel pour la synthèse de contrôleurs avancés. Dans un second temps, j'expose ma contribution dans l'élaboration de contrôleurs multi-variables destinés aux systèmes à non-minimum de phase ainsi que l'application de ces contrôleurs à la commande du système d'air du moteur Diesel.

La troisième partie est consacrée à la présentation synthétique de mes activités de transfert vers le milieu industriel. Ne sont rapportées ici que celles réalisées sous la forme de contrats de R&D pour Snecma Moteurs et PSA Peugeot Citroën.

La quatrième partie de ce mémoire donne la liste exhaustive de mes publications. Elle précise également les références bibliographiques citées dans ce mémoire.

Ce mémoire se termine par une conclusion sur mes travaux et une présentation de mes perspectives à venir en matière de recherche et d'enseignement.

Première partie :
Résumé de carrière

1 Résumé de carrière

1.1 Curriculum Vitae

Nom : LANGLOIS
Prénom : Nicolas
Langues parlées : Français, Anglais.
Fonctions actuelles : Enseignant chercheur en Automatique (61^{ème} section)
Adresse professionnelle : ESIGELEC / IRSEEM
Technopôle du Madrillet,
Avenue Galilée
76801 Saint Etienne du Rouvray
Tél. : +33 2 32 91 58 64
Fax. : +33 2 32 91 58 59
E-Mail : nicolas.langlois@esigelec.fr

1.2 Déroulement de carrière

1997-2000 Travaux de thèse portant sur la commande neuronale d'un système sensorimoteur sous la direction du Professeur Pierre MICHÉ du LITIS (ex PSI) de l'Université & INSA de Rouen, en tant qu'allocataire de recherche.
1998-2000 Vacataire en TP de Physique à l'IUT de Rouen,
Tuteur en informatique à l'IUT de Rouen,
Animateur de TP d'électronique à l'Université de Rouen.
Depuis 2000 Enseignant-chercheur à l'ESIGELEC / IRSEEM.
Depuis 2004 Responsable du Laboratoire d'Automatique Industrielle, Département Génie Electrique et Systèmes Embarqués, ESIGELEC.

1.3 Participation à des réseaux nationaux

Depuis 2002 Membre du GT « Automatique et Automobile », GDR MACS / CNRS
Depuis 2004 Membre du GT « Commande Prédictive Non Linéaire », GDR MACS / CNRS
Depuis 2008 Membre du comité de pilotage du DAS Energie Environnement du pôle de compétitivité Mov'eo.

1.4 Résumé des activités d'enseignement

Les différents enseignements que j'ai ou continue d'effectuer au cours des trois années du cycle ingénieur de l'ESIGELEC relèvent de l'automatique et du traitement numérique du signal. Ils représentent chaque année un volume d'environ 200 heures de face-à-face devant les étudiants. Le programme et les objectifs des modules dans lesquels je suis intervenu depuis 2000 sont résumés dans cette rubrique. Les horaires indiqués en gras correspondent aux enseignements effectués au cours de l'année 2007-2008.

Je suis, par ailleurs, responsable des modules dont j'assure les cours magistraux. Pour un module donné, cette responsabilité implique notamment l'évolution du contenu du cours et la définition des sujets de travaux dirigés et de travaux pratiques.

1.4.1 Enseignement en 1^{ère} année du cycle ingénieur

Module « Systèmes asservis et régulation industrielle »

Enseignement effectué en filière classique :

- Cours (**14h**).
- Travaux pratiques (20h)

Enseignement effectué en filière apprentissage :

- Cours (**14h**).
- Travaux dirigés (10h)
- Travaux pratiques (20h)

Objectifs :

- Maîtriser les outils pour la représentation et l'analyse des systèmes linéaires continus invariants dans le temps,
- Maîtriser les principes et les techniques élémentaires de régulation industrielle,
- Savoir appliquer les outils de base de l'automatique à l'étude d'une boucle de régulation.

Programme :

- Introduction à l'automatique,
- Modélisation et représentation des systèmes linéaires,
- Systèmes élémentaires du 1^{er} et du 2nd ordre,
- Méthodes d'identification d'un procédé industriel,
- Régulation en boucle ouverte / boucle fermée,
- Performances des systèmes bouclés,
- Stabilité et précision des systèmes asservis,

- Actions correctives élémentaires P, I et D.

1.4.2 Enseignement en 2^{ème} année du cycle ingénieur

Module « Traitement numérique du signal »

Enseignement effectué en filière classique :

- Cours (14h),
- Travaux dirigés (6h).

Enseignement effectué en filière apprentissage :

- Cours (14h),
- Travaux dirigés (6h).

Objectifs :

- Acquérir les notions élémentaires en traitement numérique du signal,
- Comprendre et maîtriser l'utilisation de la transformée de Fourier rapide,
- Savoir synthétiser un filtre numérique à partir d'un cahier des charges.

Programme :

- La transformée de Fourier,
- L'échantillonnage des systèmes,
- La transformée de Fourier discrète,
- La transformée de Fourier rapide,
- Le filtrage numérique,
- Représentation et synthèse des filtres RIF,
- Représentation et synthèse des filtres RII.

Module « Automatique des systèmes continus »

Enseignement effectué en filière classique :

- Travaux dirigés (18h).

Objectifs :

- Maîtriser la synthèse et la mise en oeuvre des correcteurs analogiques de base,
- Savoir établir la représentation d'état d'un système multi-variable continu.

Programme :

- Les correcteurs à avance et retard de phase,
- Le correcteur PID,
- Représentation d'état des systèmes continus,
- Observabilité et commandabilité des systèmes continus,

- Commande par retour d'état.

Module « Automatique avancée »

Enseignement effectué en dominante Automatique & Robotique Industrielle (ARI) :

- Cours (16h),
- Travaux dirigés (6h),
- Travaux pratiques (18h).

Objectifs :

- Savoir établir la représentation d'état d'un système multi-variable discret,
- Comprendre le principe de la commande via l'observateur,
- Maîtriser la synthèse des correcteurs numériques polynomiaux.

Programme :

- Représentation d'état des systèmes discrets,
- Observabilité et commandabilité des systèmes discrets,
- Commande par retour d'état,
- Observateur de Luenberger,
- Méthode des pôles dominants,
- Régulateur RST.

1.4.3 Enseignement en 3^{ème} année du cycle ingénieur

Module « Commande par ordinateur »

Enseignement effectué en dominante Automatique & Robotique Industrielle (ARI) :

- Travaux pratiques (20h).

Objectifs :

- Savoir appliquer des stratégies de commande avancée à base de modèle,
- Acquérir une méthodologie d'analyse d'un procédé en vue de sa commande.

Programme :

- La commande adaptative,
- La commande prédictive par modèle interne,
- La commande des systèmes multivariables,
- La commande optimale des systèmes discrets.

Module « Identification et modélisation »

Enseignement effectué en dominante Automatique & Robotique Industrielle (ARI) :

- Travaux dirigés (**6h**),
- Travaux pratiques (**20h**).

Objectifs :

- Acquérir la démarche méthodologique, les techniques et outils nécessaires à l'analyse, la conception et la simulation de modèles dynamiques,
- Savoir appréhender l'étude et l'analyse d'un système par les techniques de modélisation et de simulation sur ordinateur.

Programme :

- Représentation paramétrique des systèmes (ARX, ARMAX, Box Jenkins, ...),
- Méthodes classiques d'identification,
- Méthode du modèle,
- Identification des modèles non linéaire par PNL.

1.5 Résumé des activités de recherche

Depuis 1997, mes activités de recherche ont été principalement effectuées sur les thèmes de la modélisation et la commande des systèmes complexes. Cela dit, les travaux que je mène au sein de l'équipe « Automatique & Système » se situent dans une thématique de recherche relativement différente de celle de mon doctorat.

1.5.1 Travaux de thèse

Ayant obtenu une allocation du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, j'ai effectué mes travaux de thèse de septembre 1997 à septembre 2000 au sein du laboratoire PSI de l'Université et INSA de Rouen sur le thème de la commande neuronale impulsionnelle.

J'ai soutenu ma thèse le 12 juillet 2001 à l'Université de Rouen devant le jury composé de :

- Bernard LAMALLE, Professeur à l'Université du Creusot
- Alain FAURE, Professeur à l'Université du Havre
- Roland DEDRIE, Professeur à l'ISMRA de Caen
- Abdelaziz BENSRAHAI, Professeur à l'Université de Rouen
- Houcine CHAFOUK, Enseignant-chercheur à ESIGELEC
- Pierre MICHÉ, Professeur à l'Université de Rouen

Mes travaux de thèse ont porté sur l'étude d'un modèle de neurone impulsionnel du type « integrate-and-fire » et son utilisation dans un contrôleur de type Perceptron multicouche. L'intérêt d'un tel modèle de neurone se situe dans sa capacité à traiter des impulsions (calibrées en temps et en amplitude) ayant à la fois une signification temporelle et une signification spatiale. Les spécificités originales de ce contrôleur neuronal étaient d'une part, une transmission de l'information entre neurones sous la forme d'impulsions asynchrones et d'autre part un apprentissage inspiré de la loi de HEBB : contrairement à l'approche classique, la règle d'apprentissage proposée (du type punition / récompense) visait à minimiser en permanence un critère original.

Ce contrôleur neuronal a été appliqué à la commande d'un système de vision inspiré du modèle humain. Suivant le principe du « tout au gagnant », deux motoneurones sur la couche de sortie du Perceptron permettaient d'orienter ce système de vision dans une direction angulaire donnée. La chaîne de retour était constituée d'un ensemble de capteurs assimilable à une rétine artificielle de part sa fonction (conversion d'un niveau de gris en trains d'impulsions) et la disposition (inspirée de la répartition des cellules de type cônes dans la rétine) de ses cellules photo-réceptrices.

Les résultats de simulation obtenus ont montré que le système sensorimoteur ainsi constitué était capable de s'orienter dans la direction du stimulus (fixe ou non) présente dans son champs de vision et ce, quel que soit sa taille et son intensité lumineuse.

1.5.2 Travaux de recherche au sein de l'IRSEEM

Depuis mon arrivée à l'ESIGELEC en 2000, je participe au développement et à la structuration des activités de recherche de l'équipe « Automatique & Systèmes », équipe placée sous la responsabilité de Houcine CHAFOUK. Ma contribution personnelle se situe à différents niveaux :

- Je mène des travaux sur la synthèse de contrôleurs destinés aux systèmes complexes à non minimum de phase dans le but d'optimiser la poursuite de trajectoires de référence en vue d'une application au moteur Diesel.
- Je participe à l'encadrement essentiellement de doctorants, de post-doctorants et de stagiaires en 2^{ème} année de Master Recherche.
- J'interviens enfin dans le montage et le suivi de projets de recherche, à la fois sur les aspects scientifiques et financiers.

Les travaux que je mène visent à élaborer des contrôleurs destinés aux systèmes ayant une dynamique de zéros instable en explorant principalement les pistes de la platitude et de la commande prédictive généralisée sous une forme linéaire (la GPC à base d'état) et plus récemment sous une forme non linéaire (la NCGPC). A terme, mon idée est d'introduire la notion de tolérance aux fautes dans ce dernier type de commande en l'associant étroitement à un module d'accommodation destiné à modifier les paramètres du contrôleur prédictif lorsqu'un dysfonctionnement du système à contrôler apparaît.

Jusqu'à présent, les retombées applicatives de ces travaux concernent essentiellement le moteur Diesel, système multi-variable complexe par excellence, caractérisé par de nombreuses non linéarités et des dynamiques multiples. Ce choix est justifié par l'évolution technologique de ce système et les perspectives applicatives qu'il offre : les moteurs Diesel (qui équipent maintenant environ 70% des véhicules neufs vendus en France) sont désormais tous commandés par des calculateurs électroniques embarqués via des actionneurs électromécaniques (injecteurs haute pression, turbocompresseur à géométrie variable, vanne de recirculation des gaz d'échappement, ...).

Renforcée par les progrès réalisés dans la miniaturisation des composants électroniques, cette évolution technologique a ouvert la voie à de nouvelles perspectives dans le domaine du contrôle moteur. Il est dorénavant possible d'intégrer dans les calculateurs embarqués des algorithmes de commande plus performants que les stratégies actuellement utilisées. Ces dernières, basées sur des régulateurs basiques de type PID complétés de cartographies, sont en effet de plus en plus mises en difficulté face aux exigences croissantes des normes antipollution européennes EURO. L'intérêt d'investiguer dans le domaine du contrôle moteur est donc double :

- du point de vue théorique, il met en évidence des problèmes de fond du ressort de l'automatique et qui donnent lieu à des thèses que je co-encadre au sein de l'équipe.
- du point de vue applicatif, les retombées potentielles de ces travaux sont à l'échelle du parc automobile mondial qui est responsable en grande partie de la dégradation de l'environnement (pollution de l'air dans les grandes agglomérations, pics de pollution de plus en plus fréquents, réchauffement climatique, ...).

1.5.3 Co-encadrement de thèses soutenues

Co-encadrement (20%) de la thèse d'Olivier GRONDIN

Titre : Modélisation d'un moteur Diesel pour la commande et le diagnostic

Directeur de thèse : Jean MAQUET (CORIA, INSA de Rouen)

Ecole doctorale : SPMII, Univ. Rouen

Financement : Allocation du MRT

Début / fin de thèse : Octobre 2001 / Décembre 2004

Publications : 1 article dans une revue internationale, 4 communications dans des conférences internationales et 1 communication dans une conférence nationale.

Jury de thèse : Houcine CHAFOUK (ESIGELEC), Thierry-Marie GUERRA (Univ. Valenciennes), Lino GUZZELLA (Institut Fédéral Suisse de Technologie de Zürich), Christophe LETELLIER (Univ. Rouen), Jean MAQUET (INSA Rouen), Pierre ROCHELLE (Univ. Nanterre, Paris X), Richard K. STOBART (Univ. Sussex à Brighton, UK) et Michel TRINITE (CORIA Rouen).

Co-encadrement (70%) de la thèse de Jean François ARNOLD

Titre : Proposition d'une stratégie de contrôle à base de logique floue pour la commande du circuit d'air d'un moteur Diesel

Directeur de thèse : Thierry PAQUET (LITIS, Université de Rouen)

Ecole doctorale : SPMII, Univ. Rouen

Partenaire industriel : Le Moteur Moderne

Financement : convention CIFRE / ANRT

Début / fin de thèse : Avril 2004 / Mars 2007

Publications : 2 articles dans des revues internationales, 8 communications dans des conférences internationales et 1 communication dans une conférence nationale.

Jury de thèse : Xavier MOREAU (Univ. Bordeaux 1), Mohammed EL HAJJAJI (Univ. Picardie Jules Verne), Nacer M'SIRDI (Univ. Marseille), Nicolas LANGLOIS (ESIGELEC), Houcine CHAFOUK (ESIGELEC), Thierry PAQUET (Univ. Rouen) et Gérard TREMOULIERE (Le Moteur Moderne).

1.5.4 Co-encadrement de thèses en cours

Co-encadrement (75%) de la thèse de Khaoula NAGOUDI-LAYERLE

Titre : Synthèse d'un contrôleur prédictif à base d'état pour la commande des systèmes instables à non minimum de phase

Directeur de thèse : Houcine CHAFOUK

Ecole doctorale : SPMII, Univ. Rouen

Financement : EGIDE

Début / fin de thèse : Novembre 2005 / Décembre 2008.

Publications : 1 article dans une revue internationale et 3 communications dans des conférences internationales.

Co-encadrement (75%) de la thèse de Marcelin DABO

Titre : Etude d'une loi de commande prédictive non linéaire à temps continu avec application au contrôle du moteur Diesel

Directeur de thèse : Houcine CHAFOUK

Ecole doctorale : SPMII, Univ. Rouen

Financement : EGIDE

Début / fin de thèse : Novembre 2006 / Décembre 2009.

Publications : 3 communications dans des conférences internationales.

Co-encadrement (75%) de la thèse d'Amine Ahmed BELAÏDI

Titre : Etude d'une stratégie tolérante aux fautes et aux variations paramétriques des systèmes complexes

Directeur de thèse : Houcine CHAFOUK

Ecole doctorale : SPMII, Univ. Rouen

Financement : Allocation de la Région Haute Normandie

Début / fin de thèse : Octobre 2007 / Fin 2010.

1.5.5 Co-encadrement de formations post-doctorales

Co-encadrement (75%) de la formation de Mounir AYADI

Titre : Etude d'une loi de commande prédictive basée sur la platitude

Responsable : Houcine CHAFOUK

Début / fin de la formation : Année universitaire 2003 / 2004

Projet : CANDICE

Publications : 1 article dans une revue internationale, 2 communications dans des conférences internationales et 2 communications dans des conférences nationales.

Co-encadrement (75%) de la formation d'Ali ACHIR

Titre : Elaboration de lois de commande avancée pour le contrôle des moteurs Diesel

Responsable : Houcine CHAFOUK

Début / fin de la formation : Année universitaire 2005 / 2006

Projet : CANDICE

Publications : 2 communications dans des conférences internationales.

1.5.6 Encadrement de stages de Master Recherche 2

Depuis 2003, j'encadre chaque année un étudiant en stage de MR 2. Afin d'assurer la cohérence des travaux que je supervise, les sujets que je propose relèvent généralement de pistes de recherche que j'envisage d'explorer par la suite à l'aide de doctorants.

Encadrement (100%) du stage de Fabien LECLERC

Titre : Etude de méthodes d'accommodation aux fautes

Année universitaire : 2003/2004

Master Recherche : ATS

Etablissement : SUPELEC

Encadrement (100%) du stage de Richard DUBOIS

Titre : Transmission et commande floue d'un modèle de moteur à allumage par compression

Année universitaire : 2004/2005

Master Recherche : IGIS

Etablissement : Univ. Rouen

Encadrement (100%) du stage de Didier RIEDINGER

Titre : Commande tolérante aux fautes avec application à un actionneur de moteur Diesel

Année universitaire : 2005/2006

Master Recherche : IGIS

Etablissement : Univ. Rouen

Encadrement (100%) du stage de Marc FAGNEN

Titre : Contribution à l'élaboration d'un observateur flou adaptatif

Année universitaire : 2006/2007

Master Recherche : IGIS

Etablissement : Univ. Rouen

Encadrement (100%) du stage de Jerry MAMBOUNDOU

Titre : Contribution à l'élaboration d'une stratégie de commande prédictive intégrant la notion de tolérance aux fautes

Année universitaire : 2007/2008

Master Recherche : IGIS

Etablissement : Univ. Rouen

1.5.7 Projets de recherche

Dès la création de l'équipe « Automatique & Systèmes » en 2000, j'ai participé activement au montage de différents projets de recherche en proposant des pistes de recherche visant à répondre à certaines problématiques du contrôle des moteurs Diesel. Au delà de l'aspect rédactionnel, mon implication s'est traduite concrètement par la définition des objectifs à atteindre, la proposition de pistes théoriques à explorer et la présentation de méthodologies de travail pour arriver à ces objectifs. J'ai également participé à l'estimation du coût financier de ces projets et des besoins humains. A ce titre, j'ai été amené à procéder à la sélection des candidats (niveaux doctorat et post-doctorat) qui postulaient aux annonces diffusées via l'ABG. La liste exhaustive des projets dans lesquels j'ai été impliqué est donnée ci-dessous :

Projet : Contrôle / commande des moteurs à combustion interne

Durée : 6 ans (2000-2006)

Partenaires : Université, INSA de Rouen & CORIA

Programme : CPER / CNRT « Combustion et moteurs »

Résumé du projet : Les différents travaux de recherche menés dans le cadre de ce projet s'inscrivent directement dans la problématique de l'optimisation des moteurs à combustion. Cette optimisation est d'autant plus nécessaire que les normes européennes sont de plus en plus exigeantes vis-à-vis des quantités de polluants émises par ces moteurs. Les différentes évolutions technologiques progressivement introduites pour la commande du moteur Diesel rendent ce système particulièrement attractif pour l'Automaticien : la généralisation des actionneurs électromécaniques associés à une unité de contrôle électronique a ouvert la voie de nouvelles perspectives d'application.

A ce titre, les premiers travaux réalisés ont porté sur la modélisation d'un moteur Diesel en collaboration avec nos partenaires universitaires (Thèse de O. GRONDIN). Une modélisation uniquement basée sur les équations de la Physique n'étant pas envisageable, une approche de

type boîte grise a été privilégiée. L'intérêt d'un tel modèle à valeur instantanée était double : il s'agissait d'une part de mieux connaître ce système particulièrement complexe et d'autre part de disposer d'un modèle suffisamment représentatif du moteur réel pour tester différentes stratégies de commande avancée.

La seconde phase de ce projet a porté sur l'élaboration de lois de commande multivariées destinées à être appliquées au contrôle moteur. Dans un premier temps, j'ai orienté ces travaux dans le domaine de la commande prédictive généralisée sur la base d'un modèle non linéaire d'ordre 3 issu de la littérature. Dans ce contexte, l'équipe a accueilli trois étudiants argentins de niveau Master Recherche (A. ANGEL en 2002, M. WEIMANN en 2003 et M. SILVA en 2004) de l'Université de TUCUMAN. L'étude de la forme linéaire de ce modèle a montré que le système considéré appartenait à la classe des systèmes instables à non minimum de phase. A ce titre, j'ai initié en 2005 les travaux de thèse de K. NAGOUDI-LAYERLE portant sur l'élaboration d'un contrôleur prédictif à base d'état pour la commande de tels systèmes. Au cours de la dernière année de ce projet, les spécificités du modèle considéré m'ont amené à initier la thèse de M. DABO portant sur l'étude d'une commande prédictive non linéaire à temps continu.

Projet : CANDICE (Control ANd Diagnosis for Internal Combustion Engines)

Durée : 3 ans (2003-2006)

Partenaires : CORIA et Université du Sussex à Brighton

Programme : INTERREG IIIa, mesure 5 (Recherche)

Résumé du projet : Au cours de ce projet, l'IRSEEM, le CORIA et l'Université du Sussex se sont associés pour travailler sur une problématique commune. L'objectif de ces travaux était d'optimiser, via une stratégie de commande avancée, le fonctionnement du moteur Diesel du partenaire britannique. Plus précisément, dans la perspective des futures normes antipollution européennes, il s'agissait d'assurer dans un premier temps une meilleure régulation de la pression des gaz dans le collecteur d'échappement puis dans un second temps de réguler le taux d'EGR et le rapport air / carburant. La méthodologie choisie par les trois partenaires a été logiquement décomposée en 2 phases :

Phase I : Développement d'un modèle représentatif du moteur Caterpillar.

Cette première phase s'est appuyée sur le modèle générique de moteur Diesel développé conjointement par l'IRSEEM et le CORIA. Au cours d'un protocole expérimental, les paramètres de ce modèle ont été calés sur les paramètres du moteur considéré.

Phase II : Elaboration des lois de commande et implantation sur simulateur.

Au cours de ce projet, différentes stratégies de commande ont été testées sur le modèle non linéaire du moteur Diesel. Le régulateur RST et la commande par bouclage dynamique ont notamment été associés à la propriété de platitude.

En considérant comme actionneurs la vanne de recirculation des gaz d'échappement et le turbocompresseur à géométrie variable, ces lois de commande ont été appliquées à un modèle non linéaire d'ordre 7 du moteur Diesel validé expérimentalement. Les algorithmes respectifs de ces lois de commande ont été développés et implémentés dans un simulateur électronique pour être testés en temps réel. Les résultats obtenus avec M. AYADI et A. ACHIR ont été comparés à ceux obtenus à l'aide d'approches plus classiques. Les stratégies basées sur la platitude permettent de diminuer significativement l'erreur de poursuite lors d'un changement de points de fonctionnement.

Projet : Implémentation de lois de commande sur banc moteur instrumenté

Durée : 1 an (2005/2006)

Partenaires : Université du Sussex à Brighton

Programme : Projet d'Action Intégrée (PAI) ALLIANCE

Résumé du projet : Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet correspondent à ceux du projet CANDICE, le PAI étant un programme d'aide à la mobilité des chercheurs.

Projet : PACTE (Prototyping of Advanced Control Techniques for Engines)

Durée : 1 an (2007-2008)

Partenaires : Université du Sussex à Brighton

Programme : INTERREG IIIa

Résumé du projet : Au cours de ce projet, l'Université du Sussex et l'IRSEEM ont continué à valider expérimentalement leurs modèles non linéaires d'ordre 7 et d'ordre 3 et à appliquer sur ces modèles des stratégies de contrôle moteur avancées dans la perspective de réguler le rapport air / carburant ainsi que le taux de gaz d'échappement recyclés en régime transitoire. Le contrôle du rapport air / carburant en régime transitoire et plus exactement du rapport oxygène / carburant est considéré comme un défi majeur face aux exigences des normes EURO 4/5 et des normes fédérales américaines Tier 2 en matière d'émission de NO_x et de particules. Un élément-clé pour optimiser en phase transitoire ce rapport vis-à-vis d'une consigne donnée passe par la capacité à fournir rapidement au cylindre la quantité d'air désirée. Le contrôle du système EGR doit être suffisamment précis pour ne pas trop priver le cylindre en oxygène (entraînant ainsi une augmentation de la quantité de particules produites).

Deux méthodes de synthèse de contrôleurs prédictifs ont été appliquées : d'une part une méthode basée sur la commande prédictive à base d'état pour systèmes MIMO non linéaires à non minimum de phase et d'autre part une commande prédictive généralisée non linéaire à temps continu. Les résultats obtenus ont montré qu'il était possible d'agir sur les actionneurs du système d'air pour faire suivre aux variables d'état considérées (pression dans le collecteur d'admission, pression dans le collecteur d'échappement et puissance du compresseur) et donc au taux d'EGR et au rapport air / carburant des trajectoires définies à l'avance en fonction de la vitesse de rotation du moteur et de la quantité de carburant injectée (traduisant la volonté du conducteur).

1.5.8 Production scientifique

Depuis 2001, les résultats des travaux que j'ai menés ont fait l'objet de plusieurs publications diffusées au sein de la communauté scientifiques. La liste exhaustive de mes références est donnée dans la 4^{ème} partie de ce mémoire. Le bilan global de ma production est le suivant :

- 8 articles dans des revues internationales : International Journal of Modelling, Identification and Control (IJMIC), International Journal on STA (IJSTA), European Journal on Operational Research (EJOR), Transactions on Systems, Signals and Devices (TSSD), Journal of Aerospace Engineering (JAE), Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication (JACIC) , International Journal of AMSE (IJAMSE).
- 2 communications invitées dans des conférences internationales avec actes : CIFA'06 et CSC'07.
- 3 communications dans des conférences internationales IFAC : CTS'03, INCOM'06 et WC'08.
- 6 communications dans des conférences internationales IEEE : ISIE'04, ICIT'04, SSD'05, CCA'06, ACC'07 et MED'08.
- 13 communications dans des conférences internationales avec actes : CSS'01, MS'02, MCMS'03, MS'05, IMECE'05, E-COSM'06, ICES'06, AVCS'07, ECC'07, STA'07, SIA'08, CIFA'08 (x2) et UKACC'08 (x2).
- 2 communications dans des conférences nationales : AAAF'03 et SIA'04.
- 1 chapitre d'ouvrage collectif édité par Lavoisier.
- 4 rapports de fin de contrats industriels : PSA Peugeot-Citroën (x2) et Snecma Moteurs (x2).

1.5.9 Activités annexes liées à la recherche

Dans le cadre du développement du Technopôle du Madrillet, L'ESIGELEC a officiellement créé, en janvier 2001, un Institut de Recherche en Systèmes Electroniques Embarqués (IRSEEM) afin de structurer ses activités de R&D. Je contribue au rayonnement scientifique de l'équipe « Automatique & Systèmes » et par conséquent de l'IRSEEM en m'impliquant activement dans différentes activités liées à la Recherche. Ces activités sont principalement :

Contribution à l'émergence d'une jeune équipe de recherche

Depuis huit ans maintenant, j'interviens directement dans :

- Le montage de projets de recherche à caractère régional, national et international,
- La rédaction des rapports sur les travaux effectués dans le cadre de ces projets,
- La définition et rédaction de sujets de thèse, de formations post-doctorales et de stage de Master Recherche,
- La diffusion de ces sujets au sein du GDR MACS et auprès de l'ABG,
- La sélection de candidats sur la base des dossiers reçus et d'entretiens oraux en face-à-face,
- L'encadrement de travaux de recherche en étroite collaboration avec les mondes universitaire et industriel,
- La rédaction et correction d'articles scientifiques en vue d'une soumission à des revues et des conférences de renommée internationale,
- La présentation de travaux de notre équipe auprès des industriels des filières de l'Automobile et de l'Aérospatiale,
- La réalisation de contrats de R&D visant à appliquer la théorie de l'automatique,
- Le transfert de méthodologie de travail vers le monde industriel sous la forme de contrats et de formations continues.

Participation au groupe de recherche MACS du CNRS

Je participe régulièrement aux séminaires des groupes de travail qui traitent des problématiques en liaison directe avec mes activités de recherche. Ces séminaires me permettent de retrouver les chercheurs travaillant sur des thématiques communes et de discuter de l'état d'avancement de nos recherches respectives. Les deux groupes de travail auxquels j'assiste sont le GT Automatique & Automobiles (AA) et le GT Commande Prédictive Non Linéaire (CPNL). Je participe régulièrement (2001, 2005 et 2007) aux

Journées Automatique Automobile (JAA) de Bordeaux organisées par les Professeurs A. OUSTALOUP et X. MOREAU dans le cadre du GT AA.

J'incite également les doctorants que je co-encadre à participer à ces deux GT et à y effectuer des présentations : par quatre fois, les travaux de recherche que j'ai co-encadrés y ont été exposés :

- M. AYADI, JAA du GT AA en novembre 2003 à Bordeaux,
- J-F. ARNOLD, réunion du GT AA en avril 2006 à Valenciennes.
- K. NAGOUDI, réunion du GT CNPL en janvier 2008 à Paris,
- M. DABO, réunion du GT CNPL en juin 2008 à Paris.

Rapporteur d'articles scientifiques

J'ai effectué la relecture d'articles soumis aux conférences internationales listées ci-dessous :

- IEEE ISIE, Ajaccio, France, 2004
- AMSE MS'05, Rouen, France, 2005
- IEEE ISIE, Montreal, Canada, 2006
- IEEE IECON, Taipei, Taiwan, 2007
- IEEE ISIE, Vigo, Espagne, 2007
- CSC Marrakech, Maroc, 2007
- C2I, Nancy, France, 2007
- LSMS, Shanghai, Chine, 2007
- STA, Sousse, Tunisie, 2007
- IEEE INDIN08, Daejeon, Corée, 2008
- IFAC 17th World Congress, Seoul, 2008
- IJPPE, Guilin, Chine, 2008
- IEEE CDC, Cancun, Mexique, 2008
- IEEE IECON, Orlando, USA, 2008

Je suis également rapporteur occasionnel d'articles soumis aux revues Elsevier EJOR et Information Sciences.

Organisation de conférences internationales

En tant que Secrétaire Général, j'ai co-organisé avec H. CHAFOUK la conférence MS'05 (Modelling and Simulation) qui a eu lieu du 6 au 8 juillet 2005 dans les locaux de

l'ESIGELEC. Réalisé dans le cadre des conférences annuelles de l'AMSE (Association for Modelling and Simulation in Enterprises), cet évènement scientifique a permis à une centaine de chercheurs issus de treize nationalités différentes de discuter de leurs travaux dans le domaine de la modélisation et de la simulation des systèmes.

Sur la base des papiers acceptés, les différentes sessions de cette conférence ont notamment porté sur :

- les systèmes de commande et de diagnostic,
- la surveillance des systèmes industriels,
- l'électronique de puissance,
- les outils de modélisation et de simulation,
- le traitement du signal et de l'image,
- la compatibilité électromagnétique,
- la gestion de l'énergie,

Plus récemment, le Professeur Menrui FEI de l'Université de Shanghai, Président de la conférence LSMS'07 (Life System Modelling and Simulation), m'a sollicité pour être le représentant local en France de son comité d'organisation. A ce titre, j'ai eu à promouvoir cette conférence auprès de chercheurs français, à proposer des rapporteurs au comité scientifique et à établir une liste d'articles acceptés en m'appuyant sur l'avis des rapporteurs. Organisée en partenariat avec la Queen's University de Belfast, la conférence LSMS'07 s'est déroulée à Shanghai du 14 au 17 septembre 2007. Cette conférence à laquelle j'ai assisté, a permis de réunir plus de trois cents chercheurs travaillant dans le domaine de l'automatique et ses applications aux Sciences du Vivant. Les différentes sessions de cette conférence ont notamment porté sur :

- traitement du signal biomédical,
- théorie, algorithmes et application des réseaux de neurones,
- théorie et applications de la logique floue,
- modélisation, surveillance et commande des systèmes complexes non linéaires,

Participations diverses

Au-delà de mon implication dans des évènements concernant principalement la communauté des chercheurs scientifiques, je participe souvent à des manifestations à caractère plus industriel ou de sensibilisation du grand public. La volonté de proposer aux industriels des

solutions innovantes dans le domaine du contrôle moteur me conduit régulièrement à animer des ateliers durant lesquels j'expose les travaux de recherche de l'équipe « Automatique & Systèmes ». Ces manifestations sont les suivantes :

- Séminaire Euroforum, « Les défis de la motorisation Automobile », Paris, 7 & 8 Novembre 2001.
- Séminaire Euroforum, « Les innovations électroniques pour optimiser le couple motorisation transmission », Paris, 20 & 21 Mars 2002.
- Convention d'affaires européenne MOTEURS, « Apport de l'électronique embarquée dans le diagnostic et le contrôle moteur », Rouen, 1 & 2 octobre 2002.
- Conférence IEE E4A, « Control systems », Crawley, UK, 7 octobre 2003.
- Conférence SIA, l'apport de l'automatique avancée au contrôle des moteurs automobiles, Rouen, 18 février 2004.
- Convention d'affaires européenne MOTEURS, « Contrôle avancé des moteurs à combustion interne », Rouen 13 & 14 Octobre 2004.
- Normandy Motor Meeting, « Perspectives en commande et diagnostic embarqué liées à l'environnement électronique du moteur », Rouen, 4 & 5 Octobre 2006.
- Salon Engine Expo, en partenariat avec le CERTAM, le CEVAA, Seine Maritime Expansion et l'Association du Technopôle du Madrillet, Stuttgart, du 7 au 11 Mai 2007.

Dans le souci de promouvoir l'automatique et plus généralement la recherche, je participe également à la manifestation annuelle « Fête de la Science » destinée au grand public. En 2001, 2002, 2003 et 2004, cette participation s'est traduite concrètement par la tenue d'un stand présentant les diverses évolutions scientifiques et technologiques liées au contrôle moteurs. En 2007, j'ai accueilli des collégiens au sein du Laboratoire d'Automatique Industrielle de l'ESIGELEC.

Seconde partie :
Travaux de recherche

Depuis 2000, les travaux de recherche que je mène s'inscrivent dans un même et unique contexte : le durcissement progressif des normes antipollution européennes imposées aux automobiles équipées de moteur Diesel. Ces normes fixent des seuils maximum d'émission de certains gaz polluants obligeant les industriels de la filière automobile à améliorer sans cesse les moteurs Diesel qu'ils produisent.

La recherche d'une optimisation sous toutes ses formes (amélioration de la combustion, choix des matériaux, ...) a obligé l'industrie automobile à s'intéresser à des stratégies de contrôle moteur et à les implémenter dans des calculateurs électroniques embarqués. Ces stratégies ont été très souvent développées à partir de contrôleurs basiques (de type PI) réglés empiriquement sur banc d'essais. Une telle approche a favorisé essentiellement l'émergence d'un nombre considérable de cartographies sans toutefois assurer des performances optimales du moteur en tout point de fonctionnement.

Face à ce constat, Houcine CHAFOUK et moi-même avons œuvré à différents niveaux pour le démarrage de travaux de recherche dans le domaine de l'automatique dans la perspective d'une application au contrôle des moteurs Diesel.

En tant que chercheur permanent de l'équipe « Automatique et Systèmes », je me suis intéressé à la modélisation du moteur Diesel du point de vue de l'automaticien ainsi qu'au problème du suivi de trajectoires de références pour la régulation de certaines de grandeurs physiques du système d'air. Mes contributions dans cette thématique sont maintenant détaillées.

2.1 Contribution à la modélisation des moteurs Diesel

Pour qui souhaite élaborer puis tester des stratégies de contrôle / commande d'un système donné, disposer d'un modèle suffisamment représentatif de ce système est devenu indispensable. L'intérêt du modèle n'est plus à démontrer tant son utilisation s'est généralisée. Notre équipe ne possédant pas de banc d'essais, disposer d'un ou de plusieurs modèles de moteurs Diesel validés expérimentalement nous était indispensable. Dans ce contexte, les travaux que j'ai menés ont partiellement porté sur la modélisation du moteur Diesel équipé des actionneurs électromécaniques devenus indispensables aujourd'hui pour respecter les

normes antipollution. Ces actionneurs sont principalement le turbocompresseur à géométrie variable (VGT) et la vanne de recirculation des gaz d'échappement (EGR) :

- Le VGT est constitué d'un compresseur entraîné par une turbine à géométrie variable. Le compresseur permet d'augmenter la pression de suralimentation à toutes les vitesses du VGT. Il assure une bonne réponse à bas régime tout en évitant une survitesse de la turbine à hauts régimes.
- La vanne EGR est actuellement le moyen le plus efficace pour réduire les émissions d'oxydes d'azote (NO_x). L'ouverture de cette vanne située entre les collecteurs d'échappement et d'admission permet de réintroduire une fraction adéquate du carburant brûlé. Cette fraction remplace une partie de l'oxygène admis dans les cylindres, réduisant ainsi le profile de température de la combustion et par conséquent les émissions de NO_x .

Ayant le souci de mieux comprendre le fonctionnement d'un tel système se situant à l'intersection de plusieurs disciplines scientifiques, nous avons pris le parti d'explorer la voie des modèles dits « de connaissance » avec les avantages et les inconvénients que cela représente.

2.1.1 Elaboration et validation d'un modèle à valeurs instantanées

Dans le cadre du CNRT « Combustion et moteurs », nous avons collaboré avec le CORIA pour établir un modèle de moteur Diesel multicylindre équipé d'un turbocompresseur et d'une vanne EGR. L'objectif de nos travaux était d'établir un modèle de moteur cylindre à cylindre de type « boîte grise » capable de reproduire l'évolution des principales variables de ce système en s'appuyant sur :

- les lois de la Physique pour les cylindres, les collecteurs, le turbocompresseur et le vilebrequin,
- des lois empiriques pour la modélisation de la combustion et des transferts thermiques.

La recherche d'un compromis satisfaisant entre précision des résultats et temps de simulation, nous a orientés vers une modélisation 0D à valeur instantanée. Face à la complexité du moteur, nous avons dû poser quelques hypothèses et procéder à certaines simplifications qui continuent à faire débat au sein de la communauté des physiciens motoristes. Les cylindres, les collecteurs d'admission et d'échappement ont été assimilés à des systèmes séparés contenant des gaz à l'équilibre thermodynamique. En considérant la technique du remplissage-vidange, la masse, la température et la pression des gaz sont calculées en utilisant la loi des

gaz parfaits et la loi de conservation des masses. Les principales simplifications pour ce modèle sont :

- les gaz parfaits sont supposés ayant des chaleurs spécifiques constantes,
- les transferts de chaleurs dans les collecteurs d'admission et d'échappement sont supposés négligeables,
- la température des parois des cylindres T_{wall} est supposée constante et homogène,
- les pressions et températures en amont du compresseur et en aval de la turbine sont supposées égales respectivement à la pression atmosphérique p_a et la température atmosphérique T_a .

La vitesse de rotation du turbocompresseur ω_{tc} est déduite de la loi de Newton :

$$\frac{d\omega_{tc}}{dt} = \frac{P_t - P_c}{J_{tc}\omega_{tc}} \quad (1.1)$$

où J_{tc} est le moment d'inertie du turbocompresseur, P_t et P_c sont les puissances de la turbine et du compresseur. La puissance du compresseur est fonction du débit massique \dot{m}_c au travers du compresseur, de l'efficacité isentropique η_c , des pressions et températures de l'admission et de l'échappement. L'efficacité et le débit massique sont généralement cartographiés en fonction du rapport de pression π_c et de la vitesse du turbocompresseur ω_{tc} .

La température de l'air en sortie du compresseur est donnée par :

$$T_c = T_a \left[1 + \frac{1}{\eta_c} \left(\pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \right] \quad (1.2)$$

Les températures en sortie de l'échangeur thermique et de l'échangeur EGR ont été approchées suivant les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} T_{cc} &= (1 - \epsilon_c) T_c + \epsilon_c T_{cool} \\ T_{egr} &= (1 - \epsilon_{egr}) T_2 + \epsilon_{egr} T_{cool} \end{aligned} \quad (1.3)$$

où T_{cool} est la température du liquide de refroidissement, T_2 la température du collecteur d'échappement. ϵ_c et ϵ_{egr} sont les efficacités respectives de ces deux échangeurs. Les débits massiques \dot{m}_c and \dot{m}_{egr} sont supposés ne pas être modifiés par ces échangeurs. Le débit massique au travers la vanne EGR est déterminé à partir de la relation :

$$\dot{m}_{egr} = A_{egr}(u_{egr}) C_{egr} \varphi(p_2, p_1, T_2, T_1) \quad (1.4)$$

où A_{egr} est la surface effective commandable de la vanne EGR, T_1 la température du collecteur d'admission et u_{egr} est le signal de commande. p_1 et p_2 sont respectivement les pressions des collecteurs d'admission et d'échappement.

Etant donné les hypothèses faites sur les transferts de chaleur, le système d'équations donnant la masse et la pression dans le collecteur d'admission est :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dm_1}{dt} = \dot{m}_c + \dot{m}_{egr} + \sum_{j=1}^{n_{cyl}} \dot{m}_{cyl_j/1} - \sum_{j=1}^{n_{cyl}} \dot{m}_{1/cyl_j} \\ \frac{dp_1}{dt} = \frac{\gamma R}{V_1} \left[T_c \dot{m}_c + T_{egr} \dot{m}_{egr} + \sum_{j=1}^{n_{cyl}} T_{cyl_j} \dot{m}_{cyl_j/1} \right. \\ \left. - T_1 \sum_{j=1}^{n_{cyl}} \dot{m}_{1/cyl_j} \right] \end{array} \right. \quad (1.5)$$

Les équations donnant la masse et la pression dans le collecteur d'échappement sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dm_2}{dt} = \sum_{j=1}^{n_{cyl}} \dot{m}_{cyl_j/2} - \sum_{j=1}^{n_{cyl}} \dot{m}_{2/cyl_j} - \dot{m}_t - \dot{m}_{egr} \\ \frac{dp_2}{dt} = \frac{\gamma R}{V_2} \left[\sum_{j=1}^{n_{cyl}} T_{cyl_j} \dot{m}_{cyl_j/2} - T_2 \sum_{j=1}^{n_{cyl}} \dot{m}_{2/cyl_j} \right. \\ \left. - T_t \dot{m}_t - T_{egr} \dot{m}_{egr} \right] \end{array} \right. \quad (1.6)$$

où T_1 et T_2 sont calculées à partir de la loi des gaz parfaits. Les flux au travers des soupapes d'admissions et d'échappement sont modélisés comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{m}_{iv_j} = A_{iv} [l_{iv}(\theta_j)] \varphi(p_{cyl_j}, p_1, T_{cyl_j}, T_1) \\ \dot{m}_{ev_j} = A_{ev} [l_{ev}(\theta_j)] \varphi(p_2, p_{cyl_j}, T_2, T_{cyl_j}) \end{array} \right. \quad (1.7)$$

Le cylindre est l'élément fondamental du système. Suivant l'approche basique de modélisation, la variation d'énergie de calculer les variations de la température \dot{T}_{cyl} des gaz dans le cylindre. Cette approche conduit à une équation différentielle ordinaire incluant quelques termes de dérivés partielles. Afin de simplifier l'expression mathématique du modèle et de réduire les temps de calculs, le nombre de dérivations a été limité. Ainsi, la pression p_{cyl_j} à l'intérieur du $j^{\text{ème}}$ cylindre est obtenue par différentiation de la première loi de thermodynamique pour un gaz parfait ayant une chaleur spécifique constante et la masse m_{cyl_j} dérive de l'équation :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dm_{cyl_j}}{dt} = \dot{m}_f + \dot{m}_{1/cyl_j} + \dot{m}_{2/cyl_j} - \dot{m}_{cyl_j/1} - \dot{m}_{cyl_j/2} \\ \frac{dp_{cyl_j}}{dt} = \frac{\gamma}{V_{cyl_j}} \left[RT_1 \dot{m}_{1/cyl_j} - RT_{cyl_j} (\dot{m}_{cyl_j/1} + \dot{m}_{cyl_j/2}) \right. \\ \left. + RT_2 \dot{m}_{2/cyl_j} - p_{cyl_j} \dot{V}_{cyl_j} \right] + \frac{\gamma - 1}{V_{cyl_j}} \left[\dot{m}_{bf_j} Q_{LHV} - \dot{Q}_{ht_j} \right] \end{array} \right. \quad (1.8)$$

Le processus de combustion dans les moteurs à injection directe implique deux phases. La première phase est un processus de combustion rapide appelé pré-mélange ayant lieu en quelques degrés vilebrequin. La seconde phase appelée diffusion conclue la combustion. La combustion dans les moteurs Diesel est modélisée par trois fonctions de Wiebe. Deux d'entre elles modélisent le pré-mélange et la période de diffusion, la troisième assurant l'adéquation avec la chaleur dégagée calculée à partir de la pression cylindre. La fraction massique de carburant brûlé selon la masse injectée par cycle est donnée par :

$$\frac{dm_{fb}^*}{d\theta} = \sum_{i=1}^3 F_i \frac{dx_i}{d\theta} \quad (1.9)$$

où F_i est la fraction relative de la $i^{\text{ème}}$ fonction x_i de Wiebe's. Puisque m_f représente la masse injectée par cycle et ω_e le régime moteur, la fraction de gaz brûlé est donnée par :

$$\frac{dm_{fb}}{dt} = \frac{dm_{fb}^*}{d\theta} m_f \omega_e \quad (1.10)$$

Le modèle de transfert de chaleur prend en compte uniquement les transferts de convection forcée entre les gaz dans le cylindre et les parois de ce cylindre. Ceux-ci sont exprimés sous la forme classique :

$$\frac{dQ_{ht}}{dt} = A_{cyl_j} C_{ht} (T_{cyl_j} - T_{wall}) \quad (1.11)$$

où A_{cyl} est la surface effective de transfert et C_{ht} est le coefficient de transfert de chaleur. Le volume instantané du cylindre est une fonction déterministe de l'angle vilebrequin et des paramètres géométriques de l'ensemble :

$$V_{cyl_j} = V_{cl} - \frac{r_c V_d}{2} \left(\beta + 1 - \cos \theta_j - \sqrt{\beta^2 - \sin^2 \theta_j} \right) \quad (1.12)$$

L'objectif étant d'établir un modèle de la dynamique sous-jacente à l'évolution de la pression cylindre et ce, en fonction des valeurs prises par certains paramètres influents, nous avons

représenté la dynamique de la pression cylindre par un modèle NARMAX prenant le régime moteur instantané comme entrée.

Les entrées du modèle dynamique sont les couples instantanés indiqués Γ_i calculés à partir de la pression cylindre et du couple de charge appliqué au vilebrequin Γ_l . En supposant un vilebrequin rigide, le principe de Newton a été appliqué au système moteur/charge :

$$\dot{\omega}_e = (J_e + J_l)^{-1} \left[\sum_{j=1}^{n_{cyl}} (\Gamma_{i_j} - \Gamma_{fr_j} - \Gamma_{r_j}) - \Gamma_l \right] \quad (1.13)$$

où J_e et J_l sont les moments d'inertie du moteur et de la charge, Γ_i le couple indiqué, Γ_{fr} le couple de friction, Γ_r le couple des masses alternatives et Γ_l le couple de charge.

La validation expérimentale de ce modèle a été effectuée dans le cadre du projet CANDICE. Nous avons considéré le moteur instrumenté de l'Université du Sussex à Brighton (UK) comme système réel. Ce moteur (représenté figure 1) est un Caterpillar 6 cylindres 3126B d'une cylindrée de 7.2l.

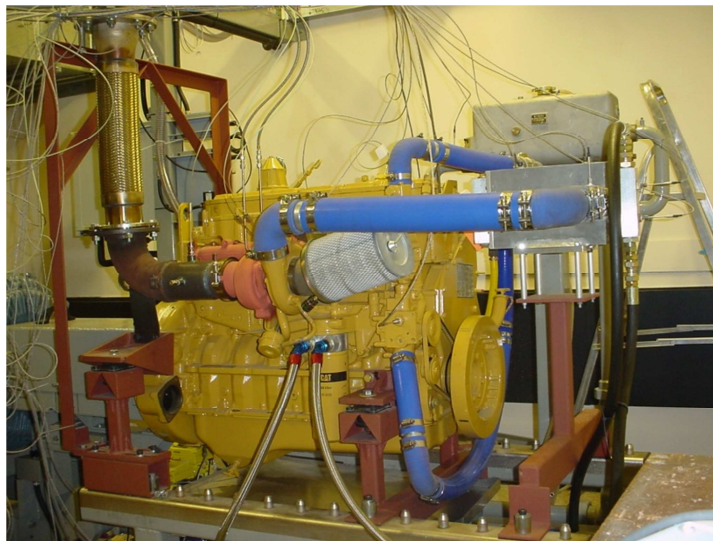
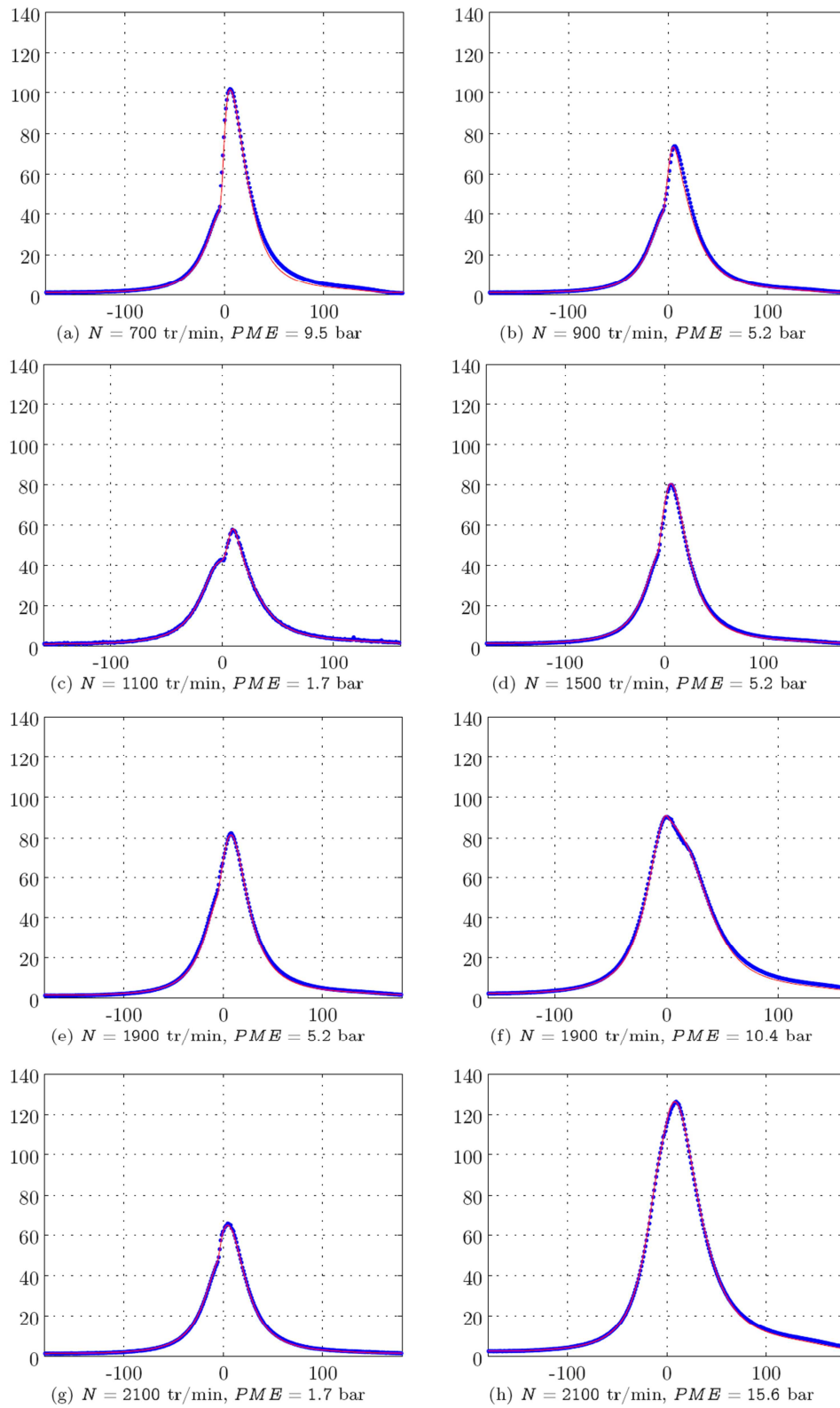


Figure 1 : Moteur Caterpillar 3126B (Université du Sussex à Brighton)

La validation de notre modèle a été effectuée à partir d'une comparaison avec des mesures expérimentales et des résultats de simulation du logiciel GT-Power sur la base :

- Des paramètres du moteur,
- Des cartographies des soupapes d'admission et d'échappement
- De la cartographie de la vanne EGR,
- Des cartographies d'efficacité et de débit massique de la turbine et du compresseur.



*Fig. 2 : Evolution de la pression cylindre pour différents régimes moteur
 Bleu : mesures expérimentales
 Rouge : modèle d'ordre plein*

La pression cylindre a été échantillonnée à chaque degré vilebrequin et enregistrée à l'aide d'un système d'analyse de combustion. La valeur de l'angle vilebrequin est déterminée à l'aide d'un encodeur sur l'arbre moteur. Les figures 1.2a à 1.2h représente l'évolution des pressions cylindre obtenues expérimentalement et par simulation du modèle en fonction de l'angle vilebrequin.

Ces travaux nous ont permis d'élaborer un modèle physique à valeur instantanée basé sur le principe de remplissage-vidange. Validé expérimentalement, ce modèle présente l'avantage d'être particulièrement représentatif du fonctionnement d'un moteur Diesel donné tout en nécessitant un nombre minimum de paramètres empiriques pour être transposable à d'autres moteurs. Si il est clair que ce modèle nous a permis de mieux comprendre le fonctionnement du moteur Diesel, sa complexité est telle que nous avons vite écarté la possibilité de l'utiliser en tant que modèle interne pour le calcul des signaux de commande. Sur la base de ce constat, nous nous sommes intéressés aux modèles physiques à valeur moyenne certes moins représentatifs des phénomènes réels mais plus « exploitables » du point de vue de l'Automaticien.

2.1.2 Etude et validation de modèles pour la synthèse de contrôleurs

Dans la littérature, plusieurs modèles à valeurs moyennes de moteur Diesel ont été proposés pour la synthèse de lois de commande. Dans le cas de nos travaux, notre intérêt s'est porté plus particulièrement sur le modèle de connaissance proposé par [Jankovic 00]. Les équations relatives à ce modèle non linéaire d'ordre 7 sont :

$$\begin{cases} \dot{m}_1 = W_c + W_{egr} - W_e \\ \dot{m}_2 = W_e - W_{egr} - W_t + W_f \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{F}_1 = \frac{1}{m_1} [W_{egr}(F_2 - F_1) - W_c F_1] \\ \dot{F}_2 = \frac{1}{m_2} (W_e [15.6(1 - F_1)/(AFR + 1) + F_1] - W_e F_2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{p}_1 = \frac{\gamma R}{V_1} (W_c T_c + W_{egr} T_{egr} - W_e T_1) \\ \dot{p}_2 = \frac{\gamma R}{V_2} [(W_e + W_c) T_e + W_{egr} T_2 - W_e T_1] \end{cases}$$

$$\dot{\omega}_{tc} = \frac{1}{J_{tc}\omega_{tc}}(\eta_m P_t - P_c) \quad (2.1)$$

Dans ce système d'équations, ω_{tc} est la vitesse de rotation du turbo-compresseur. T_1 et T_2 désignent respectivement les températures des collecteurs d'admission et d'échappement. Ces paramètres sont supposés constants dans cette étude. w_f désigne le débit massique du carburant, w_{egr} le débit des gaz au travers la vanne EGR. w_c et w_t sont respectivement les débits du compresseur et de la turbine. η_m est le rendement mécanique du turbo-compresseur. P_c et P_t sont respectivement les puissances du compresseur et de la turbine (figure 3).

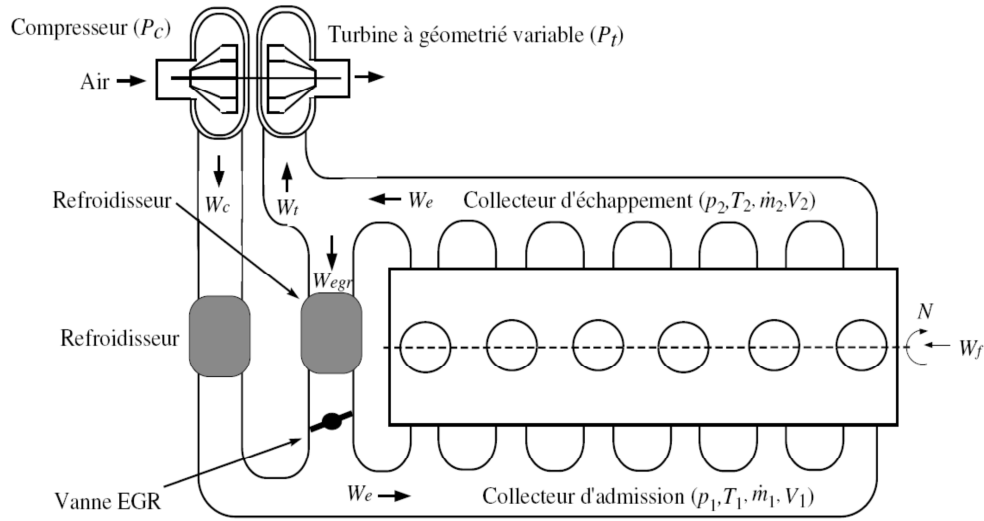


Fig. 3 : Schéma du moteur Diesel muni d'une vanne EGR et d'un VGT

Le débit d'air au niveau du compresseur est relié à la puissance par :

$$W_c = k_c \frac{P_c}{p_1^\mu - 1} \quad (2.2)$$

où k_c et μ sont des paramètres considérés constants.

Les entrées de ce modèle sont les signaux $u_1 = w_{egr}$ et $u_2 = w_t$. Dans la réalité, les entrées du moteur sont l'ouverture normalisée de la vanne EGR, $k_{egr} \in [0,1]$ et l'inclinaison des ailettes du turbo-compresseur, $k_{vgt} \in [0,1]$. Ces deux entrées sont déduites à partir des signaux u_1 et u_2 en utilisant des cartes spécifiques au moteur selon les équations suivantes :

$$u_1 = \begin{cases} C_{egr}(u_{egr}) \frac{p_2}{\sqrt{RT_2}} \Psi_1\left(\frac{p_1}{p_2}\right) & \text{if } p_1 < p_2 \\ 0 & \text{if } p_1 = p_2 \\ C_{egr}(u_{egr}) \frac{p_1}{\sqrt{RT_1}} \Psi_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right) & \text{if } p_1 > p_2 \end{cases} \quad (2.3)$$

et

$$u_2 = C_{vgt}(u_{vgt}) \frac{p_2}{\sqrt{RT_2}} \Psi_2(p_2, u_{vgt}) \quad (2.4)$$

Pour simplifier le développement des calculs, nous avons considérés les débits W_{egr} et W_t comme étant les signaux d'entrée. Afin d'introduire ces signaux de commande dans le modèle (1.14), la puissance de la turbine est remplacée par :

$$P_t = k_t(1 - p_2^{-\mu})u_2 \quad (2.5)$$

où k_t est un paramètre constant.

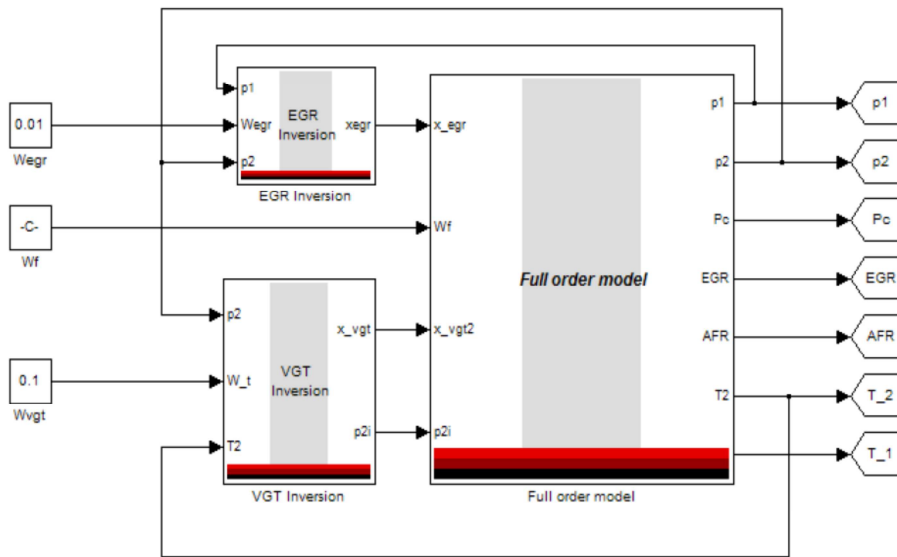
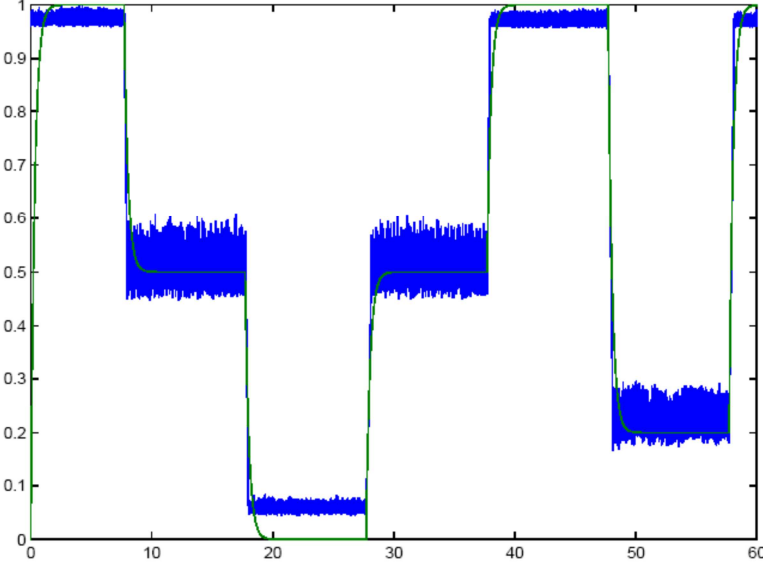


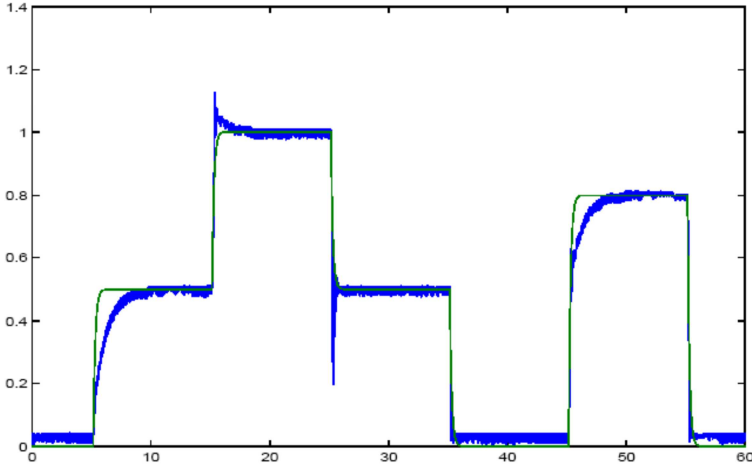
Fig. 4 : Modèle d'ordre plein sous Simulink

Dans le cadre du projet CANDICE, nous avons vérifié avec nos collègues de l'Université du Sussex à Brighton la validité de ce modèle que nous avons programmé sous Matlab / Simulink (figure 4) : nous avons effectué une campagne de tests en se fixant un régime moteur et un débit d'injection de carburant. Nous avons alors fait varier l'ouverture de la vanne EGR puis celle des ailettes de la turbine tout en maintenant la vanne EGR fermée. L'acquisition des données a été réalisée via une Autobox dSpace. Les résultats présentés ci-

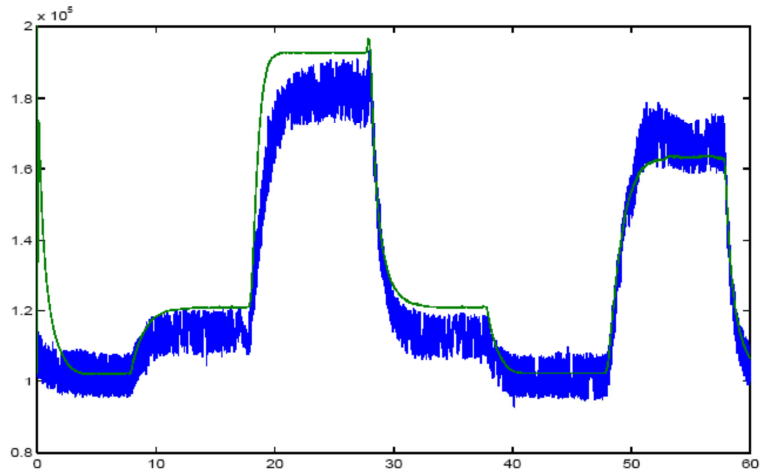
dessous ont été obtenus pour un régime moteur de 1600 tr/min et une alimentation en carburant de 1.8g/s par cycle



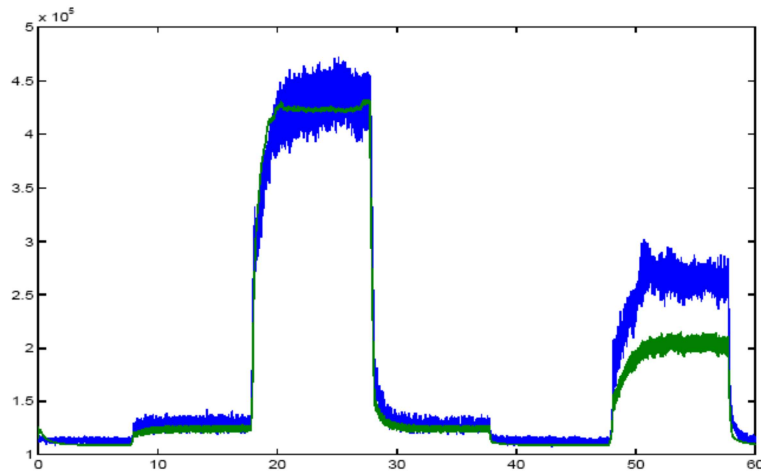
*Fig. 5 : Inclinaison normalisée des ailettes du VGT
Bleu : données expérimentales
Vert : modèle d'ordre plein*



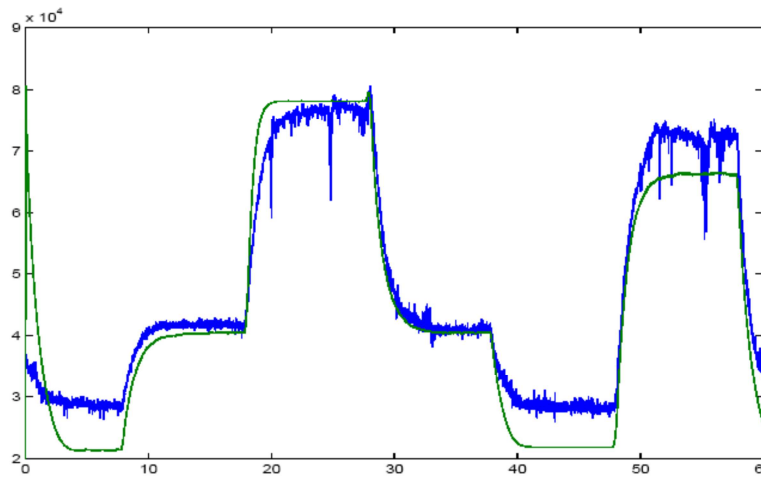
*Fig. 6 : Ouverture normalisée de la vanne EGR
Bleu : mesures expérimentales
Vert : modèle d'ordre plein*



*Fig. 7 : Pression dans le collecteur d'admission (Pa)
 Bleu : mesures expérimentales
 Vert : modèle d'ordre plein*



*Fig. 8 : Pression dans le collecteur d'échappement (Pa)
 Bleu : mesures expérimentales
 Vert : modèle d'ordre plein*



*Fig. 9 : Vitesse de rotation du turbocompresseur (tr/min)
 Bleu : mesures expérimentales
 Vert : modèle d'ordre plein*

Les différents résultats obtenus (figures 5 à 9) montrent que le modèle reproduit assez fidèlement les dynamiques du système réel autour du point de fonctionnement considéré.

Dans le but de réduire l'ordre du modèle et par conséquent la complexité du calcul des lois de commande que nous élaborons, nous avons pris en compte les hypothèses simplificatrices proposées par [Jankovic 2000]. En négligeant les variations de températures au cours du cycle moteur et en approchant le terme $\frac{\dot{\omega}_c}{\omega_c}$ par $\frac{1}{\tau}$ tel que τ soit la constante de temps du turbo-compresseur, nous avons obtenu le modèle non linéaire d'ordre 3 réduit suivant :

$$\begin{aligned}\dot{p}_1 &= k_1 (W_c + u_1 - k_e p_1) \\ \dot{p}_2 &= k_2 (k_e p_1 + W_f - u_1 - u_2) \\ \dot{P}_c &= \frac{1}{\tau} (-P_c + \eta_m k_t (1 - p_2^{-\mu}) u_2)\end{aligned}\quad (2.6)$$

où le débit du carburant W_f peut être considéré comme une perturbation externe. En définissant le nouvel espace d'état décrit par les coordonnées rapportées au point d'équilibre (p_{1e}, p_{2e}, P_{ce})

$$\begin{aligned}p_{1e} &= \frac{W_{ce} + W_f}{k_e}, \\ p_{2e} &= \left(1 - \frac{W_{ce}}{W_{ce} + W_f} \frac{1}{k_t k_c \eta_m} (p_{1e}^\mu - 1) \right)^{-\frac{1}{\mu}}, \\ P_{ce} &= \frac{W_{ce}}{k_c} (p_{1e}^\mu - 1).\end{aligned}\quad (2.7)$$

Le modèle non linéaire d'ordre réduit est alors :

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -k_1 k_e x_1 - \varphi_1(x_1) + \psi_1(x_1) x_3 + k_1 \tilde{u}_1 \\ \dot{x}_2 &= k_2 k_e x_1 - k_2 \tilde{u}_1 - k_2 \tilde{u}_2 \\ \dot{x}_3 &= -\frac{1}{\tau} x_3 + \varphi_2(x_2) + \psi_2(x_2) \tilde{u}_2\end{aligned}\quad (2.8)$$

avec

$$x_1 = p_1 - p_{1e}, \quad x_2 = p_2 - p_{2e}, \quad x_3 = P_c - P_{ce}. \quad (2.9)$$

Les nouvelles commandes sont alors :

$$\tilde{u}_1 = u_1 - u_{1e}, \quad \tilde{u}_2 = u_2 - u_{2e}. \quad (2.10)$$

avec les expressions non linéaires suivantes :

$$\begin{aligned}
\varphi_1(x_1) &= \frac{k_1 k_c P_{ce}}{1 - p_{1e}^\mu} \left[\frac{p_{1e}^\mu - (x_1 + p_{1e})^\mu}{(x_1 + p_{1e})^\mu - 1} \right] \\
\psi_1(x_1) &= \frac{k_1 k_c}{(x_1 + p_{1e})^\mu - 1} \\
\varphi_2(x_2) &= \frac{P_{ce}}{\tau} \left[\frac{p_{2e}^{-\mu} - (x_2 + p_{2e})^{-\mu}}{1 - p_{2e}^{-\mu}} \right] \\
\psi_2(x_2) &= \frac{\eta_m k_t}{\tau} \left(1 - (x_2 + p_{2e})^{-\mu} \right)
\end{aligned}
\tag{2.11}$$

Afin de valider le modèle réduit résultant, nous avons simulé simultanément (figures 10 & 11) le modèle réduit et le modèle d'ordre plein avec les mêmes signaux de consigne considérés précédemment. Les différents paramètres k_1 , k_2 , k_c , k_t , k_e , τ du modèle réduit ont été identifiés à partir du modèle d'ordre plein autour d'un régime moteur de 1600 tr/min et d'une commande en carburant de 1.8 g/s par cycle en exploitant le régime permanent du moteur ainsi que les caractéristiques du turbocompresseur.

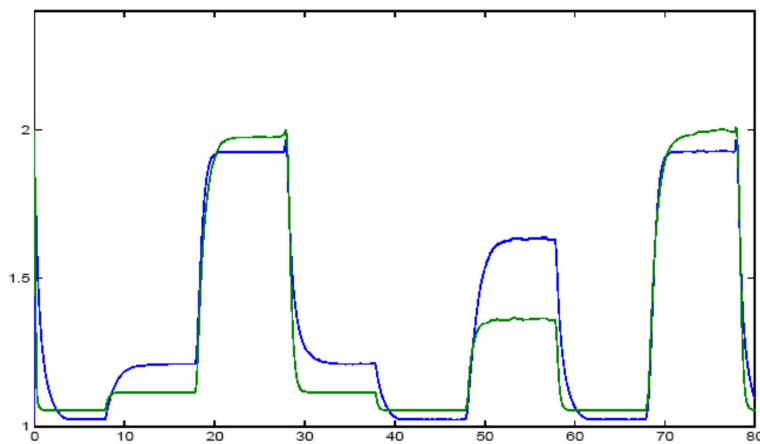
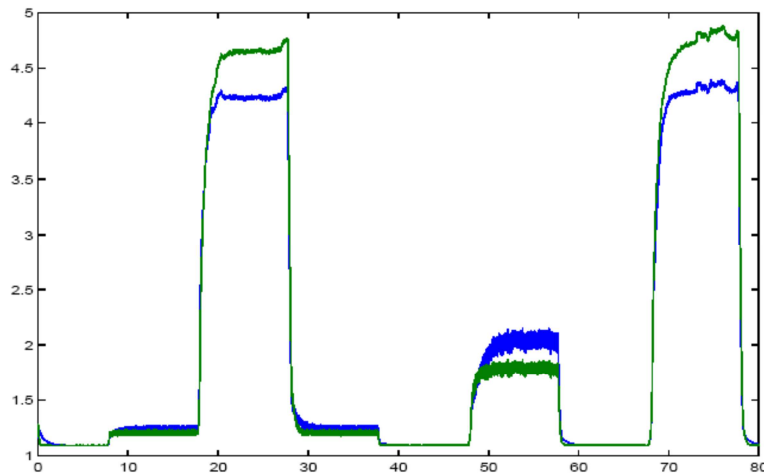


Fig. 10 : Pression dans le collecteur d'admission (Pa)
Bleu : modèle d'ordre plein
Vert : modèle d'ordre réduit

Le modèle réduit avec comme entrées les débits EGR (W_{egr}) et VGT (W_{vgt}) est instable. Pour effectuer la simulation, nous avons augmenté le modèle réduit des caractéristiques statiques du VGT et de la vanne EGR afin de le rendre stable. Par ailleurs, les températures T_1 et T_2 non accessibles dans le modèle réduit ont été fixées à 319.8 K et 573.4 K respectivement. Ces valeurs correspondent à celles relevées par les capteurs de température.

Afin d'obtenir des paramètres k_1 , k_2 , k_c , k_t , k_e , τ assez représentatifs, il a été nécessaire d'effectuer plusieurs campagnes de tests sur plusieurs points de fonctionnement et de sélectionner judicieusement ces derniers en utilisant des techniques d'optimisation.



*Fig. 11 : Pression dans le collecteur d'échappement (Pa)
 Bleu : modèle d'ordre plein
 Vert : modèle d'ordre réduit*

2.1.3 Amélioration du modèle de Jankovic

Le modèle à valeurs instantanées que nous avons élaboré dans le cadre du CNRT « Combustion & Moteurs » et le modèle à valeurs moyennes que nous avons testé et validé dans le cadre du projet CANDICE intègrent uniquement le VGT et la vanne EGR comme actionneurs du système d'air.

Durant la thèse de Jean-François ARNOLD, nous avons intégré dans le modèle non linéaire (2.1) la chaîne de transmission (du bloc moteur aux roues) ainsi un actionneur supplémentaire : il s'agit du papillon motorisé (voir figure 12). A l'origine, ce papillon (ou TVA pour Throttle Valve Actuator) était actionné pour arrêter le moteur Diesel par étouffement. A l'heure actuelle, l'utilisation qui en est faite est différente suivant le constructeur automobile. Le papillon est placé en amont du collecteur d'admission pour moduler d'une part le débit d'air frais entrant dans le collecteur et d'autre part pour créer une chute de pression. Cette dernière permet de diminuer la pression en amont du collecteur d'admission et ainsi d'augmenter le débit d'air à travers la vanne EGR. Il présente donc un intérêt certain pour qui cherche à optimiser le fonctionnement des moteurs Diesel.

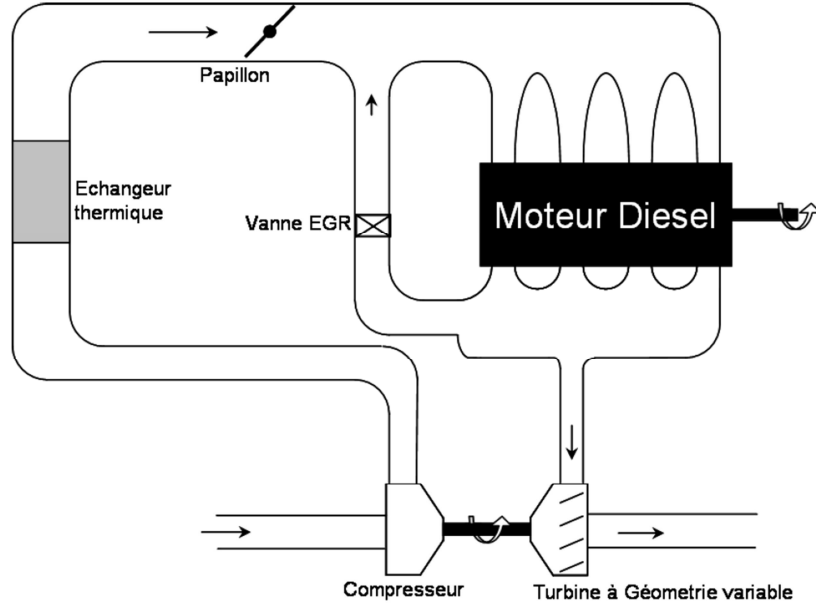


Fig. 12 : Actionneurs du système d'air d'un moteur Diesel

Du point de vue de la mécanique des fluides, le papillon motorisé peut être modélisé à partir de l'équation traduisant l'écoulement d'un fluide au travers d'une contracture de section variable. Dans ce modèle, l'entrée est une surface de passage (exprimé en m^2) et la sortie un débit noté W :

$$W = \begin{cases} C(\chi) \frac{p_a}{\sqrt{RT_a}} \psi \left(\frac{p_b}{p_a} \right) & \text{si } p_b < p_a \\ 0 & \text{si } p_b = p_a \\ C(\chi) \frac{p_b}{\sqrt{RT_b}} \psi \left(\frac{p_a}{p_b} \right) & \text{si } p_b > p_a \end{cases} \quad (3.1)$$

avec

$$\psi(x) = \begin{cases} \gamma^{1/2} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} & \text{si } x \leq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} (x^{2/\gamma} - x^{(\gamma+1)/\gamma})} & \text{si } x > \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \quad (3.2)$$

où p_a et T_a représentent respectivement la pression et la température en amont de la contracture et p_b et T_b représentent respectivement la pression et la température en aval de la contracture.

Du point de vue électromécanique, le papillon motorisé constitue un système composé d'un moteur à courant continu piloté en tension, d'un ensemble d'engrenages, d'un ressort et d'une plaque métallique entrant en rotation autour d'un axe fixe. En première approximation, la

partie électrique peut être modélisée par une inductance L , une résistance R et une force électromotrice $k\omega$ induite par la rotation de l'arbre (voir figure 13).

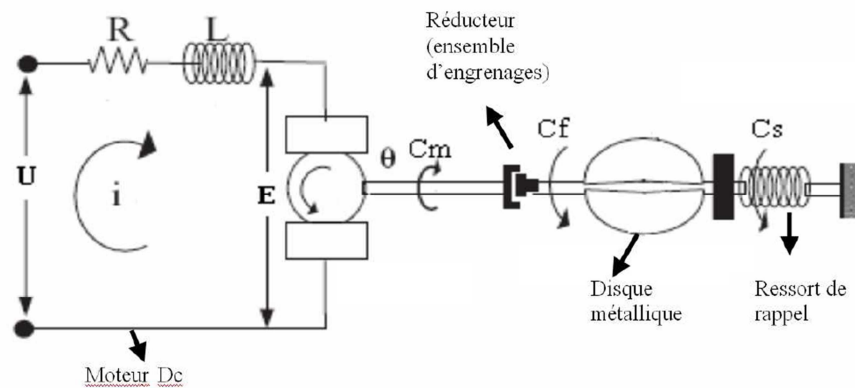


Fig. 13 : Représentation schématique du papillon motorisé

Il convient également d'ajouter les équations traduisant le signal de commande (une tension d'alimentation modulée en largeur d'impulsion ou PWM) en une surface de passage. Ce dernier point est particulièrement délicat à traiter en raison du nombre important de non-linéarités introduites :

- hystérésis du champ magnétique,
- jeu des réducteurs,
- retard de propagation.

En les prenant en compte, les équations s'écrivent :

$$u = L \frac{di}{dt} + Ri + k\omega \quad (3.3)$$

où L est l'inductance d'induit, R la résistance d'induit, k la constante de FEM et ω la vitesse angulaire de l'induit. L'angle de la plaque est supposé directement proportionnel à l'angle imposé par le moteur, ainsi :

$$\Theta = K_g \cdot \omega \quad (3.4)$$

où K_g est le rapport de réduction de l'engrenage et Θ la position angulaire de la plaque. Le modèle pourrait être amélioré en tenant compte notamment des hystérésis induites par le jeu des engrenages. Pour simplifier les équations, il est supposé que le jeu des engrenages est inclus dans l'hystérésis du champ magnétique. La partie mécanique est modélisée en appliquant le principe fondamental de la dynamique sur l'arbre du moteur :

$$J \frac{d\Theta}{dt} = C_e - C_f c_r \quad (3.5)$$

où C_e , C_f et C_r sont respectivement le couple électrique, le couple des pertes causées par les frottements et le couple résistant du ressort.

Les non-linéarités du papillon sont caractérisées par deux phénomènes (voir figure 14). Tout d'abord, une zone morte où la plaque reste immobile alors qu'il y a une variation de la tension de commande. Le second phénomène est l'hystérésis qui provoque des zones de saturation.

Ces non-linéarités sont causées par le ressort de rappel et par la somme de l'ensemble des frottements présents (ici regroupés sous un couple résistant de frottement).

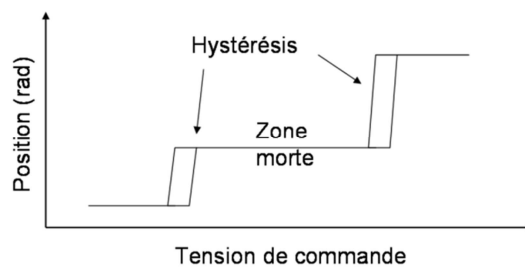


Fig. 14 : Caractéristique non linéaire du papillon motorisé

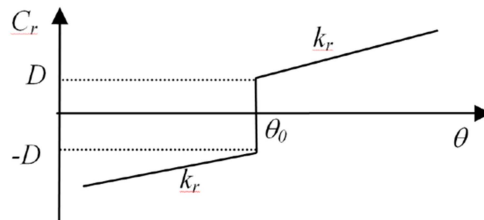


Fig. 15 : Couple résistant du ressort

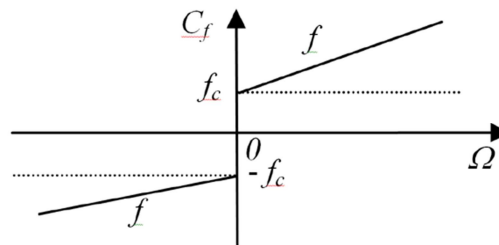


Fig. 16 : Couple résistant de frottement

La courbe du couple résistant du ressort (représentée figure 15) n'est pas centrée sur 0 car le papillon est par défaut légèrement ouvert. Ainsi, en cas de défaillance du moteur à courant continu, un faible débit d'air frais est maintenu. La courbe du couple résistant de frottement est représentée figure 16.

Une dernière force a été ajoutée : la force aérodynamique de l'air sur la plaque métallique agissant sur un couple résistant. Cette force est obtenue en utilisant une cartographie en fonction du débit d'air et de l'angle d'ouverture du papillon, le gaz frais entrant dans le moteur étant considéré toujours à la même température et avec la même composition chimique.

L'ensemble des équations (3.1) à (3.5) permet de décrire l'angle d'ouverture du papillon en fonction de la tension de commande. Pour obtenir la surface de passage W , une cartographie fournie par le constructeur du papillon est nécessaire.

Le modèle que nous avons établi dans le cadre de la thèse de Jean-François ARNOLD est au final un modèle combinant équations différentielles, équations analytiques et cartographies et constitué les volumes capacitifs suivants :

- l'échangeur thermique : il s'agit du volume commençant en aval du compresseur et se terminant en amont du papillon
- le collecteur d'admission
- le collecteur d'échappement
- le tuyau d'échappement

Ces différents volumes sont connectés entre eux à l'aide des actionneurs suivants :

- le compresseur
- le papillon
- le bloc moteur
- la vanne EGR
- la turbine à géométrie variable

Les différents sous-systèmes du modèle final sont représentés dans la figure 17.

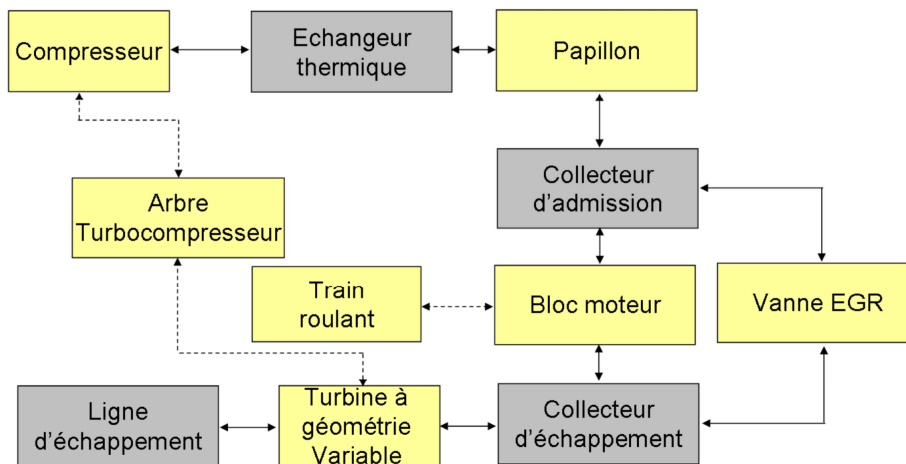


Fig. 17 : Synoptique du modèle proposé

Le modèle complet a été entièrement programmé sous Matlab / Simulink. En raison de la confidentialité des données issues des mesures et des cartographies utilisées, aucune comparaison entre les mesures issues du banc et les résultats du modèle ne peut être présentée.

2.2 Contribution à la commande avancée des moteurs Diesel

Je présente maintenant les travaux que j'ai menés dans le domaine de la commande des systèmes à non minimum de phase en vue d'une application au contrôle du système d'air des moteurs Diesel. Pour arriver au final à réguler certaines grandeurs physiques de ce système, j'ai commencé à explorer les deux approches classiques du point de vue de l'automaticien, à savoir :

- la commande à base de modèle du procédé à contrôler : je me suis penché initialement sur la platitude puis sur la GPC (sous une forme linéaire puis non linéaire) dans le cadre de projets financés essentiellement par le CPER état-région (CNRT « Combustion et moteurs ») et le FEDER.
- la commande sans modèle : je me suis penché sur la commande à base de logique floue dans le cadre d'une convention CIFRE avec un partenaire industriel.

2.2.1 Rappel sur la notion de degré relatif

S'intéresser au problème de dynamique des systèmes complexes et plus précisément au phénomène de non minimum de phase m'oblige à rappeler brièvement ici la notion de vecteur

degré relatif. Soit un système MIMO carré non linéaire de dimension $(m \times m)$ écrit sous la forme générale :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + \sum_{j=1}^m g_j(x)u_j \\ y &= (h_1(x), \dots, h_m(x))^t, \end{aligned} \quad (4.1)$$

où $x \in \mathfrak{R}^n$, $u \in \mathfrak{R}^m$ et $y \in \mathfrak{R}^m$ sont respectivement les vecteurs d'état, de contrôle et de sortie.

Ce système possède un vecteur degré relatif (ρ_1, \dots, ρ_m) si :

i) pour tout $x \in \mathfrak{R}^n$:

$$L_{g_j} L_f^k h_i(x) = 0, \quad (4.2)$$

Pour chaque $1 \leq i \leq m$, chaque $1 \leq j \leq m$ et chaque $0 \leq k \leq \rho_i - 1$;

ii) la matrice de découplage de dimension $(m \times m)$

$$A(x) = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^{\rho_1-1} h_1(x) & \dots & L_{g_m} L_f^{\rho_1-1} h_1(x) \\ \vdots & & \vdots \\ L_{g_1} L_f^{\rho_m-1} h_m(x) & \dots & L_{g_m} L_f^{\rho_m-1} h_m(x) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

est régulière pour tout $x \in \mathfrak{R}^n$.

Les équations (4.2) et (4.3) font appel à la dérivée de Lie de $h(x)$ le long de f au point $x \in \mathfrak{R}^n$ qui est définie comme suit :

$$L_f h(x) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial h}{\partial x_i}(x) f_i(x) \quad (4.4)$$

qui conduit aux relations

$$L_f^k h(x) = L_f L_f^{k-1} h(x) = \frac{\partial L_f^{k-1} h}{\partial x}(x) f(x) \quad (4.5)$$

avec

$$L_f^0 h(x) = h(x) \quad (4.6)$$

Finalemment il vient :

$$L_g L_f^k h(x) = [L_{g_1} L_f^k h(x) \dots L_{g_m} L_f^k h(x)] \quad (4.7)$$

où les g_i sont les champs de vecteurs liés au vecteur de commande $u = (u_1, \dots, u_m)^t$. Précisons, pour conclure, que dans le cas des modèles linéaires SISO, le degré relatif représente la différence entre l'ordre du dénominateur et l'ordre du numérateur.

2.2.2 Synthèse de contrôleurs par passivation et platitude

La platitude présentant un point de vue intéressant pour la planification et la poursuite de trajectoire [Fliess 95], je me suis intéressé avec Mounir AYADI à l'utilisation de cette propriété pour la synthèse d'un contrôleur polynomial adaptatif. Notre objectif était de réguler la pression dans le collecteur d'échappement p_2 en agissant sur la vanne ERG et le VGT. Dans le cadre du projet CANDICE, nous avons montré que le système non linéaire d'ordre réduit (2.6) n'était pas plat. Nous avons donc décidé d'appliquer la platitude dans le cas linéaire.

2.2.2.1 Méthode de synthèse proposée

Afin de stabiliser le système (2.6), nous avons effectué une passivation par retour d'état suivant l'approche maître/esclave [Seron 95] [Kokotovic 01]. Pour ce faire, nous avons dû vérifier que le modèle réduit non linéaire satisfaisait les conditions données par [Larsen 98] et [Larsen 2003] :

- un degré relatif égal à 1.
- une dynamique des zéros stable au sens de Lyapunov.

L'entrée \tilde{u}_1 représentant l'erreur entre le débit EGR u_1 et le signal de référence à l'équilibre u_{1e} , a été considérée comme l'entrée maître. L'entrée \tilde{u}_2 devient l'entrée esclave et est alors exprimée en fonction de l'état par :

$$\tilde{u}_2 = k_{21}x_1 + k_{22}x_2 + k_{23}x_3 \quad (5.1)$$

ce qui permet d'obtenir la fonction de transfert reliant \tilde{u}_1 à la sortie du modèle $y = -x_2$ [Larsen 98].

En remplaçant \tilde{u}_2 par son expression (5.1), le modèle non linéaire (2.6) s'écrit :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, x_2, x_3, \tilde{u}_1), \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2, x_3, \tilde{u}_1), \\ \dot{x}_3 &= f_3(x_1, x_2, x_3, \tilde{u}_1). \end{aligned} \quad (5.2)$$

Au point d'équilibre défini par

$$x_1 = 0, x_2 = 0, x_3 = 0, \tilde{u}_1 = 0. \quad (5.3)$$

la matrice jacobienne correspondante est

$$J_{a_{(x_1=0, x_2=0, x_3=0, \tilde{u}_1=0)}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1}{\partial \tilde{u}_1} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial \tilde{u}_1} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{\partial \tilde{u}_1} \end{pmatrix}. \quad (5.4)$$

La représentation d'état du modèle linéaire est alors

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B\tilde{u}_1, \\ y &= Cx, \end{aligned} \quad (5.5)$$

avec

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta x_1} & \frac{\delta f_1}{\delta x_2} & \frac{\delta f_1}{\delta x_3} \\ \frac{\delta f_2}{\delta x_1} & \frac{\delta f_2}{\delta x_2} & \frac{\delta f_2}{\delta x_3} \\ \frac{\delta f_3}{\delta x_1} & \frac{\delta f_3}{\delta x_2} & \frac{\delta f_3}{\delta x_3} \end{pmatrix}, \quad (5.6)$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta \tilde{u}_1} & \frac{\delta f_2}{\delta \tilde{u}_1} & \frac{\delta f_3}{\delta \tilde{u}_1} \end{pmatrix}^T \quad (5.7)$$

$$C = (0 \quad -1 \quad 0) \quad (5.8)$$

Dans la mesure où nous avons choisi $y = -x_2$, la fonction de transfert obtenue est :

$$y(t) = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \tilde{u}_1(t) \quad (5.9)$$

Les zéros de cette fonction sont stabilisés par le signal d'entrée esclave \tilde{u}_2 . Parmi les choix possibles, nous avons pris le signal $\tilde{u}_2 = k_{21}x_1$ avec $k_{21} > 0$. Le choix empirique de la valeur de k_{21} est essentiellement guidé par le souci d'obtenir une fonction de transfert (5.9) ayant une dynamique de zéros stable et un bon comportement du signal de commande.

Les contrôleurs étant destinés à être implémentés dans des calculateurs numériques, nous avons considéré la platitude dans le cas des systèmes discrets écrits sous la forme

$$x_{k+1} = \Phi(x_k, u_k) \quad (5.6)$$

et supposés plats. Dans (5.6), x_k et u_k désignent le vecteur d'état et le vecteur de commande à l'instant k respectivement. Sous cette hypothèse, il existe alors une sortie discrète plate z_k et deux entiers N et M tels que :

$$z_k = \mathbf{\Gamma}(x_k, u_k, u_{k+1}, \dots, u_{k+N}) \quad (5.7)$$

Pour effectuer la poursuite d'une trajectoire donnée de cette sortie plate :

$$\{z_k^d, k = 0, \dots, N\} \quad (5.8)$$

le signal de commande à appliquer est de la forme :

$$v_k = z_{k+M+1}^d + \sum_{i=0}^M k_i (z_{k+i}^d - z_{k+i}) \quad (5.9)$$

où les coefficients k_i font que le polynôme

$$K(q) = q^{M+1} + \sum_{i=0}^M k_i q^i \quad (5.10)$$

est de Schur. La loi de commande peut alors s'écrire sous la forme :

$$u_k = \mathbf{B}(z_k, \dots, z_{k+M}, z_{k+M+1}^d + \sum_{i=0}^M k_i (z_{k+i}^d - z_{k+i})) \quad (5.11)$$

ou encore

$$u_k = \Psi(z_k, \dots, z_{k+M}, K(q)z_k^d) \quad (5.12)$$

La méthode proposée dans [Rotella 2001] qui s'appuie sur un observateur de la sortie plate et de ses valeurs prédites permet d'élaborer un contrôleur polynomial dans le cas linéaire. En considérant le vecteur d'état Z_k

$$Z_k = (z_k \ z_{k+1} \ \dots \ z_{k+n-1})^T \quad (5.13)$$

du système commandable

$$\begin{aligned} u_k &= A(q)z_k \\ y_k &= B(q)z_k \end{aligned} \quad (5.14)$$

où $A(q)$ et $B(q)$ sont des polynômes, le système linéaire peut être alors décrit par la représentation d'état :

$$\begin{aligned} Z_{k+1} &= \mathcal{A}Z_k + \mathcal{B}u_k \\ y_k &= \mathcal{C}Z_k \end{aligned} \quad (5.15)$$

Suivant l'approche basée sur la platitude, la loi de commande u_k peut s'écrire alors

$$u_k = K(q)z_k^d + (a-l)Z_k \quad (5.16)$$

où

$$a = (a_0 \ a_1 \ \dots \ a_{n-1}) \quad (5.17)$$

et

$$l = (l_0 \ l_1 \ \dots \ l_{n-1}) \quad (5.18)$$

sont deux vecteurs constants et où le polynôme $K(q)$ est donné par :

$$K(q) = q^n + l_{n-1}q^{n-1} + \dots + l_0 \quad (5.19)$$

Nous avons écrit la loi de commande sous la forme RST réalisable suivante :

$$R(q^{-1})u_k = T(q)z_k^d - S(q^{-1})y_k \quad (5.20)$$

avec

$$\begin{aligned} S(q^{-1}) &= -(a - l)\mathcal{A}^{n-1}O^{-1}Q \\ R(q^{-1}) &= 1 + (a - l) \{ \mathcal{A}^{n-1}O^{-1}\mathcal{M} - (\mathcal{A}^{n-2}\mathcal{B} \dots \mathcal{B}) \} Q^* \end{aligned} \quad (5.21)$$

et

$$\begin{aligned} Q &= (q^{-(n-1)} \ q^{-(n-2)} \ \dots \ 1)^T \\ Q^* &= (q^{-(n-1)} \ q^{-(n-2)} \ \dots \ q^{-1})^T \end{aligned} \quad (5.22)$$

où les matrices M et O sont les matrices respectivement de commandabilité et d'observabilité.

En considérant un modèle ARMAX décrit par l'équation

$$y_{k+1} = -A^*(q^{-1})y_k + B^*(q^{-1})u_{k-d} + C(q^{-1})e_{k+1} \quad (5.23)$$

avec

$$\begin{aligned} B(q^{-1}) &= q^{-1}B^*(q^{-1}) \\ A(q^{-1}) &= 1 + q^{-1}A^*(q^{-1}) \end{aligned} \quad (5.24)$$

et $C(q^{-1})$ est le modèle de perturbation, le modèle ARMAX en boucle fermée est donné par

$$y_{k+1} = -A^*(q^{-1})y_k + B^*(q^{-1})q^{-d} \left(\frac{S(q^{-1})}{R(q^{-1})}y_k + \frac{K(q)}{R(q^{-1})}z_k^d \right) + C(q^{-1})e_{k+1} \quad (5.26)$$

L'algorithme d'identification en boucle fermée proposé par [Landau 98] et appliqué au modèle linéaire

$$\hat{u}_k = -\frac{\hat{S}(q^{-1})}{\hat{R}(q^{-1})}y_k + \frac{K(q)}{\hat{R}(q^{-1})}z_k^d \quad (5.27)$$

est basé sur l'utilisation de l'algorithme d'adaptation de paramètres :

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(k) &= \hat{\theta}(k-1) + \frac{1}{\lambda} \frac{P(k-2)\Phi(k-1) \left[y_k - \Phi^T(k-1)\hat{\theta}(k-1) \right]}{\lambda + \Phi^T(k-1)P(k-2)\Phi(k-1)} \\ P(k-1) &= \frac{1}{\lambda} \left[\frac{P(k-2)\Phi(k-1)\Phi^T(k-1)P(k-2)}{\lambda + \Phi^T(k-1)P(k-2)\Phi(k-1)} \right] \end{aligned} \quad (5.28)$$

où le vecteur de paramètres estimés est :

$$\hat{\theta}^T = \left(\hat{a}_0, \dots, \hat{a}_n, \hat{b}_0, \dots, \hat{b}_{n-1} \right) \quad (5.29)$$

et le vecteur de sortie et d'entrée est

$$\Phi^T(t) = (y_k, \dots, y_{k-n}, u_k, \dots, u_{k-n}) \quad (5.30)$$

Dans (5.28), λ et P sont respectivement le facteur d'oubli et la matrice de gain d'adaptation.

Les polynômes du contrôleur RST adaptatif sont alors donnés par :

$$\begin{aligned} \hat{S}(q^{-1}) &= (l - \hat{a}) \hat{A}^{n-1} \hat{O}_{(\hat{A}, \hat{C})}^{-1} Q \\ \hat{R}(q^{-1}) &= 1 + (\hat{a} - l) \left(\hat{A}^{n-1} \hat{O}_{(\hat{A}, \hat{C})}^{-1} \hat{M}_{(\hat{A}, \hat{B}, \hat{C})} - (\hat{A}^{n-2} \hat{B} \dots \hat{B}) \right) Q^* \end{aligned} \quad (5.31)$$

et la sortie plate estimée:

$$\hat{z}_k = \hat{N}(q^{-1})\hat{y}_k + \hat{D}(q^{-1})\tilde{u}_k \quad (5.32)$$

Les polynômes N et D sont obtenus en résolvant l'identité de Bezout :

$$\hat{N}(q^{-1})\hat{B}(q^{-1}) + \hat{D}(q^{-1})\hat{A}(q^{-1}) = 1 \quad (5.33)$$

2.2.2.2 Application au moteur Diesel

L'objectif de la loi de commande est de faire passer la pression dans le collecteur d'échappement d'une valeur p_{2e1} à la valeur p_{2e2} en suivant la trajectoire

$$p_2^d = p_{2e} + \tilde{B}(q)z_k^d \quad (5.34)$$

avec

$$\tilde{B}(q^{-1}) = H_S(q^{-1})B(q^{-1}) \quad (5.35)$$

où le polynôme H_S permet de rejeter les perturbations statiques présentes dans le signal de sortie. Nous avons modifié le signal de commande selon [Landau 98] :

$$\tilde{u}_{1k} = K(q)z_k^d - \hat{R}(q^{-1})\tilde{u}_{1k-1} - \hat{S}(q^{-1})y_k \quad (5.36)$$

avec :

$$\hat{R}(q^{-1}) = 1 + r_1q^{-1} + \dots + r_{n_r}q^{-n_r} = 1 + q^{-1}\hat{R}^*(q^{-1}) \quad (5.37)$$

$$\bar{u}_{1k} = \begin{cases} \tilde{u}_{1k} & u_{sat\ inf} \leq \tilde{u}_{1k} \leq u_{sat\ sup} \\ u_{sat\ sup} & \tilde{u}_{1k} > u_{sat\ sup} \\ u_{sat\ inf} & \tilde{u}_{1k} < u_{sat\ inf} \end{cases} \quad (5.38)$$

Afin d'obtenir une dynamique satisfaisante lorsque le système quitte la saturation, nous avons considéré le polynôme [Landau 98] :

$$P_R(q^{-1}) = 1 - \exp\left(-\frac{T_e}{\tau_{sat}}\right)q^{-1} \quad (5.39)$$

où τ_{sat} est la constante de temps d'un système du 1^{er} ordre. L'expression finale du contrôleur dont nous donnons une représentation figure 18 est alors :

$$P_R(q^{-1})\bar{u}_{1k} = K(q)z_k^d - \hat{S}(q^{-1})y_k - [\hat{R}^*(q^{-1}) + \exp\left(-\frac{T_e}{\tau_{sat}}\right)]\bar{u}_{1k-1} \quad (5.40)$$

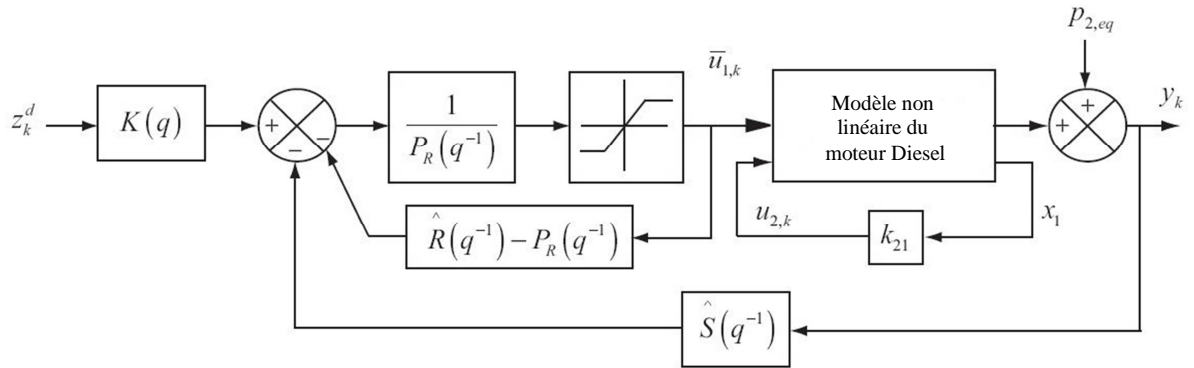


Fig. 18 : Structure du contrôleur RST

Les paramètres du contrôleur sont mis à jour selon la méthode d'identification CLOE (figure 19).

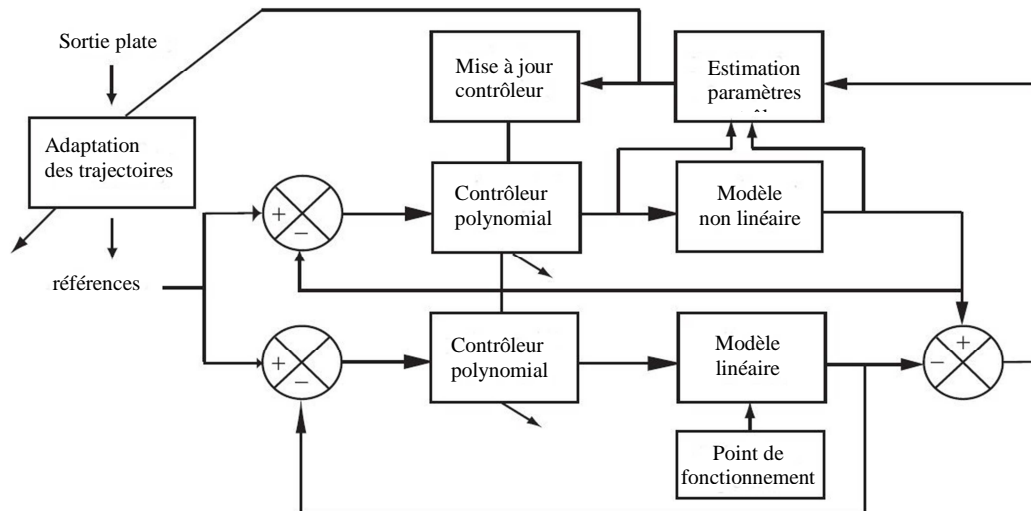


Fig. 19 : Structure de la boucle de régulation basée sur la méthode d'identification CLOE

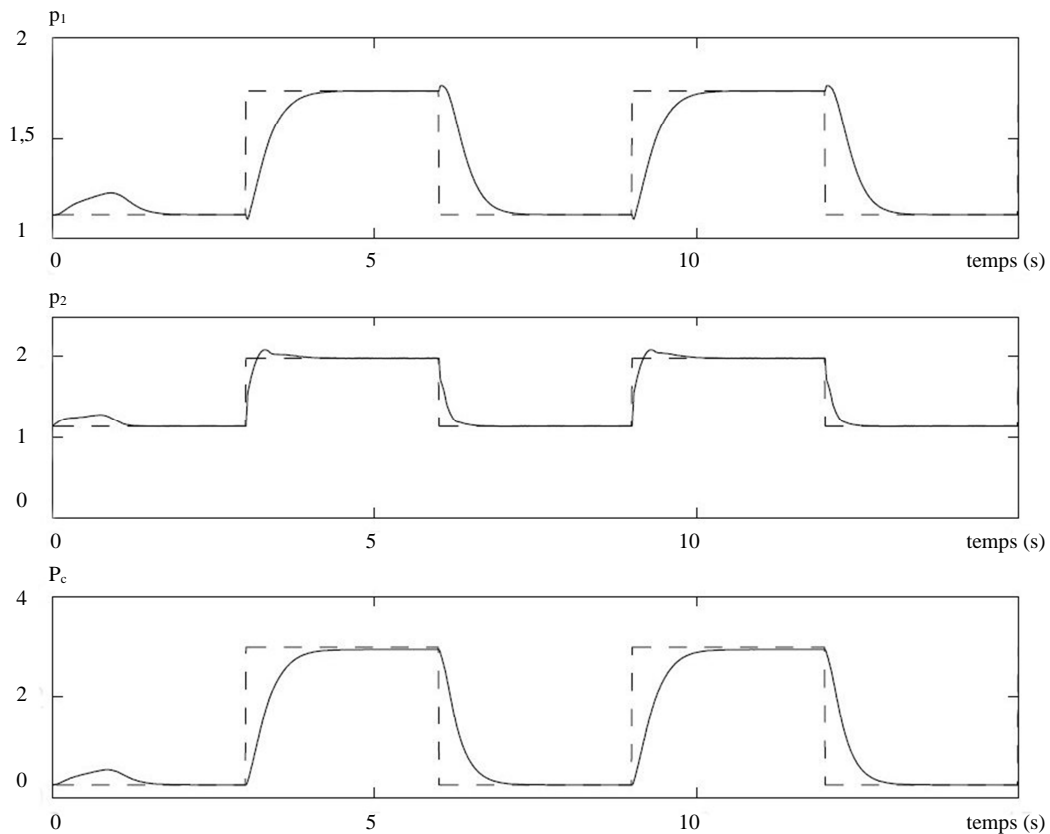


Fig. 20 : Résultats de simulation

Les résultats que nous avons obtenus en simulation se représentent figure 20. Ils montrent les bonnes performances du contrôleur en termes de régulation et de rejet de perturbations. La robustesse de ce régulateur a été étudiée à partir des fonctions de sensibilité sortie-perturbation et entrée-perturbation. La marge de module et la marge de retard par rapport à la période d'échantillonnage sont suffisantes pour garantir cette propriété.

2.2.3 Synthèse de contrôleurs par bouclage dynamique et platitude

Avec Ali ACHIR, nous avons ensuite cherché comment éviter la passivation qui entraîne un choix empirique des paramètres influençant la dynamique de l'entrée esclave. Notre objectif était de réguler simultanément le rapport air / carburant (AFR) et le taux de recirculation de gaz d'échappement (EGR) en fonction de la vitesse du moteur N et du débit de carburant injecté W_f . Pour ce faire, nous sommes partis des hypothèses suivantes :

- les pressions p_1 et p_2 respectivement des collecteurs d'admission et d'échappement sont mesurables ainsi que la puissance du compresseur P_c .
- pour un couple (N, W_f) donné, les valeurs optimales d'AFR et d'EGR ont été déterminées expérimentalement et intégrées dans des cartographies :

$$\overline{AFR} = AFR_d(N, W_f) \quad (6.1)$$

et

$$\overline{EGR} = EGR_d(N, W_f) \quad (6.2)$$

2.2.3.1 Méthode de synthèse proposée

Le rapport air / carburant et le taux EGR n'étant pas directement mesurables, nous avons modifié le vecteur de sortie du système (2.6) de telle sorte à faire apparaître p_1 , p_2 et P_c . Pour pouvoir appliquer la platitude à un système réduit linéaire sans dynamique de zéros, nous avons sélectionné le vecteur de sortie

$$y = h(x) = \begin{pmatrix} p_1 + \left(\frac{k_1}{k_2}\right)p_2 \\ P_c \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

puis nous avons réalisé un découplage des chaînes entrées-sorties en ajoutant un intégrateur sur l'entrée u_2

$$u_2 = \dot{\xi} \quad (6.4)$$

ce qui revient à procéder à une extension de dynamique et à considérer les nouvelles entrées de commande

$$\begin{cases} v_1 = u_1 \\ v_2 = \xi \end{cases} \quad (6.5)$$

l'entrée u_1 restant inchangée. La double dérivation par rapport au temps de chaque sortie du système augmenté conduit à

$$\begin{bmatrix} y_1^{(2)} \\ y_2^{(2)} \end{bmatrix} = \gamma(x, \xi) + \delta(x, \xi)v \quad (6.6)$$

avec

$$\gamma(x, \xi) = \begin{bmatrix} \frac{k_1 k_c}{p_1^\mu - 1} \left[\frac{1}{\tau} (-P_c + n_m k_t (1 - p_2^{-\mu}) \xi) + \frac{k_1 \mu W_c p_1^{\mu-1}}{k_c} (k_e p_1 - W_c) \right] \\ \frac{P_c}{\tau^2} + \frac{n_m k_t}{\tau} \xi [\mu k_2 p_2^{-(\mu+1)} (k_e p_1 + W_f - \xi) - \frac{(1 - p_2^{-\mu})}{\tau}] \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

et

$$\delta(x, \xi) = \begin{bmatrix} -\mu k_1^2 \frac{W_c p_1^{\mu-1}}{p_1^\mu - 1} & -k_1 \\ -\frac{\mu n_m k_t k_2}{\tau} \xi p_2^{-(\mu+1)} & \frac{n_m k_t}{\tau} (1 - p_2^{-\mu}) \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Nous avons vérifié que la matrice de découplage (6.8) était inversible dans l'ensemble défini par : $D = \{p_1 > 1, p_2 > 1, P_c > 0, \xi > 0\}$ et avons pu par conséquent écrire la loi de commande [Charlet 89] [Charlet 91] :

$$v = \delta^{-1}(x, \xi)(w - \gamma(x, \xi)) \quad (6.9)$$

Enfin, en procédant au changement de coordonnées

$$(p_1, p_2, P_c, \xi) \longrightarrow (y_1, y_2, \dot{y}_1, \dot{y}_2) \quad (6.10)$$

le système hérite alors d'une dynamique linéaire de la forme

$$\begin{cases} \ddot{y}_1 = w_1 \\ \ddot{y}_2 = w_2 \end{cases} \quad (6.11)$$

où $\omega = (\omega_1, \omega_2)^T$ désigne les trajectoires de référence désirées. Pour assurer la poursuite de trajectoire de référence des sorties plates y_1^* et y_2^* , nous avons considéré les erreurs de poursuite

$$e_1 = y_1^* - y_1 \quad (6.12)$$

et

$$e_2 = y_2^* - y_2 \quad (6.13)$$

en imposant à ces dernières une dynamique de système d'ordre 2

$$\begin{cases} \ddot{e}_1 + k_{11}\dot{e}_1 + k_{12}e_1 = 0 \\ \ddot{e}_2 + k_{21}\dot{e}_2 + k_{22}e_2 = 0 \end{cases} \quad (6.14)$$

où k_{11} , k_{21} , k_{21} et k_{22} sont des constantes positives telles que les erreurs de poursuite convergent asymptotiquement vers zéro. Les trajectoires de référence pour la commande (6.9) sont alors :

$$\begin{cases} w_1 = \ddot{y}_1^* + k_{11}(\dot{y}_1^* - \dot{y}_1) + k_{12}(y_1^* - y_1) \\ w_2 = \ddot{y}_2^* + k_{21}(\dot{y}_2^* - \dot{y}_2) + k_{22}(y_2^* - y_1) \end{cases} \quad (6.15)$$

2.2.3.2 Application au modèle de moteur Diesel

La structure en boucle fermée représentée figure 20 a été implémentée dans un ordinateur dSpace MicroAutoBox 1401/1501 et testée en simulation temps réelle dans le cadre du projet CANDICE en partenariat avec l'Université du Sussex à Brighton.

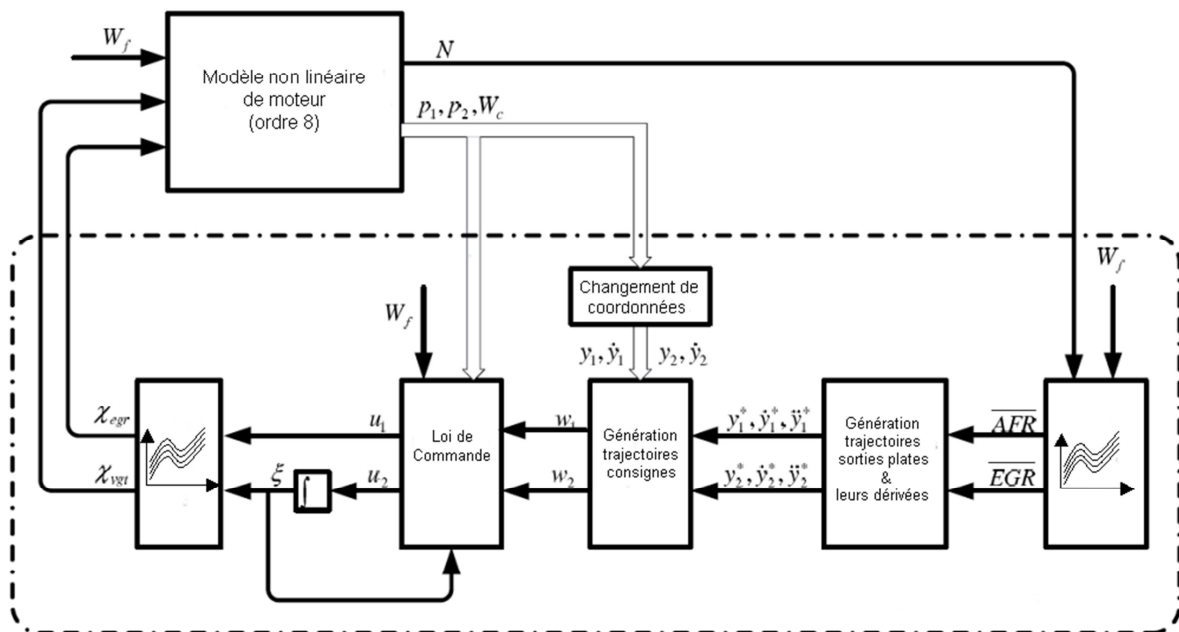


Fig. 20 : Structure en boucle fermée pour la régulation du taux EGR et de l'AFR

Elle comprend les dynamiques des actionneurs qui ont été modélisées par des systèmes à retard du 1^{er} ordre dont les paramètres ont été identifiés dans le domaine fréquentiel à partir de tests expérimentaux effectués sur banc moteur.

Variables	Point de fonctionnement 1	Point de fonctionnement 2
Régime moteur (trs/min)	1600	1600
Débit carburant (kg/h)	7,2	14,4
\overline{AFR}	56,25	41,45
\overline{EGR}	0,305	0,150
y_1^* (bar)	1,46	2,06
y_2^* (kW)	3,01	12,028
p_1^* (bar)	1,33	1,87
p_2^* (bar)	1,42	1,97
W_c^* (kg/s)	0,086	0,150

Tableau 1

Pour tester le contrôleur proposé, nous avons simulé un changement de points de fonctionnement du moteur tout en maintenant la vitesse de rotation constante à 1600 trs/min. Concrètement, ce changement de points de fonctionnement est réalisé en variant la charge appliquée sur ce moteur et par conséquent le débit de carburant.

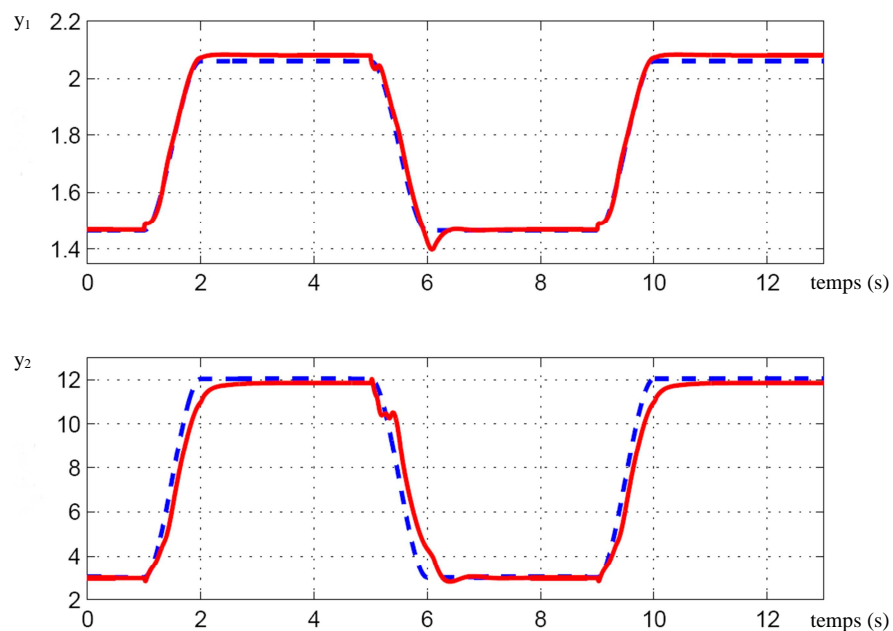


Fig. 21 : Evolution des sorties plates
 Bleu : trajectoires de consigne
 Rouge : modèle d'ordre plein

W_c

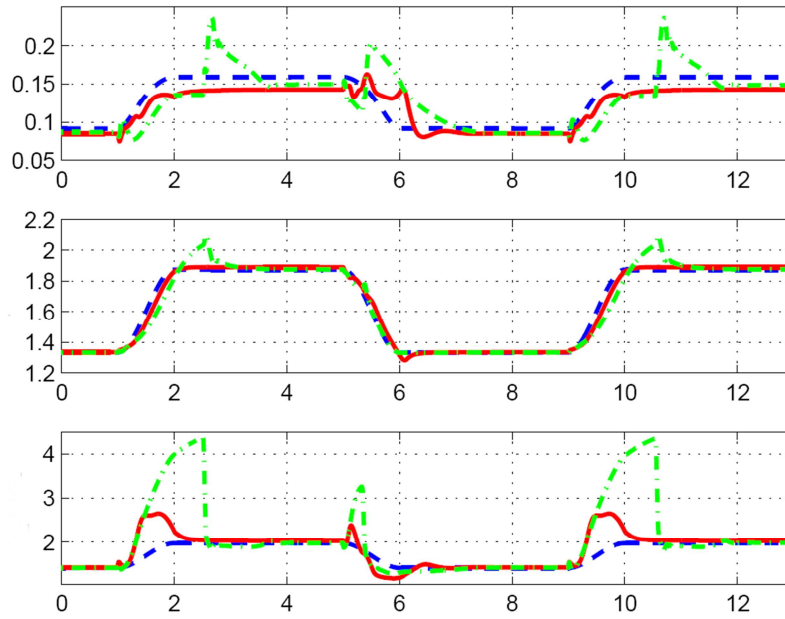


Fig. 22 : Evolution des variables d'état
 Bleu : trajectoires de consigne
 Rouge : avec la stratégie proposée
 Vert : avec les contrôleurs PI

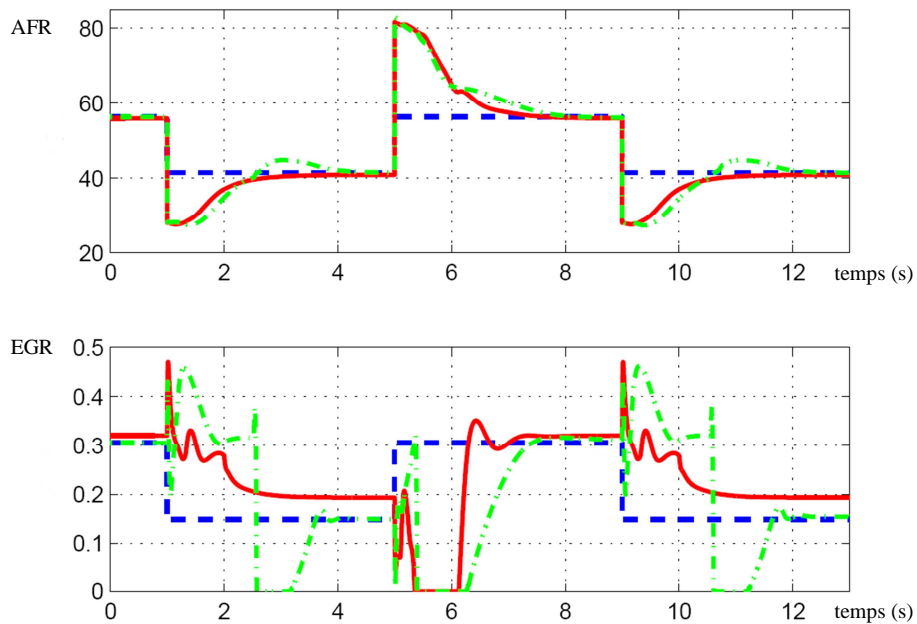


Fig. 23 : Evolution de l'AFR et du taux d'EGR
 Bleu : trajectoires de consigne
 Rouge : avec la stratégie proposée
 Vert : avec les contrôleurs PI

La figure 21 montre que les sorties plates suivent relativement bien les trajectoires désirées. Pour comparaison, les résultats obtenus avec une stratégie à base de correcteurs PI sont

également représentés. La méthode proposée permet de s'affranchir de la passivation suivant l'approche maître / esclave et d'une linéarisation autour d'un point de fonctionnement du moteur Diesel. A ce titre, elle dispense de l'algorithme d'identification adaptatif nécessaire. Cela dit, nous constatons dans les figures 22 et 23 qu'elle n'assure pas complètement l'annulation de la dynamique des zéros du système d'ordre plein.

2.2.4 Synthèse de contrôleurs à partir de la GPC à base d'état

Dans le cadre de la thèse K. NAGOUDI-LAYERLE, je me suis intéressé à la GPC à base d'état qui offre des perspectives intéressantes du point de vue de la robustesse mais qui se heurtait toujours au problème des systèmes MIMO à non minimum de phase [Maciejowski 02] [Wang 06]. L'état de l'Art réalisé par K. NAGOUDI-LAYERLE a d'ailleurs montré que la platitude n'a pas résolu le problème des zéros instables pour cette commande (à la différence de la GPC à base de sortie).

2.2.4.1 Rappel sur la GPC à base d'état

Soit le système MIMO discret suivant

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + B\Delta u(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (7.1)$$

où $\Delta u(k)$ et $y(k)$ représentent respectivement la variation du signal de commande de dimension $(q \times 1)$ et la sortie de dimension $(s \times 1)$ de ce système. Les matrices A , B et C sont respectivement de dimension $(n \times n)$, $(n \times q)$ et $(s \times n)$. Appliqué au système (7.1), le principe de la GPC à base d'état se résume au calcul de la séquence des variations futures

$$[\Delta u(k), \Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+N_2)] \quad (7.2)$$

de la commande à partir de la minimisation du critère quadratique J :

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} [\hat{y}(k+j) - y_c(k+j)]^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_u} [\Delta u(k+j-1)]^2 \quad (7.3)$$

où \hat{y} et y_c désignent respectivement la sortie estimée et la consigne désirée. N_u , N_l et N_2 désignent respectivement l'horizon de commande et les horizons minimum et maximum de prédiction. λ est un paramètre de pondération de la commande.

Cette approche nécessitant la reconstruction des états non mesurables, nous avons considéré l'observateur suivant à déviation d'entrée :

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + B\Delta u(k) + L[y(k) - C\hat{x}(k)] \\ \hat{y}(k) = C\hat{x}(k) \end{cases} \quad (7.4)$$

où L est la matrice gain de l'observateur. En définissant les matrices G et M comme suit [Elshafei 91] :

$$G = \begin{bmatrix} CB & & & & \\ CAB & CB & & & \\ \vdots & CAB & \ddots & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & CB & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ CA^{N_2-1}B & CA^{N_2-2}B & \dots & CA^{N_2-N_u-1}B & \end{bmatrix} \quad (7.5)$$

et

$$M = [C \ CA \ \dots \ CA^{N_2-1}]^T \quad (7.6)$$

La sortie estimée est alors exprimée sous la forme suivante [Watanabe 91]

$$\hat{y}(k+1) = G\Delta u(k) + MA\hat{x}(k) + ML\xi(k) \quad (7.8)$$

avec

$$\xi(k) = y(k) - \hat{y}(k) \quad (7.9)$$

où

$$\hat{y}(k) \triangleq \hat{y}(k/k-1) \quad (7.10)$$

La minimisation de J conduit finalement au vecteur de commande

$$\Delta u(k) = [G^T G + \lambda I]^{-1} G^T [y_c(k) - MA\hat{x}(k) - ML\xi(k)] \quad (7.11)$$

qui est bien fonction de l'estimation du vecteur d'état. L'utilisation d'une telle loi de commande se heurte au problème des pôles et zéros à l'extérieur du cercle unité. Dans le cas de pôles instables, une solution classique consiste à effectuer initialement un placement de pôles. Cela revient à stabiliser le système tout en choisissant sa dynamique avant d'appliquer la commande prédictive [Gawthrop 00][Skrjanc 04].

2.2.4.2 Méthode de synthèse proposée

Dans le cadre du CNRT « Combustion et moteurs », je me suis attaché avec K. NAGOUDI-LAYERLE à établir une méthode résolvant le problème posés par les systèmes MIMO instables à non minimum de phase en vue d'une application au moteur Diesel.

La première étape de la méthode que nous avons proposée s'inspire du découplage matriciel des systèmes continus [Mayne 00]. L'objectif est d'obtenir des chaînes d'entrées-sorties indépendantes entre elles. Pour la suite, il est supposé que

$$\dim \Delta u = \dim y = s \quad (7.12)$$

Pour la $i^{\text{ème}}$ sortie du système considéré, le nombre minimum d'incrément d_i à appliquer pour faire apparaître l'entrée $u(k)$ s'appelle l'indice caractéristique. C'est donc le plus petit entier tel que

$$c_i A^{d_i-1} B \neq 0 \quad (7.13)$$

où c_i est la $i^{\text{ème}}$ ligne de la matrice C associée à la sortie y_i . Après d_i incréments, la $i^{\text{ème}}$ sortie s'écrit

$$y_i(k + d_i) = c_i A^{d_i} x(k) + c_i A^{d_i-1} B u(k) + \dots + c_i B u(k + d_i - 1) \quad (7.14)$$

Ainsi l'ensemble des équations relatives à chacune des sorties peut être mis sous la forme

$$\begin{bmatrix} y_1(k + d_1) \\ \vdots \\ y_s(k + d_s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 A^{d_1} \\ \vdots \\ c_s A^{d_s} \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} c_1 A^{d_1-1} B \\ \vdots \\ c_s A^{d_s-1} B \end{bmatrix} u(k) \quad (7.15)$$

soit encore

$$\begin{bmatrix} y_1(k + d_1) \\ \vdots \\ y_s(k + d_s) \end{bmatrix} = \Delta_0 x(k) + \Delta_1 \Delta u(k) \quad (7.16)$$

En supposant que la matrice Δ_1 soit inversible (condition nécessaire et suffisante), le système est découplable et il est alors possible de lui appliquer la loi de commande

$$u(k) = \Delta_1^{-1} (\nu(k) - \Delta_0 x(k)) \quad (7.17)$$

où $v(k)$ est le vecteur consigne du système découplé.

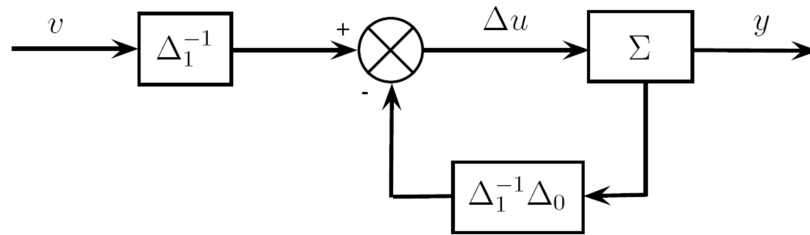


Fig. 24 : Commande du système découplé

Le système découplé s'écrit alors

$$\begin{cases} x(k+1) = \bar{A}x(k) + \bar{B}v(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (7.18)$$

avec

$$\bar{A} = A - B\Delta_1^{-1}\Delta_0 \quad (7.19)$$

et

$$\bar{B} = B\Delta_1^{-1} \quad (7.20)$$

Le système (7.1) étant maintenant découplé en s sous-systèmes, il est possible de fixer la dynamique de chacun de ces sous-systèmes indépendamment. Dans cet objectif, un changement de base est effectué :

$$\begin{cases} \xi(k+1) = \begin{bmatrix} \xi_1(k+1) \\ \vdots \\ \xi_s(k+1) \end{bmatrix} = Tx(k+1) = \begin{bmatrix} A_1 & & \\ & \ddots & \\ & & A_s \end{bmatrix} \xi(k) + \begin{bmatrix} \beta_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \beta_s \end{bmatrix} v(k) \\ y(k) = \begin{bmatrix} \gamma_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \gamma_s \end{bmatrix} \xi(k) \end{cases} \quad (7.21)$$

avec

$$T = \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_i \\ \vdots \\ T_s \end{bmatrix} \quad (7.22)$$

et

$$T_i = [c_i \ c_i A \ \dots \ c_i A^{d_i-1}]^T \quad (7.23)$$

La nouvelle représentation d'état est alors exprimée sous la forme

$$\begin{cases} \xi(k+1) = \tilde{A}\xi(k) + \tilde{B}\nu(k) \\ y(k) = \tilde{C}\xi(k) \end{cases} \quad (7.24)$$

avec

$$\tilde{A} = T\bar{A}T^{-1} \quad (7.25)$$

$$\tilde{B} = T\bar{B} \quad (7.26)$$

$$\tilde{C} = \bar{C}T^{-1} \quad (7.27)$$

où chaque triplet (A_i, B_i, γ_i) est donné par la forme compagne de commande d'une chaîne d'intégrateurs.

Pour chaque sous-système, le gain \tilde{K}_i du retour d'état est déterminé par un placement de pôles et l'équation caractéristique

$$\Phi(z) = z^{d_i} + \alpha_{id_{i-1}}z^{d_i-1} + \dots + \alpha_{i0} \quad (7.28)$$

ce qui mène à la nouvelle expression du signal de commande

$$\nu(k) = -\tilde{K}\xi(k) + y_c(k) = -\tilde{K}Tx(k) + y_c(k) = -Kx(k) + y_c(k) \quad (7.29)$$

avec

$$K = \begin{bmatrix} \alpha_1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ & & & \alpha_s \end{bmatrix} \quad (7.30)$$

et

$$\alpha_i = [\alpha_{i0} \ \alpha_{i1} \ \dots \ \alpha_{id_i-1}] \quad (7.31)$$

$$\Delta u(k) = -\Delta_1^{-1}(\Delta_0 + \tilde{K}T)x(k) + \Delta_1^{-1}y_c(k) \quad (7.32)$$

Deux cas peuvent se présenter :

- Si la somme des degrés relatifs est égale l'ordre du système, la dynamique des zéros est absente et le problème de non minimum de phase est alors résolu.
- Si la somme des degrés relatifs est inférieure à l'ordre du système, la dynamique des zéros est présente

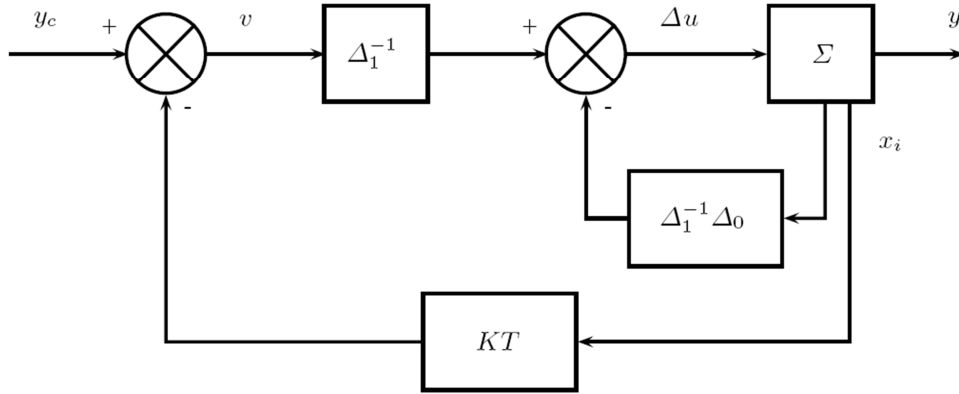


Fig. 25 : Stabilisation des pôles instables par retour d'état

Une fois les différents sous-systèmes stabilisés, la dernière étape consiste à leur appliquer la GPC à base d'état

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_{2m}} [\hat{y}_m(k+j) - y_{c_m}(k+j)]^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_{u_i}} [\Delta_1 u_i(k+j-1)]^2 \quad (7.33)$$

où N_{2_m} et N_{u_i} correspondent respectivement à l'horizon de prédiction et de commande de chaque sortie $m = 1, \dots, s$ et chaque entrée $i = 1, \dots, q$ du système. La loi de commande de chacun des sous-systèmes est donnée par :

$$u(k) = [G_{mi}^T G_{mi} + \lambda I]^{-1} G_{mi}^T [y_{c_m} - M_{mi} A_{mi} \hat{x}(k) - M_{mi} L_{mi} \xi(k)] \quad (7.34)$$

avec

$$G_{mi} = \begin{bmatrix} C_{mi} \tilde{B}_{mi} & & & & \\ C_{mi} \tilde{A}_{mi} \tilde{B}_{mi} & C_{mi} \tilde{B}_{mi} & & & \\ \vdots & C_{mi} \tilde{A}_{mi} \tilde{B}_{mi} & \ddots & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & & C_{mi} \tilde{B}_{mi} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_{mi} \tilde{A}_{mi}^{N_2-1} \tilde{B}_{mi} & C_{mi} \tilde{A}_{mi}^{N_2-2} \tilde{B}_{mi} & \cdots & C_{mi} \tilde{A}_{mi}^{N_2-N_u-1} \tilde{B}_{mi} & \end{bmatrix} \quad (7.35)$$

et

$$M_{mi} = [C_{mi} \ C_{mi} \tilde{A}_{mi} \ \cdots \ C_{mi} \tilde{A}_{mi}^{N_2-1}]^T \quad (7.36)$$

2.2.4.3 Application au modèle de moteur Diesel

Au cours du projet PACTE, K. NAGOUDI-LAYERLE et moi avons appliqué la méthode de synthèse présentée afin de réguler simultanément la pression dans le collecteur d'admission et la pression dans le collecteur d'échappement. Pour ce faire, nous avons considéré le modèle

MIMO non linéaire d'ordre 3 de moteur Diesel (2.6). Les entrées W_{VGT} et W_{EGR} sont respectivement les débits d'air au travers la turbine et de gaz d'échappement au travers la vanne EGR. Les sorties considérées sont p_1 et p_2 respectivement les pressions dans le collecteur d'admission et dans le collecteur d'échappement. Linéarisé autour du point de fonctionnement 1 indiqué dans le Tableau 2,

Variables	Point de fonctionnement 1	Point de fonctionnement 2
Régime moteur (trs/min)	1600	1600
Débit carburant (kg/h)	7,2	14,4
p_1^* (bar)	1,33	1,87
p_2^* (bar)	1,42	1,97
W_c^* (kg/s)	0,086	0,150

Tableau 2

le modèle MIMO d'ordre 3 s'écrit sous la forme :

$$H(z) = \begin{bmatrix} \frac{0.2611z^2 - 0.5411z + 0.2531}{z^3 - 2.686z^2 + 2.378z - 0.6942} & \frac{-3.288z^2 + 5.611z - 2.351}{z^3 - 2.686z^2 + 2.378z - 0.6942} \\ \frac{-0.0003937z^2 - 0.01838z - 0.008045}{z^3 - 2.686z^2 + 2.378z - 0.6942} & \frac{-3.332z^2 + 5.616z - 2.312}{z^3 - 2.686z^2 + 2.378z - 0.6942} \end{bmatrix} \quad (7.37)$$

Ce système est instable et à non minimum de phase. Les degrés relatifs d_1 et d_2 des deux sous-systèmes sont égaux à 1. Un premier changement de base suivant la matrice

$$T = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 79.0403 & -3.7107 & 100 \end{bmatrix} \quad (7.38)$$

permet de représenter le système (7.37) sous la forme

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{z - 0.99} & 0 \\ 0 & \frac{1}{z - 0.97} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{u}_1 \\ \tilde{u}_2 \end{bmatrix} \quad (7.40)$$

Les résultats de simulation présentés ci-dessous ont été obtenus en appliquant la méthode de l'accommodation indirecte aux défauts tel que représenté dans la figure (26) [Noura 94]. L'algorithme des moindres carrés récursifs permet de calculer la matrice $H(z)$ de fonctions de transfert lorsqu'un défaut système du moteur est détecté par le module FDI.

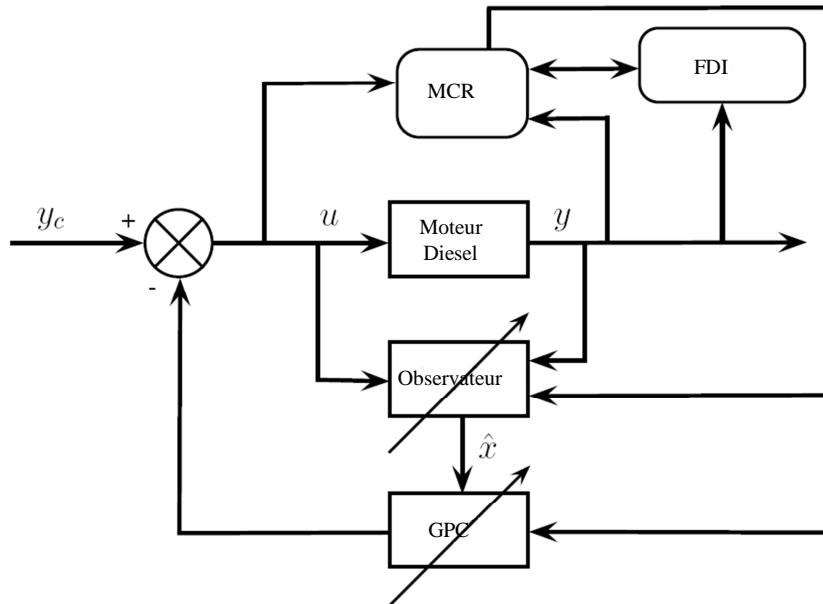


Fig. 26 : Schéma de commande avec accommodation indirecte

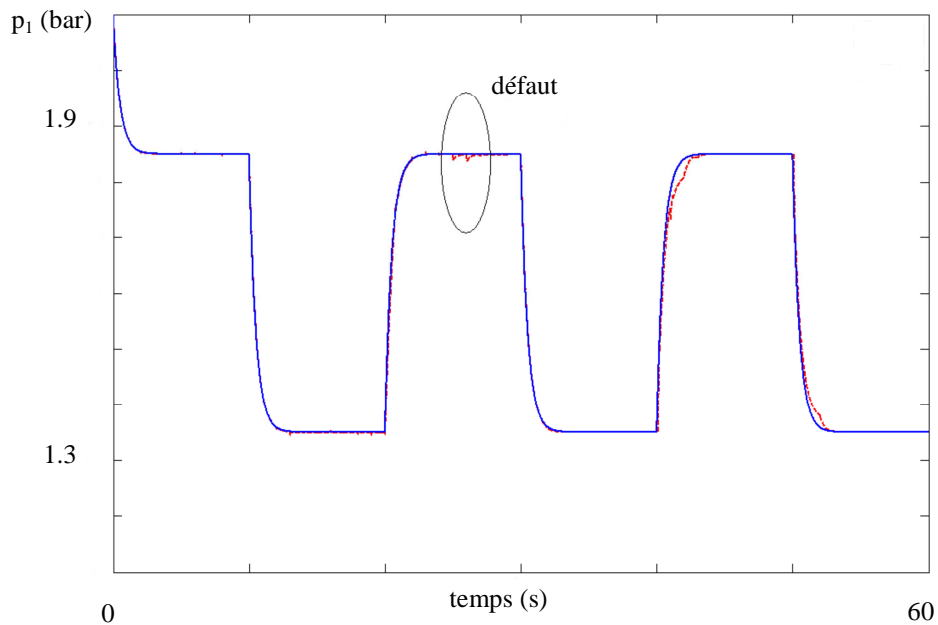


Fig. 27 : Pression dans le collecteur d'admission (GPC avec découplage)
 Bleu : Trajectoire désirée
 Rouge : Trajectoire obtenue

Les résultats de simulation présentés dans les figures 27 à 30 correspondent au passage périodique du point fonctionnement 1 au point de fonctionnement 2 et réciproquement avec apparition d'un défaut système à partir de $t = 25s$.

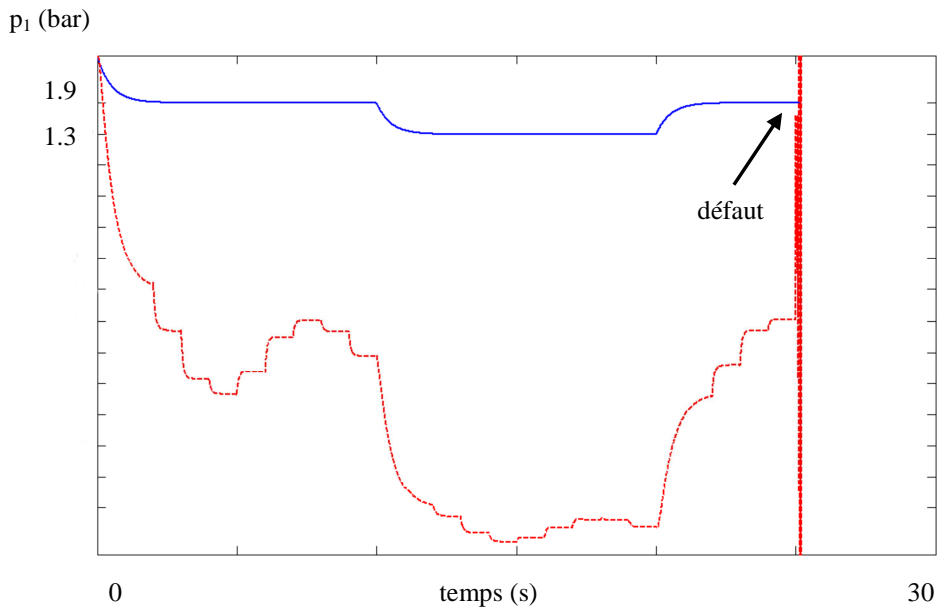


Fig. 28 : Pression dans le collecteur d'admission (GPC sans découplage)
Bleu : Trajectoire désirée
Rouge : Trajectoire obtenue

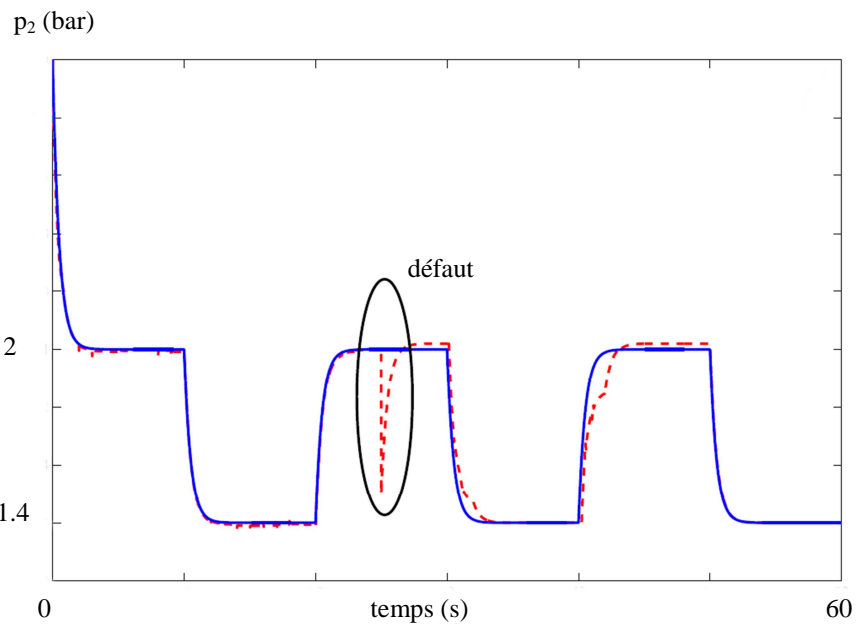


Fig. 29 : Pression dans le collecteur d'échappement (GPC avec découplage)
Bleu : Trajectoire désirée
Rouge : Trajectoire obtenue

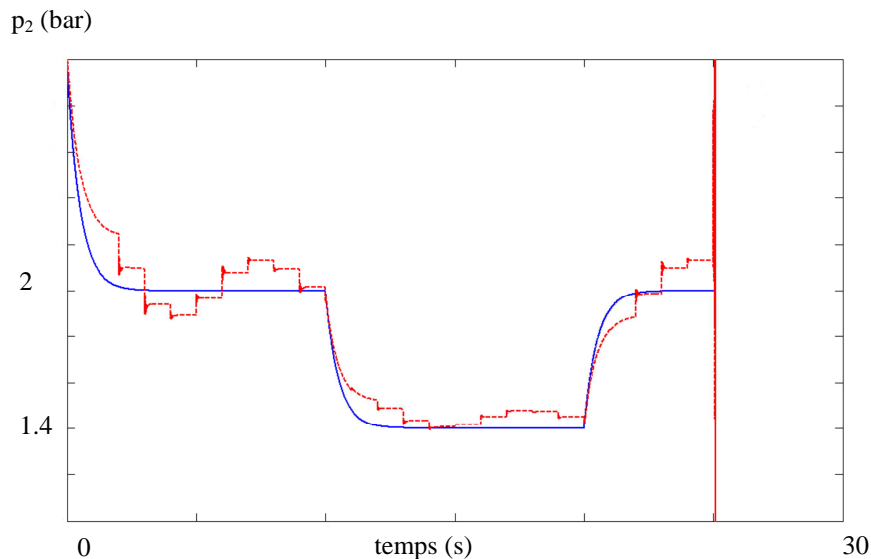


Fig. 30 : Pression dans le collecteur d'échappement (GPC sans découplage)
 Bleu : Trajectoire désirée
 Rouge : Trajectoire obtenue

Les résultats de simulation montrent que l'application classique de la GPC ne permet de suivre que la trajectoire de référence de p_2 , la sortie p_1 divergeant avec le temps. L'apparition d'un défaut en $t = 25s$ engendre l'instabilité des deux pressions. A contrario, nous avons montré que le contrôleur prédictif synthétisé à partir de la méthode proposée permet de suivre les deux trajectoires de référence, notamment lorsqu'un défaut apparaît.

Sous réserve que le système ait une matrice de découplage régulière, la méthode que nous avons proposée permet de traiter séparément les différents sous-systèmes de ce dernier. Cette approche présente deux avantages majeurs : d'une part, elle laisse la possibilité de fixer indépendamment la dynamique de chacun des sous-systèmes et de stabiliser les zéros instables. D'autre part, elle permet d'optimiser séparément le choix des horizons de prédiction et de commande de chacun de ces sous-systèmes. Nous avons appliqué cette méthode à la commande du modèle non linéaire d'ordre 3 du moteur Diesel. Le contrôleur résultant a été associé à une méthode d'accommodation issue de la littérature. Les résultats de simulation ont montré que la stratégie adoptée permettait de maintenir les objectifs initiaux dès l'apparition d'un défaut système, à la différence du contrôleur synthétisé suivant l'approche classique de la GPC. Les travaux en cours portent sur l'élaboration d'un contrôleur à base de logique floue pour l'estimation du vecteur d'état nécessaire au calcul de la commande.

2.2.5 Synthèse de contrôleurs à partir de la NCGPC

Les travaux que nous menons actuellement avec M. DABO visent à élaborer, à partir de la commande prédictive non linéaire continue généralisée (NCGPC pour Nonlinear Continuous Generalized Predictive Control), un contrôleur prédictif capable intégrant les contraintes de dynamiques que nous avons identifiées à partir du modèle non linéaire d'ordre 3 réduit de Jankovik.

2.2.5.1 Rappel sur la NCGPC sans contraintes

Le principe de la NCGPC proposée par [Chen 99] consiste à déterminer la commande à appliquer au système, dans un intervalle de temps fini, en optimisant un critère J de la forme :

$$J = \sum_{i=1}^m J_i \quad (8.1)$$

avec

$$J_i = \frac{1}{2} \int_0^{T_i} [\hat{e}_i(t + \tau_i)]^2 d\tau_i \quad (8.2)$$

où

$$\hat{e}_i(t + \tau_i) = \hat{y}_i(t + \tau_i) - \hat{\omega}_i(t + \tau_i) \quad (8.3)$$

Dans (8.2) T_i correspond à l'horizon de prédiction de la $i^{\text{ème}}$ sortie, $\hat{\omega}_i(t + \tau_i)$ représentent dans (20), respectivement, la $i^{\text{ème}}$ composante des vecteurs prédits de sortie et de référence sur l'intervalle $[t, t + T_i]$.

2.2.5.2 Méthode de synthèse proposée

La synthèse d'un contrôleur d'après la théorie de la NCGPC ne peut être effectuée que si les hypothèses suivantes sont respectées :

- i.) tous les états sont accessibles à la mesure;
- ii.) les vecteurs de sortie $y(t)$ et de référence $\omega(t)$ sont suffisamment plusieurs fois différentiables par rapport au temps.
- iii.) la dynamique des zéros est asymptotiquement stable;
- iv.) le système a un vecteur degré relatif bien défini (ρ_1, \dots, ρ_m)

Pour traiter le problème des systèmes à non minimum de phase, nous proposons :

- de modifier le vecteur de sortie telle sorte que $L_{g2}h = 0$ afin d'avoir un vecteur degré relatif bien défini,
- de procéder à une extension de dynamique du vecteur d'état afin de rendre la matrice de découplage inversible.
- d'effectuer un développement en série de Taylor de l'erreur de prédiction pour résoudre le problème d'optimisation du critère de la NCGPC.

Pour la prédiction de l'erreur entre la sortie et la consigne, nous avons développé la $i^{\text{ème}}$ composante de cette erreur en série de Taylor, à l'instant $t=\tau_i$ jusqu'à un ordre $l_i > \rho_i$ donné. Pour cette $i^{\text{ème}}$ composante, nous avons :

$$\hat{e}_i(t + \tau_i) = \sum_{k=0}^{l_i} e_i^{(k)}(t) \frac{(t + \tau_i - t)^k}{k!} + R_i(\tau_i) \quad (8.4)$$

où $R_i(\tau_i)$ représente les termes d'ordre supérieurs.

En négligeant ces termes d'ordre supérieur et en écrivant le développement de Taylor sous forme matricielle, il vient :

$$\hat{e}_i(t + \tau_i) = \mathbf{t}_i(\tau_i) \mathbf{e}_i \quad (8.5)$$

$$\mathbf{e}_i = \begin{bmatrix} L_f^{(0)} h_i - \omega \\ L_f^{(1)} h_i - \dot{\omega} \\ \vdots \\ L_f^{(\rho_i)} h_i - \omega^{(\rho_i)} \\ L_f^{(\rho_i+1)} h_i - \omega^{(\rho_i+1)} \\ \vdots \\ L_f^{(\rho_i+r_i)} h_i - \omega^{(\rho_i+r_i)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{i(\rho_i \times 1)} \\ D_i(x, \bar{u}^{r_i}) \end{bmatrix} \quad (8.6)$$

avec

$$\mathbf{t}_i(\tau_i) = \begin{bmatrix} 1 & \tau_i & \dots & \frac{\tau_i^{l_i}}{l_i!} \end{bmatrix} \quad (8.7)$$

Dans (8.6), les $D_i(x, \bar{u}^{r_i})$ sont les termes résultants de la suite de dérivées de la $i^{\text{ème}}$ composante du vecteur de sortie. Nous en avons déduit la loi de commande :

$$u(x) = A(x)^{-1} \begin{bmatrix} L_1(B) \\ \vdots \\ L_{[(m-1)(r_i+1)+1]}(B) \end{bmatrix} [W - \tilde{Y}] \quad (8.8)$$

en supposant $A(x)$ inversible. Dans (8.8)

$$W = [\omega_1 \cdots \omega_1^{(l_1)} \cdots \omega_m \cdots \omega_1^{(l_m)}]^t \quad (8.9)$$

$$\tilde{Y} = [h_1(x) \cdots h_1^{(l_1)} \cdots h_m \cdots h_m^{(l_m)}]^t \quad (8.10)$$

Dans (8.8), B est donnée par :

$$B = \text{diag}\{M_1'', \dots, M_m''\}^{-1} \text{diag}\{M_1', \dots, M_m'\} \quad (8.11)$$

où les M'_i (respectivement M''_i) qui sont des matrices de dimension $(r_i + 1) \times (l_i + 1)$ (respectivement de dimension $(r_i + 1) \times (r_i + 1)$) proviennent de simplifications durant la résolution de l'équation de minimisation du critère de la matrice M_i de dimension $(l_i + 1) \times (l_i + 1)$ donnée par :

$$M_i = \int_0^{T_i} \mathbf{t}_i(\tau_i)^t \mathbf{t}_i(\tau_i) d\tau_i \quad (8.12)$$

Dans (8.8), la différence entre (8.9) et (8.10) peut s'écrire :

$$[W - \tilde{Y}] = \begin{bmatrix} \omega_1 - h_1 \\ \vdots \\ \omega_1^{(l_1)} - L_f^{(\rho_1 + r_1)} h_1 \\ \vdots \\ \omega_m - h_m(x) \\ \vdots \\ \omega_m^{(l_m)} - L_f^{(\rho_m + r_m)} h_m \end{bmatrix} \quad (8.13)$$

A des fins de comparaison, nous avons également envisagé une commande linéarisante par retour d'état avec placement de pôles dont l'expression dans le cas non linéaire est donnée par :

$$u(x) = A(x)^{-1} \left[\begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_m \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} L_f^{\rho_1} h_1(x) \\ \vdots \\ L_f^{\rho_m} h_m(x) \end{pmatrix} \right] \quad (8.14)$$

avec l'hypothèse d'une matrice de découplage régulière [Isidori 95]. Dans le cas d'un placement de pôles, la commande s'écrit

$$v = -K\xi + G\omega \quad (8.15)$$

où K est une matrice de dimension $(1 \times n)$ et G une matrice de gain de dimension $(1 \times m)$. Dans (8.15), ζ et ω sont respectivement le vecteur consigne et le niveau vecteur d'état issu du changement de coordonnées suite à l'application d'un difféomorphisme approprié.

2.2.5.3 Application au modèle de moteur Diesel

Dans le cadre du projet PACTE, nous avons écrit le modèle non linéaire d'ordre 3 (2.6) sous la forme

$$\dot{x} = f(x) + g_1(x)u_1 + g_2(x)u_2 \quad (8.16)$$

avec

$$f(x) = \begin{bmatrix} k_1 k_c \frac{P_c}{p_1^\mu - 1} - k_1 k_e p_1 \\ k_2 k_e p_1 \\ -\frac{P_c}{\tau} \end{bmatrix} \quad (8.17)$$

et

$$g_1(x) = \begin{bmatrix} k_1 \\ -k_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8.18)$$

et

$$g_2(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ -k_2 \\ K_0 (1 - p_2^{-\mu}) \end{bmatrix} \quad (8.19)$$

Avec

$$K_0 = \frac{\eta_m}{\tau} k_t \quad (8.20)$$

Le rapport air-carburant (ou AFR pour Air Fuel Ratio) et la fraction de gaz recyclés ne sont pas mesurables dans le moteur. Le choix s'est donc porté sur la pression de gaz dans le collecteur d'admission p_1 le débit du compresseur W_c . D'où le vecteur de sortie

$$y = \begin{bmatrix} p_1 \\ W_c \end{bmatrix} \quad (8.21)$$

Le choix de p_1 se justifie par le fait que, si le volume d'air frais est contrôlé à travers la pression : sachant que le mélange souhaité est stoechiométrique, il est facile d'en déduire la

fraction EGR. Un mélange est dit stœchiométrique s'il contient, chimiquement, la masse exacte d'air permettant la combustion complète du carburant injecté; pour un moteur Diesel l'AFR stœchiométrique est autour de 14,6. L'AFR est déduit de la relation

$$AFR = \frac{(1 - F_1)(W_c + W_{egr})}{W_f} \quad (8.22)$$

Pour ce modèle, le vecteur degré relatif existe et est égal à $(\rho_1, \rho_2) = (1, 1)$ pour tout triplet $(p_1, p_2, P_c) \in \Omega$. La matrice de découplage s'écrit :

$$A(x) = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ -\frac{\mu k_c k_1 P_c p_1^{\mu-1}}{(p_1^\mu - 1)^2} & -K_0 k_c \frac{p_2^{-\mu} - 1}{p_1^\mu - 1} \end{bmatrix} \quad (8.23)$$

La somme des composantes du vecteur degré relatif du modèle non linéaire considéré est égale à 2, ce qui est inférieur à l'ordre du modèle. Nous avons montré qu'il existait une dynamique de zéros, qui plus est, instable.

Pour contourner le problème de non minimum de phase, nous avons modifié le vecteur de sortie : en gardant p_1 comme première composante et en choisissant $y_2 = h(x)$ avec $x = (p_1, p_2, W_c)$ tel que $L_{g_2} h = 0$. Ce qui abouti d'une part à :

$$h(x) = P_c + \frac{K_0}{k_2} \left[p_2 - \frac{1}{1 - \mu} p_2^{1-\mu} \right] \quad (8.24)$$

et d'autre part au nouveau vecteur de sortie :

$$\tilde{y}(t) = \begin{bmatrix} p_1 \\ P_c + \frac{K_0}{k_2} \left[p_2 - \frac{1}{1 - \mu} p_2^{1-\mu} \right] \end{bmatrix} \quad (8.25)$$

Nous avons montré que ce nouveau système a une dynamique de zéros triviale mais également que sa matrice de découplage est singulière :

$$\tilde{A}(x) = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ -\frac{\mu k_c k_1 P_c p_1^{\mu-1}}{(p_1^\mu - 1)^2} & 0 \end{bmatrix} \quad (8.26)$$

En procédant à l'extension de dynamique $z = u_1$ soit $\dot{z} = v_1$ et en posant $v_2 = u_2$, le nouveau vecteur d'entrée est $[v_1, v_2]^t$. Ce qui conduit à considérer finalement le système :

$$\begin{aligned}
\dot{p}_1 &= k_1(W_c + z - k_e p_1) \\
\dot{p}_2 &= k_2(k_e p_1 - z - v_2) \\
\dot{P}_c &= \frac{1}{\tau}(\eta_m P_t - P_c) \\
\dot{z} &= v_1
\end{aligned}
\tag{8.27}$$

et le vecteur de sortie :

$$y = \begin{bmatrix} p_1 \\ h(x) = P_c + \frac{K_0}{k_2} \left[p_2 - \frac{1}{1-\mu} p_2^{1-\mu} \right] \end{bmatrix}
\tag{8.28}$$

La matrice de découplage résultante est :

$$A^e(x) = \begin{bmatrix} k_1 & k_1 k_c K_0 \frac{1 - p_2^{-\mu}}{p_1^\mu - 1} \\ K_0(p_2^{-1} - 1) & \mu k_2 K_0 (z - k_e p_1) p_2^{-\mu-1} + \frac{K_0}{\tau} (p_2^{-\mu} - 1) \end{bmatrix}
\tag{8.29}$$

La dynamique des zéros est triviale dans la mesure où la somme des degrés relatifs des composantes est égale à l'ordre du système étendu. Les schémas de commande faisant appel aux lois (8.8) et (8.14) sont représentés respectivement figure 31 et figure 32.

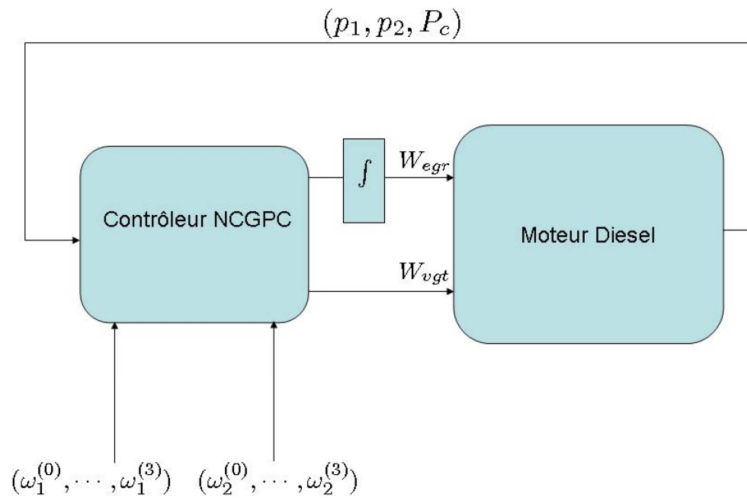


Fig. 31 : Commande du modèle non linéaire d'ordre plein par la NCGPC

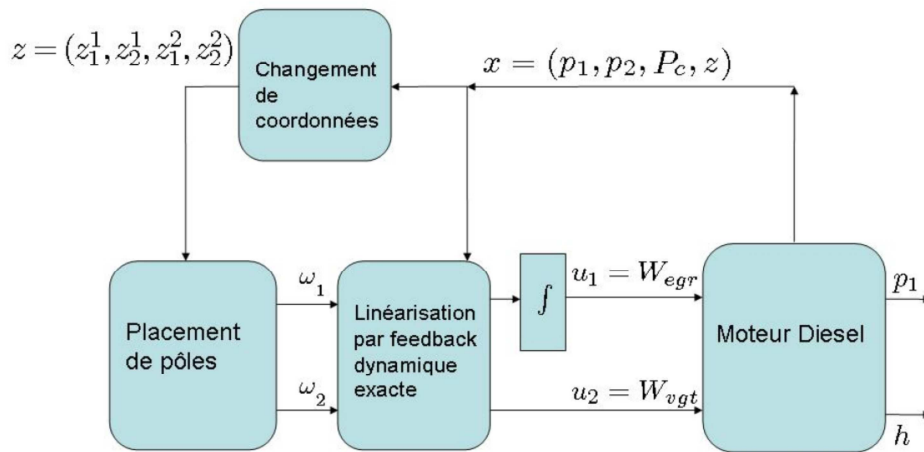


Fig. 32 : Commande du modèle non linéaire d'ordre plein par linéarisation exacte et retour d'état dynamique

Pour la simulation des deux stratégies, nous avons repris le changement de points de fonctionnement du tableau 2 considérant un régime moteur constant de 1600 trs/min. Les figures 33 à 36 montrent les résultats obtenus.

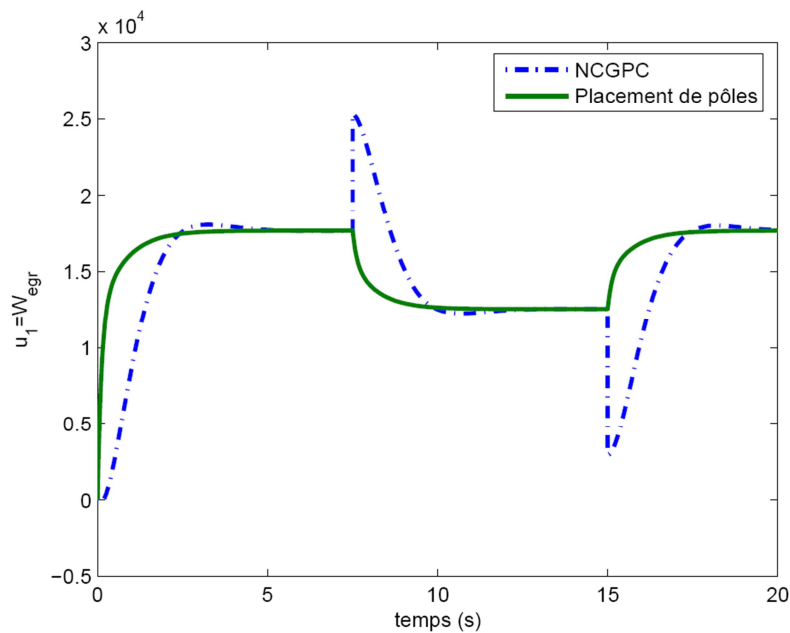


Fig. 33 : Evolution du signal de commande u_1 en fonction du temps

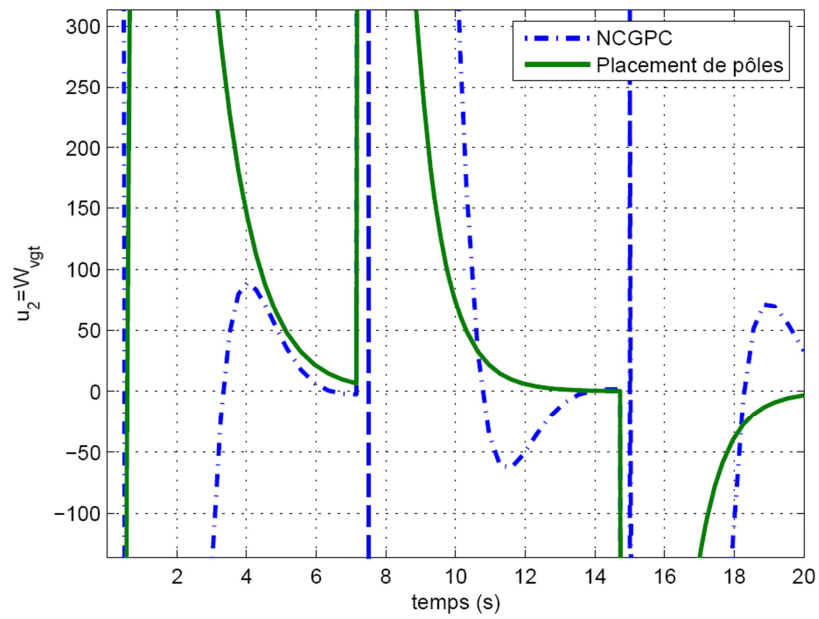


Fig. 34 : Evolution du signal de commande u_2 en fonction du temps

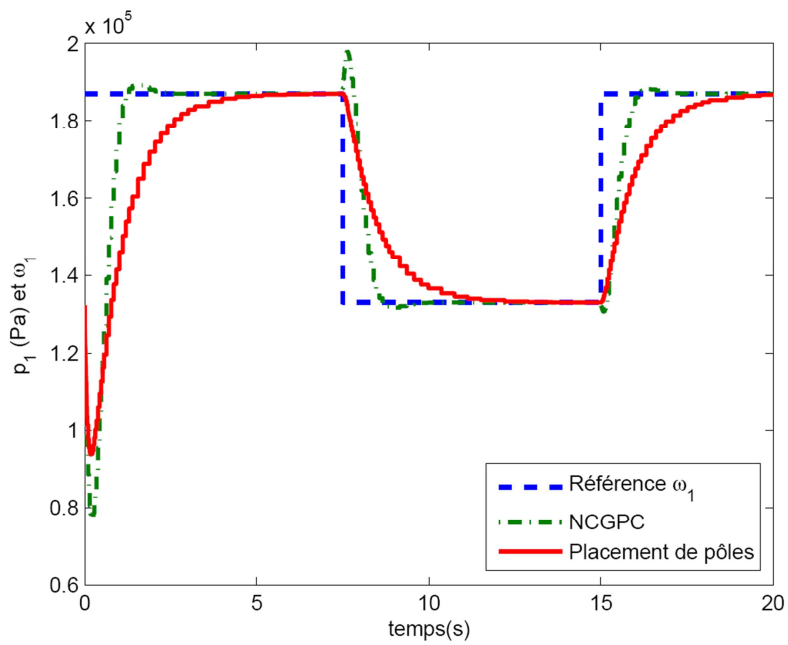


Fig. 35 : Evolution de la pression d'admission en fonction du temps

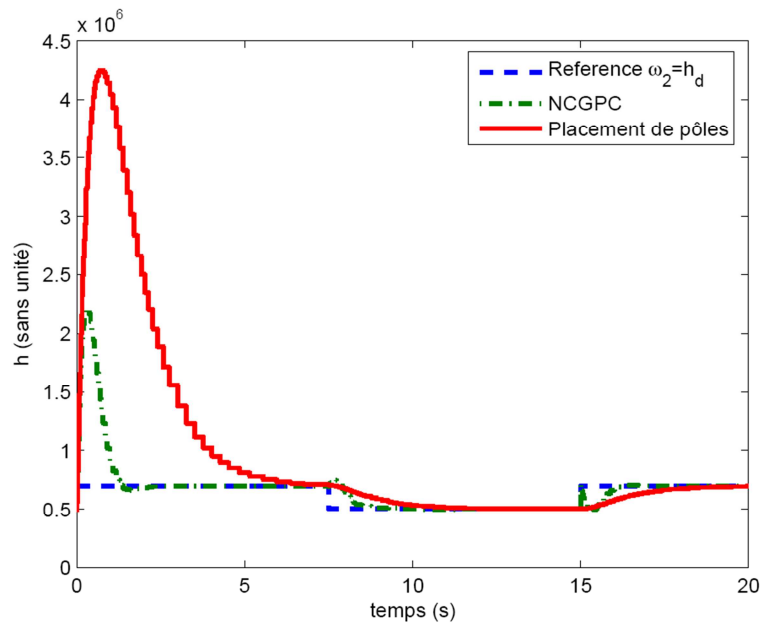


Fig. 36 : Evolution de la sortie h en fonction du temps

La comparaison théorique de la GPC avec une commande linéarisante par retour d'état dynamique montre que ces deux lois s'appuient sur la même matrice de découplage et qu'elles nécessitent toutes deux une dynamique de zéros stable. Dans les deux cas, nous avons résolu le problème de non minimum de phase du modèle non linéaire de moteur diesel. Pour ce faire, nous avons effectué une extension de dynamique et une modification du vecteur de sortie. Concernant la NCGPC, nous avons proposé de développer en série de Taylor l'erreur de prédiction jusqu'à un ordre supérieur à la somme des composantes du vecteur degré relatif. Ce développement nous a permis d'aboutir après résolution de l'équation de minimisation du critère quadratique à une expression originale de la NCGPC.

2.2.6 Synthèse d'un contrôleur à base de logique floue

Dans le cadre de la thèse de Jean-François ARNOLD effectuée en partenariat avec « Le Moteur Moderne », je me suis penché sur le problème de la régulation simultanée du débit d'air frais (ou MAF pour Mass Air Flow) et de la pression de suralimentation (ou MAP pour Manifold Air Pressure). La difficulté d'une telle régulation s'explique par le fort couplage existant entre ces deux grandeurs physiques qui met en défaut les stratégies à base de PID utilisées par les constructeurs automobiles. Une de ces stratégies est présentée dans la figure 37. Elle fait appel d'une part à un ensemble de cartographies et d'autre part à deux contrôleurs agissant séparément l'un sur le VGT et, l'autre sur la vanne EGR et le papillon afin de réguler respectivement la MAP et le MAF.

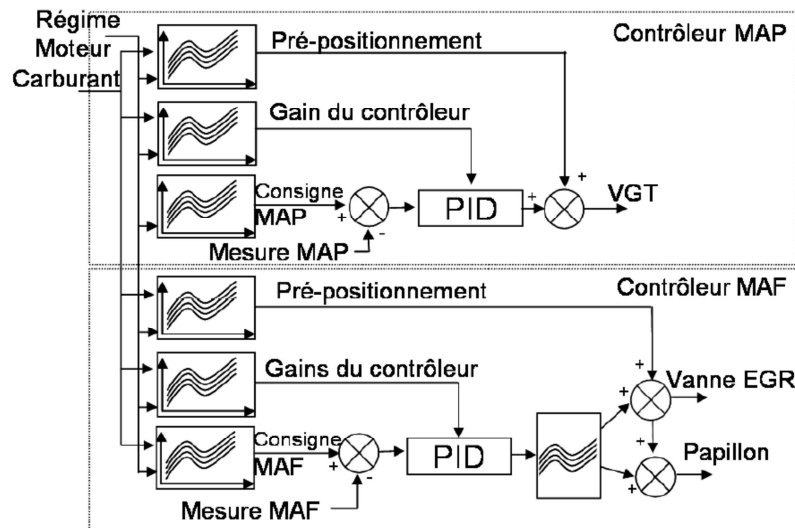


Fig. 37 : Stratégie de contrôle du système d'air actuellement utilisée

L'étude expérimentale réalisée sur banc moteur par Jean-François ARNOLD a révélé que ces deux boucles de régulation n'étaient presque jamais activées simultanément afin d'éviter des oscillations de MAF et de MAP qui dégradent notablement l'agrément d'utilisation du moteur.

Pour élaborer un contrôleur multi-variable apte à réguler simultanément la pression et le débit, nous sommes partis de l'hypothèse suivante : pour un point de fonctionnement donné (défini par un régime moteur et une quantité de carburant injecté), les consignes de MAP et de MAF constituaient le meilleur compromis possible entre pollution, consommation, performances, et agrément de conduite. Par ailleurs, dans la perspective d'une implémentation dans un calculateur existant, nous nous sommes imposés les contraintes suivantes :

- ne pas utiliser de modèle afin de s'affranchir des variations paramétriques observées d'un moteur à l'autre,
- optimiser autant que peu les ressources nécessaires en termes de puissance de calcul,
- n'exploiter que les mesures disponibles sur un véhicule de série,
- pouvoir envisager la portabilité de la stratégie sur l'ensemble d'une série d'un couple moteur-véhicule donné.

Au regard de ces contraintes et de la possibilité d'étudier le comportement du moteur sur banc, nous avons choisi d'explorer la voie de la logique floue. En effet, une bonne connaissance du moteur, plus particulièrement dans notre cas du système d'air a permis de définir de manière linguistique le comportement à obtenir et de capitaliser l'ensemble du

travail de modélisation et de compréhension des phénomènes physiques présents dans le moteur. La réputation de robustesse des contrôleurs à base de logique floue a également été déterminante dans ce choix au regard des différences existant entre les moteurs d'une même série.

2.2.6.1 Choix des entrées et interface de fuzzyfication

Les consignes poursuivies sont le débit d'air frais (MAF) et la pression de suralimentation (MAP). Les erreurs prises en compte sont donc l'erreur sur le débit d'air (MAFE) et l'erreur sur la pression de suralimentation (MAPE). Pour ne pas augmenter de manière trop importante les ressources nécessaires à la détermination de l'appartenance à chaque classe et par la-même diminuer les ressources mémoires nécessaires, un nombre minimum de classe a été utilisé. Trois classes ont donc été définies pour MAPE et MAFE :

- négative
- nulle
- positive

Ces trois classes sont représentées figure 38.

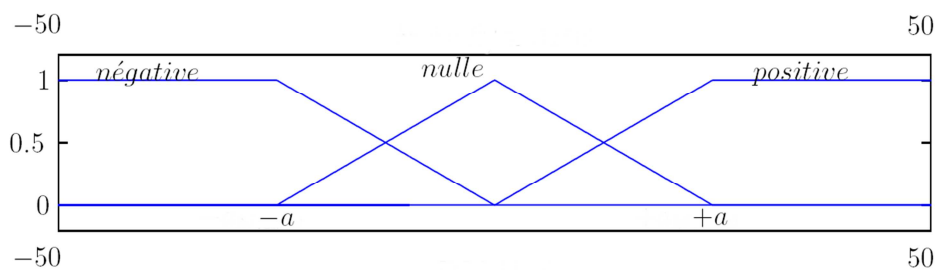


Fig. 38 : Fuzzyfication de MAPE et MAFE

Concernant la pression de suralimentation, aucune intégrale de l'erreur n'est présente. Pour obtenir un bon suivi sur cette grandeur physique, c'est donc la quantification de l'erreur qui va déterminer la précision. Un contrôleur flou seul ne permet pas d'assurer la précision. Si aucune intégrale n'est utilisée, il est nécessaire d'augmenter le nombre de classes pour ajuster l'action à mener sur les actionneurs pour diminuer l'erreur. Mais au final, la précision dépendra toujours de la largeur de la classe "nulle". En effet, lorsque l'erreur est nulle, aucune correction n'est à mener sur l'actionneur. Mais, si l'erreur est très proche de zéro, la quantification déterminera l'appartenance à deux classes : la classe "nulle" et soit la classe positive soit la classe négative.

Néanmoins, cette très faible appartenance n'entraînera qu'une très faible modification de la commande des actionneurs, modification souvent trop faible pour agir effectivement sur la position de l'actionneur (en raison des hystérésis, de l'énergie nécessaire pour engendrer un déplacement, ...). Ainsi, une erreur faible, qui se transforme en erreur statique vu qu'aucune correction n'est effectuée, est présente. Pour obtenir un bon suivi de la consigne de pression, il faut donc définir une classe "nulle" sur l'erreur de faible largeur.

Nous avons proposé d'utiliser la dérivée de l'erreur pour améliorer la stabilité et diminuer les dépassements lors des transitoires. L'erreur sur la pression de suralimentation et l'erreur sur le débit d'air frais sont corrélées. De fait, l'utilisation des deux dérivées n'apporte pas d'information complémentaire aux contrôleurs. Pour privilégier le débit d'air frais à faible charge et faible régime, il est choisi d'utiliser la dérivée de l'erreur sur le débit d'air.

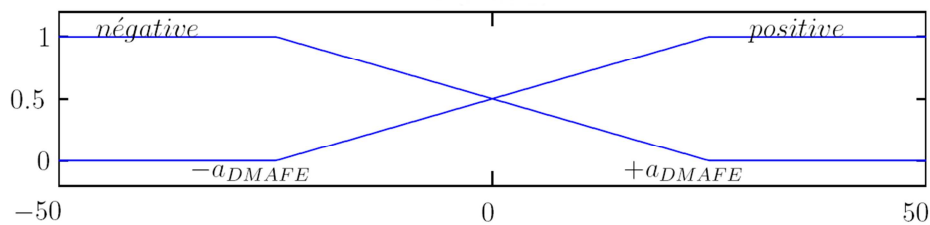


Fig. 39 : Fuzzyfication de DMAFE

Ce signal est filtré pour supprimer l'ensemble des bruits haute-fréquence et pour permettre d'avoir une dérivée plus représentative du comportement des variations de l'erreur. Pour classifier la dérivée de l'erreur et toujours par souci de diminuer au maximum les ressources demandées en termes de puissance de calcul, deux classes sont utilisées : positive et négative. L'objectif des travaux est de faciliter le réglage du contrôleur en charge du système d'air. Pour ce faire, nous avons suggéré de diminuer le nombre de cartographies embarquées en supprimant celles dédiées au pré-positionnement de la vanne EGR et du papillon. Il faut donc remplacer d'une part ces deux pré-positionnements et d'autre part l'algorithme de répartition vers les deux actionneurs (avec en entrée la sortie du PID chargé de la régulation du débit d'air) par une autre stratégie, dans notre cas, à base de logique floue.

Dans la stratégie actuellement embarquée dans les voitures, c'est l'erreur sur le débit d'air qui agit pour la position de la vanne EGR et du papillon motorisé. Nous avons conservé cette idée. L'objectif est toujours d'obtenir le plus haut taux d'EGR possible. Pour cela, il faut maintenir au maximum la vanne EGR ouverte. Nous nous sommes inspirés d'une technique appelée « split-range » pour effectuer la séparation entre la vanne EGR et le papillon. Cette technique consiste généralement à diviser la sortie d'un PID en deux zones. Dans la première

zone, seul le premier actionneur est utilisé et le second actionneur est fermé. Dans la seconde zone, le premier actionneur est grand ouvert, et c'est le second actionneur qui est utilisé pour effectuer la régulation. Pour appliquer cette technique, il faut disposer en entrée d'un PID. Le choix se porte sur l'utilisation de l'intégrale de l'erreur du débit d'air (IMAFE). En effet, nous souhaitons que la dynamique soit gérée par le contrôleur flou. Une dynamique supplémentaire introduite par un PID en entrée pourrait entraîner des oscillations dans le comportement général du système.

De plus, lorsque l'on étudie le fonctionnement d'un contrôleur split-range à l'équilibre, c'est la branche intégrale qui détermine la position de l'actionneur et sur quel actionneur l'ajustement est apporté, les branches proportionnelle et dérivée n'intervenant qu'au niveau de la stabilité et de la dynamique.

L'utilisation d'une intégrale en entrée doit donc permettre de choisir l'actionneur utilisé pour effectuer la régulation, déterminer son pré-positionnement et positionner le second actionneur. Par pré-positionnement, on entend une valeur de position que l'on va modifier en fonction de l'erreur instantanée.

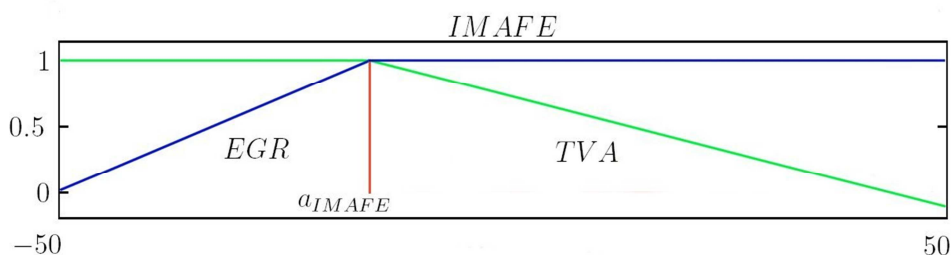


Fig. 40 : Choix de l'actionneur à contrôler

Deux zones de fonctionnement sont alors distinguées en fonction de la valeur d'IMAFE (figure 40) : lorsque la valeur de cette intégrale est inférieure au seuil négatif a_{IMAFE} , les corrections pour ajuster les grandeurs physiques sont apportées uniquement sur la vanne EGR. La classe EGR détermine une première valeur de positionnement pour la vanne EGR. Intuitivement, plus l'intégrale sera grande plus la vanne EGR sera fermée (le degré d'appartenance à la classe imageant le niveau d'ouverture). Selon le même principe, la classe TVA détermine une première valeur de positionnement pour le papillon motorisé.

Nous avons donc proposé d'utiliser l'intégrale du débit d'air pour différencier les deux zones de fonctionnement du moteur constatées au cours de l'étude expérimentale des stratégies actuelles, à savoir :

- Une première zone déterminée par les points de fonctionnement parcourus durant le cycle européen et dans laquelle la priorité est donnée à la gestion du débit d'air ;

- Une seconde zone regroupant tous les autres points et dans laquelle seule la pression de suralimentation est contrôlée.

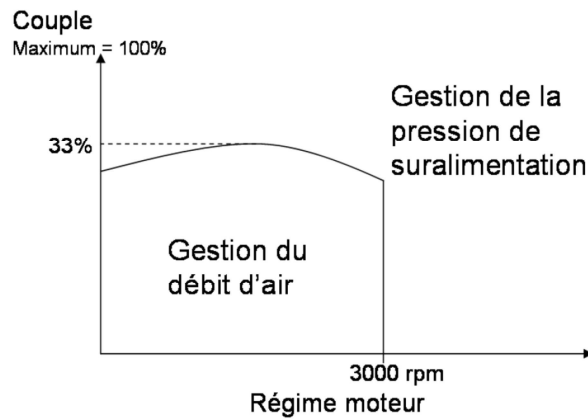


Fig. 41 : Modèle d'ordre plein sous Simulink

Le choix du contrôleur actif est déterminé par les points de fonctionnement parcourus durant un cycle européen. En effet, lorsque la régulation du débit d'air est active, le plus haut taux EGR est recherché. Alors que pour le reste de la zone de fonctionnement du moteur (donc la zone où la pression de suralimentation est régulée), il est considéré que la pression de suralimentation est le paramètre prépondérant.

Cette différence entre ces deux modes de fonctionnement (régulation du débit d'air avec de l'EGR et régulation de la pression de suralimentation sans EGR) doit être maintenue au moins du point de vue de l'utilisation (ou de la non-utilisation) de l'EGR. Seul le point de fonctionnement courant du moteur, déterminé par le couple quantité de carburant (ou couple) - régime moteur, permet de déterminer si il y a une recirculation de gaz d'échappement. Il faut donc avoir en entrée de notre contrôleur flou le régime moteur et la quantité de carburant injectée. Les classes associées à ces deux entrées doivent permettre de caractériser si le régime et la quantité de carburant injectée est faible ou élevé. Si le régime et la quantité de carburant sont faibles, alors on utilise la vanne EGR en cherchant à obtenir le plus haut taux d'EGR possible.

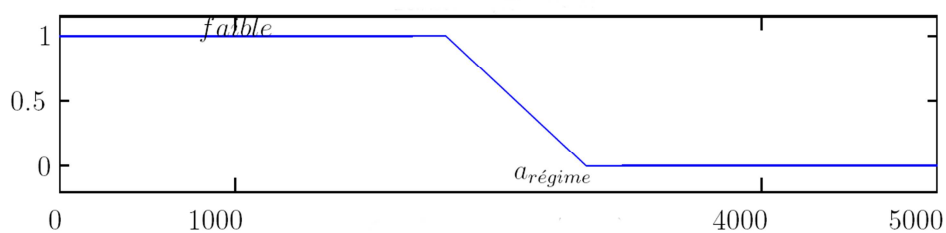


Fig. 42 : Fuzzyfication du régime moteur (tr/min)

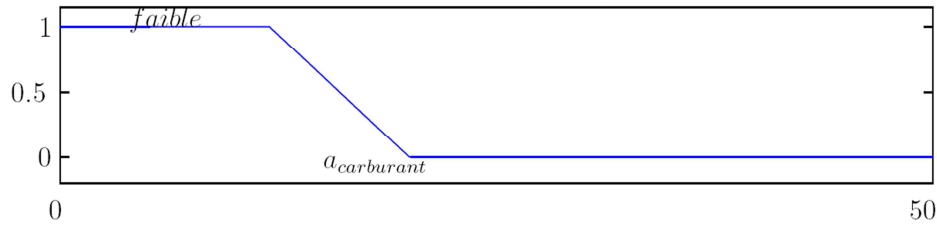


Fig. 43 : Fuzzyfication du débit de carburant (mg/coup)

2.2.6.2 Etablissement des règles d'inférences

Les règles d'inférences définissent la stratégie et le comportement du contrôleur. Les sorties du contrôleur flou sont :

- *VGT : la correction apportée sur le pré-positionnement du VGT*
- *EGR : le signal de commande de la vanne EGR*
- *TVA : le signal de commande du papillon motorisé*

Pour définir l'ensemble des règles, nous avons tout d'abord défini des règles d'action

- *SISO pour la gestion du VGT à partir de l'erreur sur la pression de suralimentation*
- *MIMO pour la gestion de la vanne EGR et du papillon motorisé à partir de l'erreur sur le débit d'air et de son intégrale*

Pression de suralimentation et VGT

La première série de règles vise est destinée à réguler la pression de suralimentation par action sur le VGT. L'objectif est d'obtenir un comportement similaire à celui du PID. Les règles SISO de gestion de la pression de suralimentation sont :

- *Si MAP est négative Alors VGT positif*
- *Si MAP est positive Alors VGT négatif*
- *Si MAP est nulle Alors VGT nul*

Débit d'air, vanne EGR et papillon

Dans cette section, l'objectif est de définir des règles d'inférences prenant en compte l'erreur sur le débit d'air, sa dérivée et son intégrale pour agir sur la vanne EGR et sur le papillon. Les deux premières règles permettent de positionner le capteur non-utilisé pour la régulation du débit d'air en fonction de la valeur de l'intégrale.

- *Si (IMAFE est zone-EGR) alors (TVA est ouvert)*
- *Si (IMAFE est zone-TVA) alors (EGR est ouvert)*

Lorsque IMAFE est en zone EGR, il faut définir comment agir sur la vanne EGR pour réguler le débit d'air, cela en fonction de l'erreur sur le débit d'air, de sa dérivée et de son intégrale. Ces règles sont regroupées en deux séries. La première série vise à fermer la vanne EGR en fonction du degré d'appartenance d'IMAFE à la classe EGR, la seconde série vise à ouvrir la vanne EGR en fonction du degré d'appartenance d'IMAFE au complément de la classe EGR (notée \overline{EGR}).

Dans la première série, une correction est apportée en fonction de l'erreur instantanée. Avec une erreur négative, cela signifie que le débit d'air est trop grand, donc il faut ouvrir la vanne EGR (ou diminuer la fermeture). La valeur utilisée est alors "fermée-25". La valeur "fermée" correspond à 100% de fermeture. En appliquant une correction de -25%, la vanne s'ouvre un peu. Ce comportement permet de diminuer rapidement l'erreur, le temps que la variable IMAFE évolue. Le contraire (un débit d'air insuffisant) entraîne le comportement inverse. La valeur de 25% a été choisie car elle permet d'agir de manière conséquente sur la vanne EGR sans pour autant être trop importante et peut-être faire osciller le système.

Lorsque l'erreur est faible, donc une forte appartenance de l'entrée MAF à la classe "nulle", c'est non plus l'erreur instantanée qui est utilisée mais sa dérivée. L'utilisation de la dérivée nous prémunit de l'apparition d'éventuelles oscillations. La valeur de 10% a été choisie pour avoir une valeur ayant un impact sur le système, mais seulement un faible impact en termes de variation de consigne pour l'actionneur.

La seconde série de règles définit le comportement complémentaire à celui énoncé précédemment dans la mesure où au lieu de fermer la vanne EGR, il s'agit des règles destinées à ouvrir la vanne EGR :

- *Si (MAF est négatif) et (IMAFE est EGR) Alors (EGR est fermé-25)*
- *Si (MAF est nulle) et (IMAFE est EGR) et (DMAFE est positif) Alors (EGR est fermé+10)*
- *Si (MAF est nulle) et (IMAFE est EGR) et (DMAFE est négatif) Alors (EGR est fermé-10)*
- *Si (MAF est positif) et (IMAFE est EGR) Alors (EGR est fermé+25)*
- *Si (MAF est nulle) et (IMAFE est \overline{EGR}) et (DMAFE est positif) Alors (EGR est ouvert+10)*
- *Si (MAF est négatif) et (IMAFE est \overline{EGR}) Alors (EGR est ouvert-25)*
- *Si (MAF est positif) et (IMAFE est \overline{EGR}) Alors (EGR est ouvert+25)*
- *Si (MAF est nulle) et (IMAFE est \overline{EGR}) et (DMAFE est négatif) Alors (EGR est ouvert-10)*

Après avoir établi les règles pour la vanne EGR lorsque la variable IMAFE est en zone EGR, il faut définir les règles pour le papillon motorisé lorsqu'IMAFE est en zone TVA. Les règles sont les mêmes que précédemment mais appliquées à la sortie TVA :

- *Si (MAF est négatif) et (IMAFE est TVA) Alors (TVA est ouvert-25)*
- *Si (MAF est nulle) et (IMAFE est TVA) et (DMAFE est négatif) Alors (TVA est ouvert-10)*
- *Si (MAF est nulle) et (IMAFE est TVA) et (DMAFE est positif) Alors (TVA est ouvert+10)*
- *Si (MAF est positif) et (IMAFE est TVA) Alors (TVA est ouvert+25)*
- *Si (MAF est négatif) et (IMAFE est \overline{TVA}) Alors (TVA est fermé-25)*
- *Si (MAF est nulle) et (IMAFE est \overline{TVA}) et (DMAFE est négatif) Alors (TVA est fermé-10)*
- *Si (MAF est nulle) et (IMAFE est \overline{TVA}) et (DMAFE est positif) Alors (TVA est fermé+10)*
- *Si (MAF est positif) et (IMAFE est \overline{TVA}) Alors (TVA est fermé+25)*

Lors de brusques variations de consigne de débit d'air, les actions de correction menées sur la vanne EGR et le papillon sont limitées pour diminuer le temps de montée. En effet, le VGT ne délivrant pas plus d'air, il faut attendre une stabilisation de la pression avant que celle-ci n'arrive. Il est donc proposé d'agir sur le VGT pour réduire le temps de montée du débit d'air cela uniquement à faible charge et faible régime. En effet, à régime plus élevé et/ou charge plus élevée, la pression de suralimentation devient plus pré-pondérante et donc il nous semble plus judicieux de ne pas agir sur le VGT pour agir sur le débit d'air. Pour augmenter le débit d'air qui traverse le compresseur, il faut fermer le VGT. Inversement, pour diminuer le débit d'air frais traversant le compresseur, il faut légèrement ouvrir les ailettes de la turbine.

Lorsque l'erreur sur le débit d'air est nulle, une correction est apportée. Cette correction a une action contraire aux règles précédentes. En effet dans les règles pour réguler le débit d'air, lorsque le débit d'air, lorsque ce dernier est nul et que sa dérivée est positive, suivant la zone de fonctionnement,

- le papillon est légèrement refermé
- la vanne EGR est légèrement ouverte

Ici lorsque la dérivée est positive, les ailettes de la turbine sont placées dans une position augmentant légèrement le débit d'air. Cette action est destinée à casser le couplage qui pourrait s'installer lors de la régulation simultanée des deux grandeurs.

- *Si (MAF est positif) et (Régime est faible) et (Carburant est faible) Alors (VGT est positif)*
- *Si (MAF est négatif) et (Régime est faible) et (Carburant est faible) Alors (VGT est négatif)*

- Si (MAF est nulle) et (DMAFE est négatif) et (Régime est faible) et (Carburant est faible) Alors (VGT est négatif/2)
- Si (MAF est nulle) et (DMAFE est positif) et (Régime est faible) et (Carburant est faible) Alors (VGT est positif/2)

2.2.6.3 Défuzzification

La défuzzification est le passage entre les degrés d'appartenance à différentes classes pour chaque sortie à des valeurs numériques. Pour prendre en compte l'ensemble de l'influence des règles, la méthode utilisée est le centre de gravité. Cette méthode présente l'avantage de prendre en compte le degré d'appartenance à chaque règle (contrairement par exemple à la méthode des milieux des maxima). L'ensemble des classes de sortie est présenté figure 44.

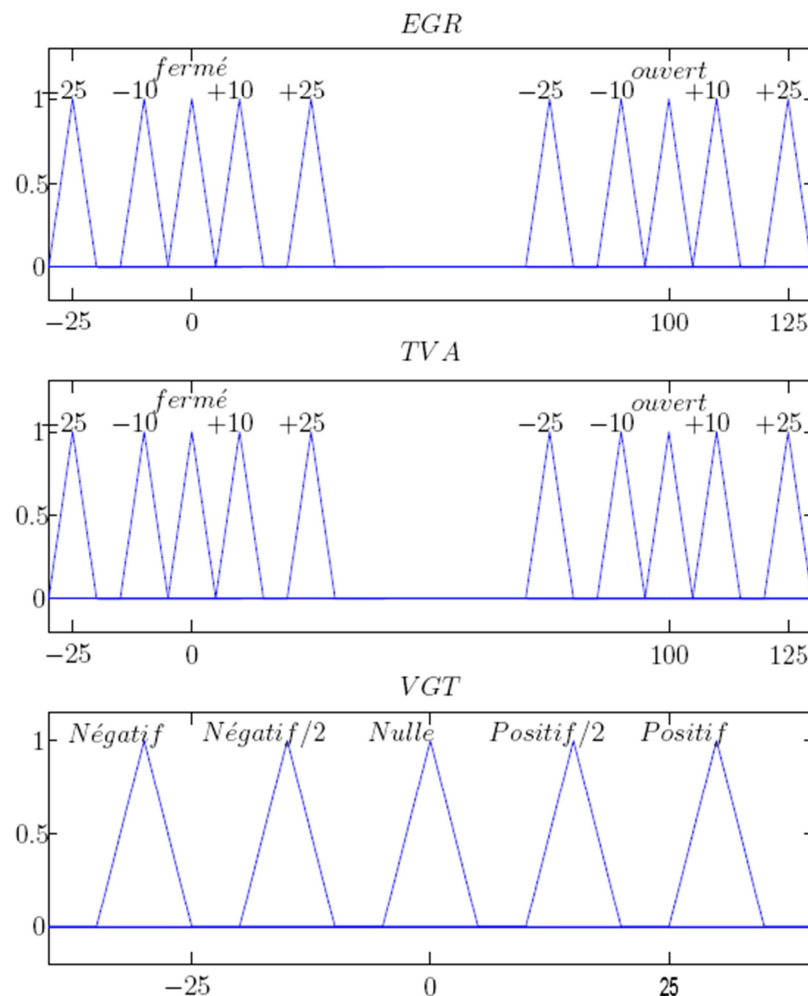


Fig. 44 : Defuzzification des sorties du contrôleur

2.2.6.4 Résultats obtenus

Le synoptique du contrôleur proposé est représenté figure 45.

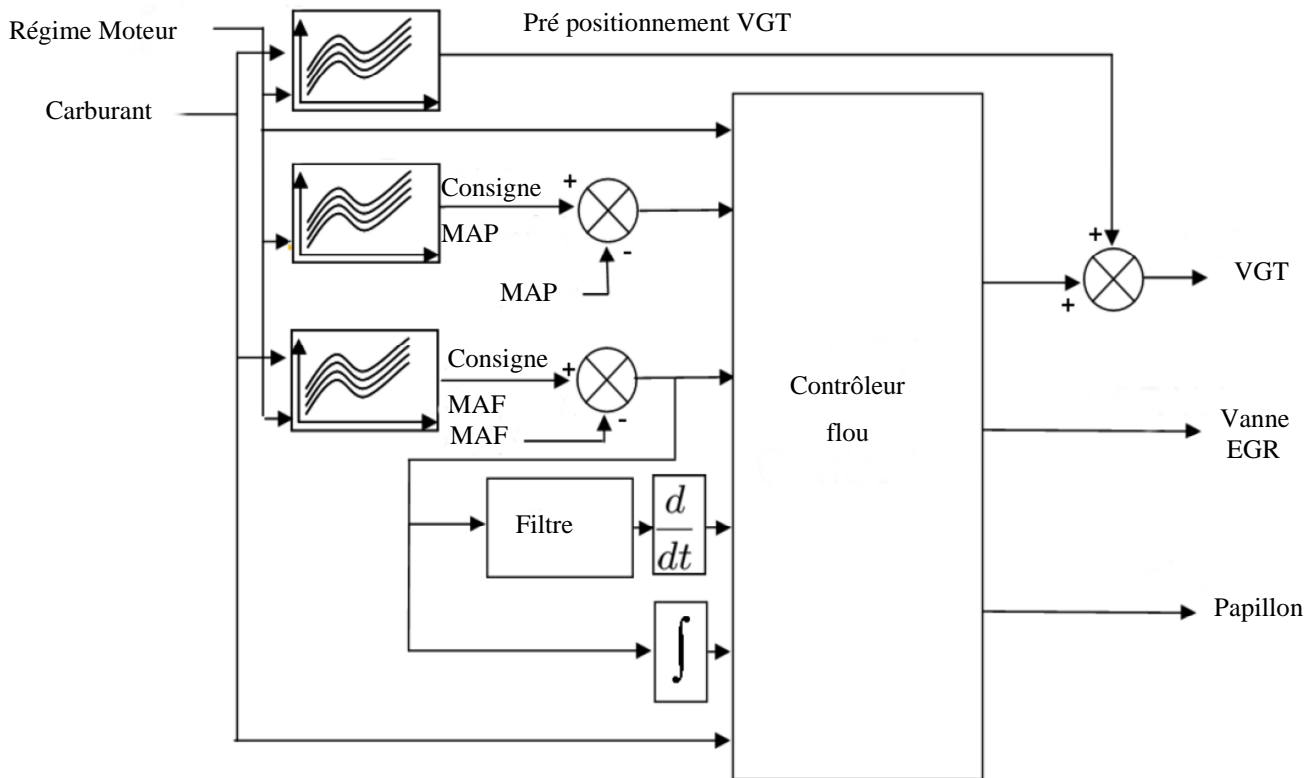


Fig. 45 : Synoptique du contrôleur flou proposé

Afin de comparer les performances de notre contrôleur flou à celles du contrôleur à double PID actuellement utilisé dans l'industrie automobile, nous avons considéré le cycle de test des normes EURO comme trajectoire de référence pour la vitesse du véhicule. Cette trajectoire de vitesse du véhicule se traduit en une trajectoire de régime moteur et donc finalement en une trajectoire de consignes pour le débit d'air frais et pour la pression de suralimentation. Pour des raisons de confidentialité, ces deux dernières trajectoires ne peuvent être présentées dans ce mémoire. Les figures 46, 47 et 48 représentent les résultats de simulation obtenus pour les montées à 15 puis 30 et 50 km/h.

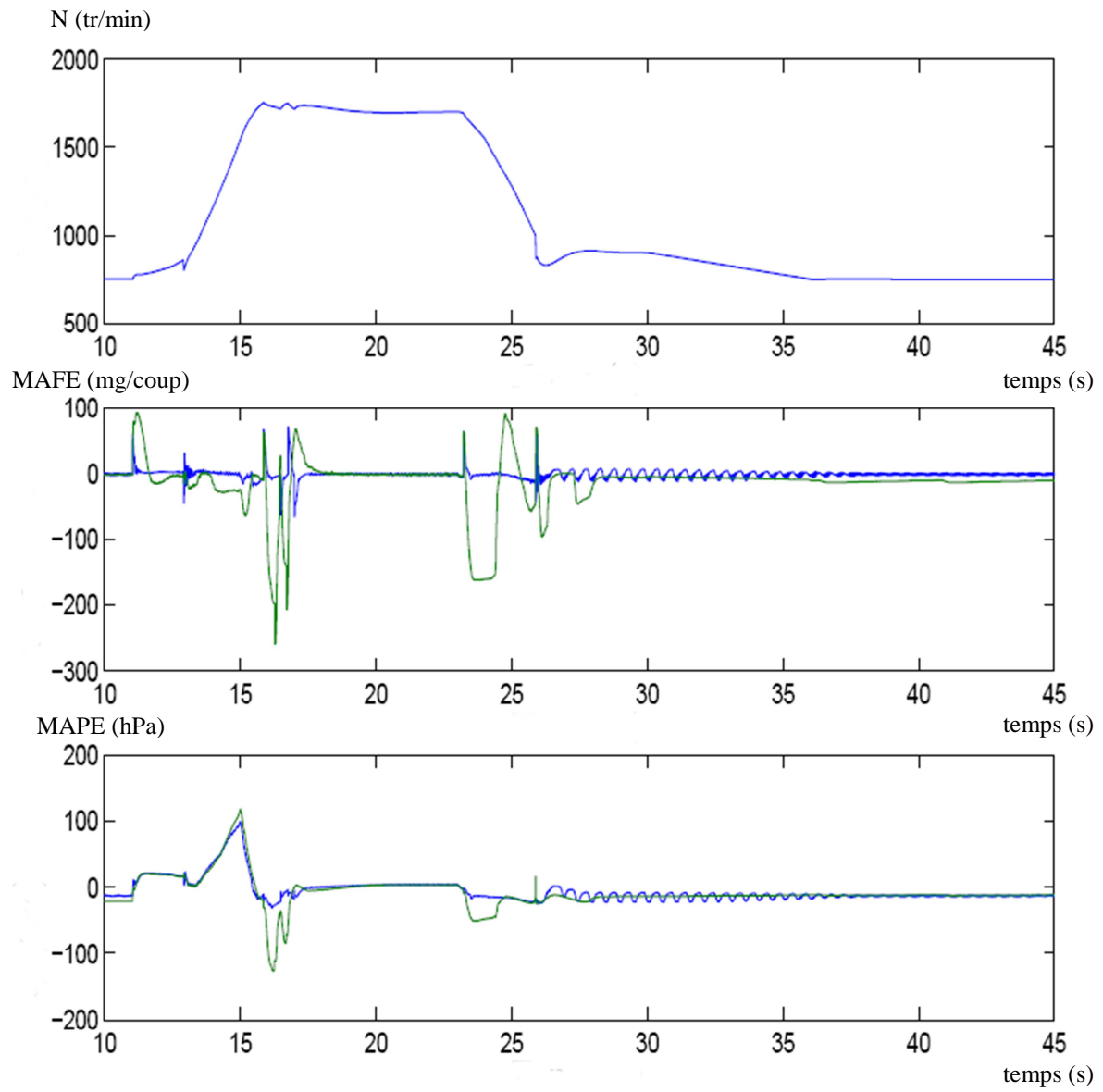
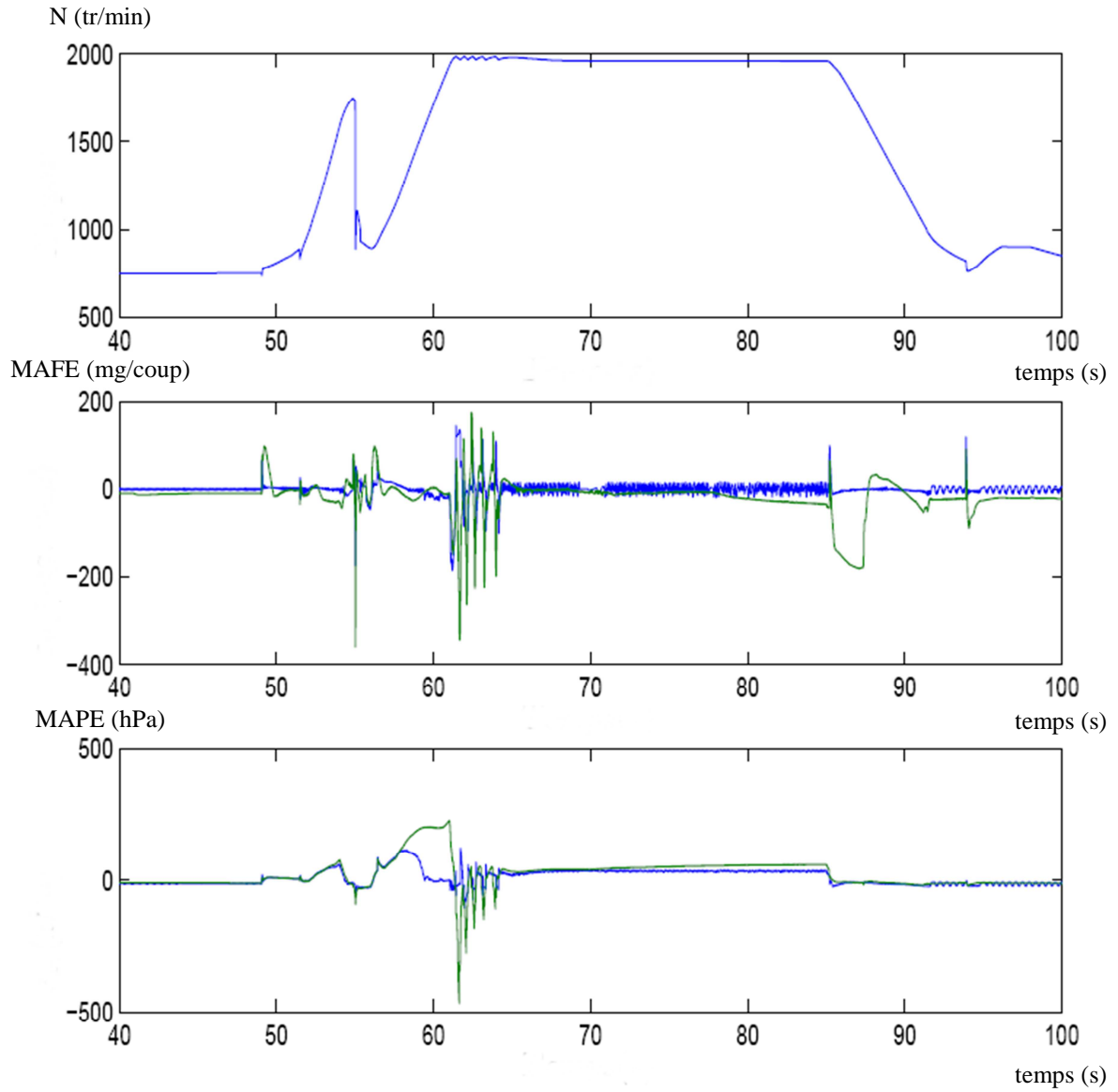
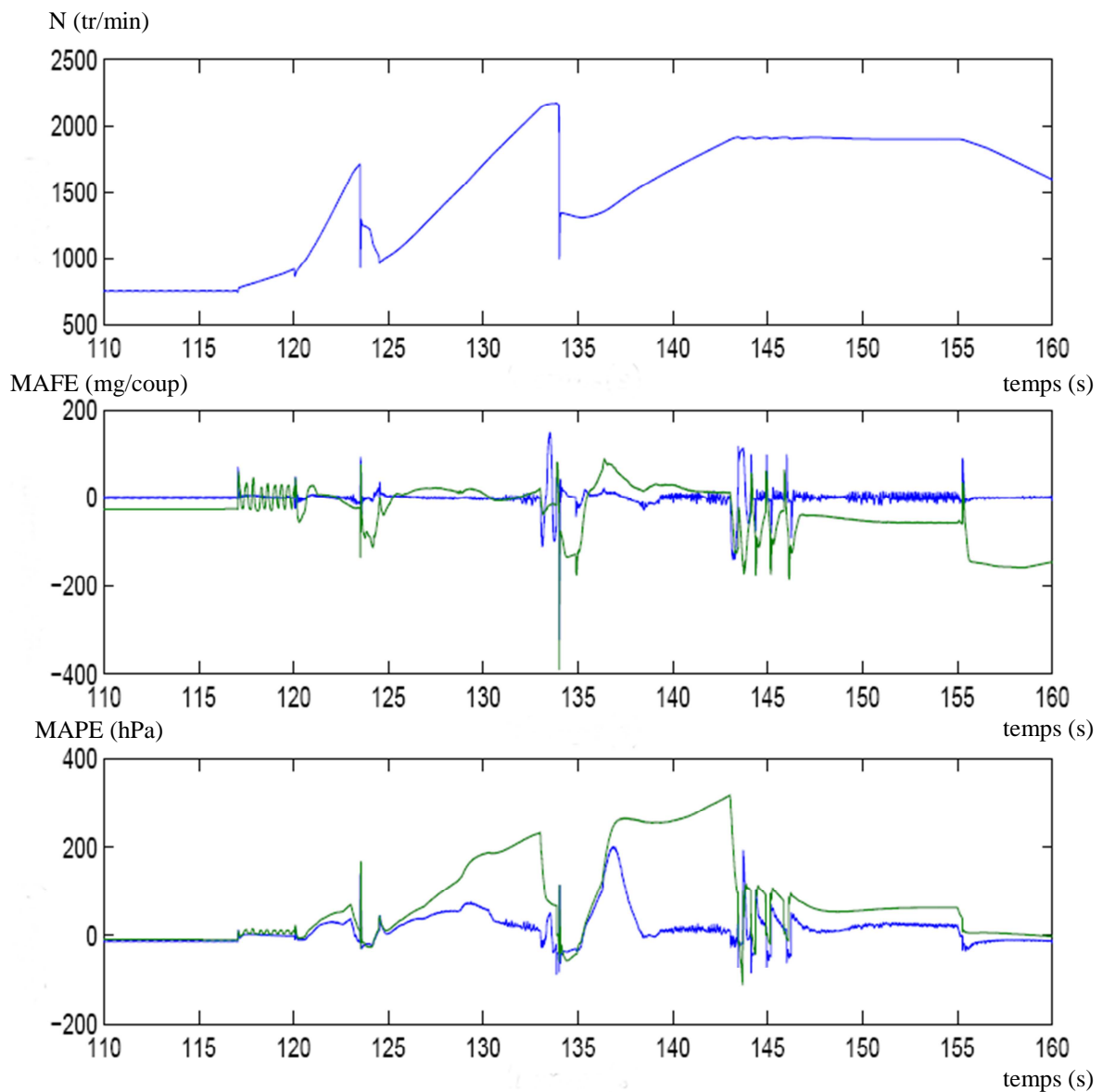


Fig. 46 : Résultats de simulation pour la montée à 15 km/h
 Bleu : contrôleur flou
 Vert : contrôleur à double PID



*Fig. 47 : Résultats de simulation pour la montée à 30 km/h
 Bleu : contrôleur flou
 Vert : contrôleur à double PID*



*Fig. 48 : Résultats de simulation pour la montée à 50 km/h
 Bleu : contrôleur flou
 Vert : contrôleur à double PID*

2.2.6.5 Conclusion

Afin de prendre en compte le couplage existant entre débit d'air frais et pression de suralimentation, une approche à base de logique floue a été étudiée. A la différence des nombreux travaux publiés dans la littérature, le contrôleur flou proposé s'accommode des seules mesures disponibles sur un moteur Diesel fabriqué en grande série et permet de piloter la vanne EGR, le VGT et le papillon motorisé.

L'approche retenue à base de logique floue présente deux intérêts majeurs : d'une part, elle dispense d'un modèle interne du système considéré et permet donc d'éviter les problèmes liés à l'estimation des paramètres du moteur. D'autre part, la définition telle qu'elle a été proposée des classes d'entrée et de sortie facilite le réglage de ce contrôleur par comparaison avec les solutions actuelles basées essentiellement sur des structures à base de PID réglés empiriquement. Les résultats de simulation obtenus sur un modèle validé expérimentalement montrent que les objectifs visés initialement sont atteints.

Au cours de ces travaux, nous avons également testé et constaté en simulation que le contrôleur proposé est suffisamment robuste vis-à-vis des variations paramétriques les plus fréquemment rencontrées sur un moteur diesel produit en grande série. Enfin, des tests effectués sur le simulateur électronique de banc d'essais moteur ont montré la capacité du contrôleur à fonctionner en temps réel sans dégradation de ses performances en termes de poursuite de trajectoires.

Troisième partie :
Transfert vers l'industrie

Soucieuse de répondre aux attentes des industriels, l'équipe à laquelle j'appartiens consacre également une partie de ses activités au transfert de méthodes et d'outils issus de la théorie de l'automatique. Ces transferts se traduisent essentiellement par des contrats de R&D effectués pour le compte de grands groupes. A ce titre, je participe à la rédaction des propositions techniques et financières et à la réalisation de certains de ces contrats.

3.1 Contrat sur la validation de données

Titre

Etude d'une fonction de validation de mesures dans une boucle de régulation

Contexte et objectifs

Au cours du second trimestre de 2002, Ghaleb HOBLOS, Houcine CHAFOUK et moi-même avons réalisé un contrat de R&D pour le compte de SNECMA Moteurs, en collaboration avec le Professeur José RAGOT du CRAN. Cette étude a été effectuée dans le contexte de la fiabilité et de la sûreté de fonctionnement du moteur fusée VULCAIN. Plus précisément, il s'agissait de concevoir une fonction chargée d'observer en permanence le comportement de ce moteur fusée et de valider les mesures transmises à l'algorithme de régulation ou de prévenir ce dernier si aucune valeur validée ne pouvait être transmise. Plus précisément, cette fonction devait être capable :

- de détecter une anomalie sur une ou plusieurs mesures physiques,
- de localiser le capteur défaillant parmi ceux chargés de la mesure d'une même grandeur fonctionnelle,
- d'émettre une alerte en cas d'impossibilité de reconstruction, soit vers la loi de commande, soit vers le logiciel de niveau supérieur, soit vers les deux.

Déroulement du travail effectué

Les travaux ont débuté par une étude bibliographique traitant du thème de la détection de défauts suivant une approche basée sur la théorie de l'espace de parité. Sur la base de la redondance matérielle des signaux d'entrées et de sortie du système à surveiller, cette théorie a permis de générer le nombre maximal de résidus. L'étude analytique de ces résidus a permis

d'établir une signature spécifique à chacun des défauts potentiels et ainsi de déterminer sur quel sous-système est intervenu le défaut.

Dans un second temps, les résidus ont été analysés suivant l'approche statistique. En effet, en absence de défaut, ces résidus sont nuls ou quasi-nuls. L'apparition d'un défaut se traduit par une augmentation significative de la valeur de ces résidus. Les sauts de moyenne et de variance de ces résidus ont constitué une approche d'analyse parfaitement exploitable dans le cadre de cette étude. La méthodologie proposée a été traduite sous MATLAB en un prototype logiciel compatible avec les fichiers de mesures fournis par SNECMA Moteurs. Après une phase de paramétrage (ajustement de seuils, ...) à l'aide d'un premier jeu de fichiers de mesures, ce logiciel a été validé à partir à l'ensemble des jeux de mesures issus d'essais d'un même moteur VULCAIN.

Références bibliographiques

Voir en Quatrième Partie.

3.2 Contrat sur la détection de défauts

Titre

Etude de méthodes de diagnostic pour la détection des ratés de combustion

Contexte et objectifs

Entre octobre 2003 et mars 2004, j'ai réalisé deux contrats de R&D pour le compte du groupe PSA Peugeot-Citroën. Cette étude a été effectuée dans un cadre bien précis : depuis le 1^{er} janvier 2000, date d'application de la législation EURO 3 concernant les émissions des véhicules automobile, tous les véhicules particuliers et utilitaires légers homologués doivent être équipés d'un système de diagnostic embarqué (On Board Diagnosis ou OBD). Le système OBD est chargé de détecter une augmentation de l'émission des polluants réglementés et d'en identifier la cause. Parmi les fonctions remplies par ce système, la détection des ratés de combustion consiste à alerter le conducteur lorsque :

- un nombre important de ratés risque d'entraîner une augmentation importante des émissions d'hydrocarbures imbrûlés,
- un taux de ratés important risque d'endommager le catalyseur.

Non satisfaits des méthodes actuellement implémentées dans ses calculateurs, des ingénieurs du groupe PSA Peugeot-Citroën nous ont demandé de proposer une liste de méthodes

"ouvertes" capables de détecter des ratés de combustion, de les tester puis de réaliser la maquette logicielle d'une de ces méthodes.

Déroulement du travail effectué

J'ai débuté ces travaux par une étude bibliographique traitant de la détection des ratés de combustion à partir d'une des grandeurs caractéristiques du fonctionnement d'un moteur : le couple produit à chaque combustion.

Suite à cette étude préliminaire, j'ai proposé différentes méthodes de diagnostic pouvant être appliquées mais non listées ici pour des raisons de confidentialité. Les points communs entre toutes ces méthodes étaient les suivants : utilisation du même modèle mécanique, des mêmes données de mesure, des mêmes caractéristiques de bruit de mesure. Ces méthodes de diagnostic ont été comparées en précisant leurs avantages et leurs inconvénients. Sur la base de critères de sélection imposés par le groupe PSA Peugeot-Citroën, une méthode a été retenue. Celle-ci a été testée avec succès sous MATLAB à partir de fichiers de données pour différents cas de figures (régime, rapport de boîte et charge appliquée au moteur).

La seconde partie de cette étude a porté sur la réalisation du fichier SIMULINK de cette méthode. La contrainte la plus forte à respecter a été l'utilisation exclusive des blocs les plus élémentaires de SIMULINK (gain, retard, comparateur, ...) afin de faciliter la compilation du code et son implémentation dans un calculateur embarqué. Cette seconde phase s'est clôturée par la remise aux ingénieurs du groupe PSA Peugeot-Citroën d'une maquette logicielle répondant au cahier des charges.

Références bibliographiques

Aucune en raison d'une clause de confidentialité des travaux

3.3 Contrat sur l'analyse de la stabilité

Titre

Méthode d'analyse de la stabilité des systèmes

Contexte et objectifs

D'octobre 2004 à décembre 2004, Ghaleb HOBLOS, Houcine CHAFOUK et moi-même avons réalisé un contrat de R&D pour le compte de SNECMA Moteurs. Cette étude a consisté à élaborer un mémoire technique présentant les méthodologies générales d'analyse de stabilité

des systèmes et leur mise en oeuvre sur un système quelconque (bancs d'essais, moteur, sous-systèmes, asservissement, ...) de SNECMA Moteurs.

Le problème de la stabilité est, en effet, un problème crucial dans l'étude des systèmes quelle que soit leur complexité. Il pose la question de savoir si la sortie du système considéré converge vers une valeur désirée (la consigne) ou si elle est susceptible d'osciller voire même de diverger. Ce problème est d'autant plus délicat à traiter que cette sortie dépend non seulement de la consigne mais également des perturbations externes pouvant agir sur le système étudié. Il convient donc de considérer la stabilité comme la première des contraintes à prendre en compte.

Déroulement du travail effectué

Nous avons débuté ce transfert de méthodologie d'étude par une introduction pédagogique des fondamentaux sur la stabilité des systèmes industriels. Il s'agissait dans un premier temps de bien définir la problématique de la stabilité du point de vue théorique. Cette étape permis de bien dégager les différentes définitions utiles et nécessaires en automatique afin d'aborder la notion de stabilité des systèmes. Les notions fondamentales et les outils considérés comme essentiels pour la représentation et l'analyse ont ainsi pu être rappelés. Différents critères pour juger de la stabilité des systèmes (linéaires ou non) ont ensuite été exposés ainsi que leurs conditions d'application.

Dans un second temps, des différentes techniques adoptées par SNECMA Moteurs pour répondre à la problématique posée ont été recensées et analysées afin proposer une méthodologie générale d'analyse de stabilité. Nous avons accompagné cette méthodologie d'une description détaillée des outils à utiliser afin de mettre en oeuvre les différentes phases d'analyse.

La dernière phase de cette étude a consisté à valider la méthodologie proposée en l'appliquant à des systèmes ou sous-systèmes SNECMA Moteurs pour lesquels des modèles mathématiques étaient disponibles et pour lesquels une liste exhaustive des spécificités propres était fournie.

Références bibliographiques

Aucune en raison d'une clause de confidentialité des travaux

Quatrième partie :

Références

4.1 Références personnelles

4.1.1 Revues internationales

- [RI01] HOBLOS G., CHAFOUK H., LANGLOIS N., Fault tolerance with respect to sensor failures using Kalman filter bank, International Journal of AMSE, p. 64-71, 2003.
- [RI02] ARNOLD J. F., LANGLOIS N., CHAFOUK H., PAQUET T., Diesel engine air system model for control, International Journal of AMSE, p. 109-118, 2005.
- [RI03] AYADI M., LANGLOIS N., CHAFOUK H., Flatness-based robust adaptive polynomial controller for a Diesel engine model, Transactions on Systems, Signals and Devices, vol. 2, n°1, , vol. 2, n°1, p. 71-90, 2007.
- [RI04] CHAFOUK H., HOBLOS G., LANGLOIS N., LE GONIDEC S., RAGOT J., Soft Computing Algorithm to Data Validation in Aerospace Systems using Parity Space Approach, J. of Aerospace Engineering, vol. 20, n°3, p. 165-171, 2007.
- [RI05] CHAFOUK H., HOBLOS G., LANGLOIS N., LE GONIDEC S., RAGOT J., Soft Computing Approach for Data Validation, Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication, vol. 4, n°1, p. 628-635, 2007.
- [RI06] ARNOLD J. F., LANGLOIS N., CHAFOUK H., TREMOULIERE G., Fuzzy control of a turbocharged Diesel engine, International Journal of Modelling, Identification and Control: Special Issue on Advanced Control Systems in Automotive Applications, vol. 3, n° 3, p. 297-304, 2008.
- [RI07] ARNOLD J. F., LANGLOIS N., CHAFOUK H., Fuzzy controller of the air system of a diesel engine: real-time simulation, European Journal on Operational Research, vol. 193, n° 1, p. 282-288, à paraître en 2009.
- [RI08] NAGOUDI LAYERLE K., LANGLOIS N., CHAFOUK H., Unconstrained state-space predictive controllers for non-minimum phase MIMO systems, accepté pour publication dans International Journal on Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering IJSTA, Juin 2008.

4.1.2 Communications invitées dans des conférences internationales

- [CI01] ARNOLD J. F., LANGLOIS N., CHAFOUK H., TREMOULIERE G., Contrôleur flou pour circuit d'air de moteur diesel, CIFA 2006, Bordeaux, France, 30 mai – 1 juin, 2006.

[CI02] ARNOLD J. F., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., TREMOULIERE G., Real-time simulation of a fuzzy controller for diesel engine, International Conference on Systems and Control CSC'07, Marrakech, Morocco, May 16-18, 2007.

4.1.3 Communications dans des conférences internationales IFAC

[CI03] HOBLOS G., CHAFOUK H., **LANGLOIS N.**, RAGOT J., Data validation of instrumentation system using parity space approach, 10th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems , Tokyo, Japan, August 4-6, 2003.

[CI04] ARNOLD J. F., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., TREMOULIERE G., Fuzzy controller of the air system of a diesel engine, IFAC INCOM'06, Saint Etienne, France, May 17-19, 2006.

[CI05] DABO M., **LANGLOIS N.**, RESPONDEK W., CHAFOUK H., NCGPC with dynamic extension applied to a Turbocharged Diesel Engine, IFAC World Congress WC'08, Seoul, Korea, July 6-11, 2008.

4.1.4 Communications dans des conférences internationales IEEE

[CI06] HOBLOS G., CHAFOUK H., **LANGLOIS N.**, An Efficient Algorithm for Intelligent Instrumentation System, IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE'04, Ajaccio, France, May 4-7, 2004.

[CI07] AYADI M., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., Polynomial control of nonlinear turbocharged diesel engine model, IEEE International Conference on Industrial Technology ICIT'04, Hammamet, Tunisia, December 8-10, 2004.

[CI08] AYADI M., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., Robust Adaptive Polynomial Controller Based on Flatness, IEEE International Conference on Systems, Signals & Devices SSD'05, Tunis, Tunisia, March 21-24, 2005.

[CI09] ARNOLD J. F., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., TREMOULIERE G., Control of the air system of a diesel engine: a fuzzy multivariable approach, IEEE Conference on Control Applications CCA'07, München, Germany, October 4-6, 2006.

[CI10] PLIANOS A., ACHIR A., **LANGLOIS N.**, STOBART R. K., , CHAFOUK H., Dynamic feedback linearization based control synthesis of the Turbocharged Diesel Engine, IEEE American Control Conference ACC'07, New York, USA, July 11-13, 2007.

[CI11] M. DABO M., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK C., Unconstrained NCGPC and Asymptotic Tracking applied to the Tracking Problem for a Turbocharged Diesel

Engine: a Comparative Study, IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, Ajaccio, France, June 25-27, 2008

4.1.5 Conférences internationales avec actes

- [CI12] CHAFOUK, H., **LANGLOIS, N.**, A fault diagnosis method using a neural network approach, AMSE CSS'01, Rabat, Morocco, pp. 195-201, March 19-21, 2001.
- [CI13] GRONDIN O. **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., Diagnosis of misfires in internal combustion engine by analysis of released heat quantity, AMSE MS'2002, Girona, Spain, June 25-27, 2002.
- [CI14] HOBLOS G., CHAFOUK H., **LANGLOIS N.**, Fault tolerance with respect to sensor failures using Kalman filter bank, AMSE MCMS'03, Reggio Calabria, June 25-27, 2003.
- [CI15] ARNOLD J. F., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., PAQUET T., Diesel engine air system model for control, AMSE MS'05, Rouen, France, July 6-8, 2005.
- [CI16] LECLERC F., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., Study of FTC methods applied to an industrial process, AMSE MS'05, Rouen, France, July 6-8, 2005.
- [CI17] ARNOLD J. F., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., The Evolution Required in Standard Cars for the Use of New EGR-VGT Control Strategies, ASME IMECE 2005, Orlando, USA, November 5-11, 2005.
- [CI18] ARNOLD J. F., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., TREMOULIERE G., Fuzzy controller without feed-forward for the air system of a diesel engine, ASME ICES'06, Aachen, Germany, May 8-10, 2006.
- [CI19] ARNOLD J. F., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., TREMOULIERE G., Fuzzy controller for the air system of a Diesel Engine, IFP E-COSM congress, Rueil-Malmaison, France, October 2-3, 2006.
- [CI20] ACHIR A. **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., PLIANOS A., STOBART R. K., Diesel engine control based on dynamic feedback linearization, 3rd International Conference on Advances in Vehicle Control and Safety AVCS'07, Buenos Aires, Argentina, February 8-10, 2007.
- [CI21] NAGOUDI LAYERLE K., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., Synthèse de contrôleurs prédictifs à base d'état pour la commande des systèmes MIMO discrets à non-minimum de phase, 8th international conference on STA, Sousse, Tunisia, November 05-07, 2007.

- [CI22] PLIANOS A., ACHIR A., **LANGLOIS N.**, STOBART R. K., CHAFOUK H., , Optimal nonlinear control of a Diesel Engine Air-path system using VGT/EGR actuation, IEEE European Control Conference ECC'07, Kos, Greece, July 2-5, 2007.
- [CI23] DABO M., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK C., Asymptotic Tracking applied to the Tracking Problem for a Turbocharged Diesel Engine, UKACC'08, Manchester, UK, September 2-4, 2008
- [CI24] NAGOUDI LAYERLE K., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., Design of Reconfigurable Predictive Control Applied on the Air Path of a Diesel Engine, UKACC'08, Manchester, UK, September 2-4, 2008
- [CI25] NAGOUDI LAYERLE K., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., Commande prédictive à base d'état: implémentation sur le circuit d'air du moteur Diesel, CIFA 2008, Bucarest, Roumanie, Septembre 3-5, 2008
- [CI26] DABO M., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK C., NCGPC sans contraintes et Placement de pôles avec extension dynamique: une étude comparative appliquée au moteur diesel, CIFA 2008, Bucarest, Roumanie, Septembre 3-5, 2008

4.1.6 Conférences nationales avec actes

- [CN01] AYADI M., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., Commande prédictive généralisée basée sur la platitude : application à un modèle de moteur diesel, Journées Automatique Automobile, Bordeaux, 5-6 novembre 2003.
- [CN02] AYADI M., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., Commande avancée d'un moteur diesel turbocompressé, AAAF Convergence'03, Paris, 1-3 décembre 2003.
- [CN03] GRONDIN O., MAQUET J., CHAFOUK H., **LANGLOIS N.**, Modélisation du moteur diesel pour la commande : bilan et orientations futures. Congrès International SIA « Le moteur Diesel : Aujourd'hui et Demain », Ecole Centrale de Lyon, 12-13 mai 2004.

4.1.7 Ouvrages collectifs de recherche

- [OU01] HOBLOS G., CHAFOUK H., **LANGLOIS N.**, RAGOT J., Validation des données d'un système d'instrumentation, Instrumentation, aspects fondamentaux 04, 01-2004, 402 p., Lavoisier 2000-2005.

4.1.8 Rapports de fin de contrats industriels

- [RC01] HOBLOS G., CHAFOUK H., **LANGLOIS N.**, RAGOT R., Etude d'une fonction de validation automatique de mesures dans une boucle de régulation. Rapport de fin de contrat IRSEEM, IRSEEM-CRAN, SNECMA Moteurs, n° E841, 2002.
- [RC02] **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., Etude de méthodes pour la détection d'anomalies fonctionnelles du GMP, Rapport de fin de contrat IRSEEM, PSA, 2002.
- [RC03] **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., Implémentation d'une méthode pour la détection temps réel d'anomalies fonctionnelles du GMP, Rapport de fin de contrat IRSEEM, PSA, 2003.
- [RC04] **LANGLOIS N.**, HOBLOS G., CHAFOUK H., Méthodologie d'analyse de la stabilité des systèmes. Rapport de fin de contrat IRSEEM, SNECMA Moteurs, 2004.

4.1.9 Rapports de Master Recherche

- [RM01] LECLERC F., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., Etude de méthodes d'accommodation aux fautes, Rapport de DEA ATS, SUPELEC, septembre 2004.
- [RM02] DUBOIS R., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., Transmission et commande floue d'un modèle de moteur à allumage par compression, Rapport de Master Recherche 2 IGIS, Univ. Rouen, Septembre 2005.
- [RM03] RIEDINGER D., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., Commande tolérante aux fautes avec application à un actionneur de moteur Diesel, Rapport de Master Recherche 2 IGIS, Univ. Rouen, Septembre 2006.
- [RM04] FAGNEN M., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., Contribution à l'élaboration d'un observateur flou adaptatif, Rapport de Master Recherche 2 IGIS, Univ. Rouen, Septembre 2007.
- [RM05] MAMBOUNDOU J., **LANGLOIS N.**, CHAFOUK H., Contribution à l'élaboration d'une stratégie de commande prédictive intégrant la notion de tolérance aux fautes, Rapport de Master Recherche 2 IGIS, Univ. Rouen, Septembre 2008.

4.2 Références bibliographiques

- [Charlet 89] B. Charlet, J. Lévine, and R. Marino. On dynamic feedback linearisation. *Systems and Control Letters*, 13:143–151, 1989.
- [Charlet 91] B. Charlet, J. Lévine, and R. Marino. Sufficient conditions for dynamic state feedback linearisation. *SIAM Journal On Control and Optimization*, 29:38–57, 1991.
- [Chen 99] W.-H. Chen, D. J. Ballance, P. J. Gawthrop. Analytic approach to generalised predictive control of nonlinear systems, *IEEE Workshop on Model predictive Control: Techniques and Applications*, London, UK, 1999.
- [Elshafei 91] A. L. Elshafei, G. Dumont, and A. Elnaggar, Perturbation analysis of gpc with one-step control horizon, *Automatica (Journal of IFAC)*, vol. 27, pp. 725–728, 1991.
- [Fliess 95] M. Fliess, J. Levine, P. Martin, and P. Rouchon. Flatness and defect of nonlinear systems: Introductory theory and applications. *International Journal of Control*, 61(6):1327-1361, 1995.
- [Gawthrop 00] P. J. Gawthrop, “Linear predictive pole placement control : practical issues,” *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 1, pp. 160–165, 2000.
- [Isidori 95] A. Isidori. *Nonlinear control systems*, 3rd edn., Springer Verlag, New York, USA, 1995.
- [Jankovic 99] M. Jankovic, M. Larsen, and P. V. Kokotovic. Master/slave passivity design for stabilization of nonlinear systems. *Proceedings of the 18th American Control Conference*, San Diego, 769-773, 1999.
- [Jankovic 00] M. Jankovic, M. Jankovic, and I. Kolmanovsky. Constructive Lyapunov control design for turbocharged Diesel engines. *IEEE Transaction on Control System Technology*, 8(2):288-299, 2000.
- [Kokotovic 01] P. Kokotovic and M. Arcak. Constructive nonlinear control: a historical perspective. *Automatica*, 37:637-662, 2001.
- [Landau 98] I. Landau, R. Lozano, and M. M'Saad. *Adaptive control*. Springer-Verlag, London, 1998.
- [Larsen 98] M. Larsen and P. Kokotovic. Passivation design for a turbocharged diesel engine model. *IEEE Conference on Decision and Control*, Tampa, 1535-1540, 1998.

- [Larsen 03] M. Larsen, M. Jankovic, and P. Kokotovic. Coordinated passivation designs. *Automatica*, 39:335-341, 2003.
- [Maciejowski 02] J. M. Maciejowski, *Predictive control with constraints*. Prentice Hall, 2002.
- [Mayne 00] D. Q. Mayne, J. B. Rawlings, C. V. Rao, and P. O. M. Scokaert. predictive control: Stability and optimality. *Automatica*, 36 :789-814, 2000.
- [Noura 94] H. Noura, D. Sauter, and C. Aubrun. A fault detection and accommodation method applied to an inverted pendulum. *Control Applications, 1994.*, Proceedings of the Third IEEE Conference on, 2: 1397 – 1402, 1994.
- [Rotella 01] F. Rotella, F. Carrillo, and M. Ayadi. Digital flatness-based robust controller applied to a thermal process. *IEEE International Conference on Control Applications, Mexico*, 936-941, 2001.
- [Seron 95] M. Seron, D. Hill, and A. Fradkov. Nonlinear adaptive control of feedback passive systems. *Automatica*, 31(7):1053-1060, 1995.
- [Skrjanc 04] I. Skrjanc, S. Blazic, S. Oblak, and J. Richalet., An approach to predictive control of multivariable time-delayed plant: stability and design issues, *ISA Trans*, vol. 43, pp. 585–595, 2004
- [Wang 06] L. Wang and P. C. Young. An improved structure for model predictive control using non-minimal state space realisation, *Journal of process Control*, vol. 16, pp. 355–371, 2006.
- [Watanabe 91] K. Watanabe, K. Ikeda, T. Fukuda, and S. G. Tzafestas. Adaptive generalized predictive control using a state-space approach, *IEEE RSJ*, pp. 1609–1614, 1991.

Conclusion & Perspectives

5 Conclusion et perspectives

Depuis mon arrivée à l'ESIGELEC, en sus de mes activités d'enseignement, je pense avoir significativement contribué à l'émergence de l'équipe « Automatique & Systèmes » de l'IRSEEM dans le domaine du contrôle moteur en m'impliquant notamment dans l'encadrement de chercheurs, le montage et la réalisation de projets de recherche liés à cette thématique.

Les connaissances acquises au cours de la thèse portant sur la modélisation du moteur Diesel et les propos échangés avec les industriels de la filière Automobile m'ont permis de dégager des problématiques concrètes, sources d'inspiration pour des travaux plus théoriques dans le domaine de l'automatique mais dont les résultats se doivent, à terme, de répondre à ces problématiques.

Ainsi, je me suis penché avec les chercheurs de l'équipe « A&S » sur le problème de la poursuite de trajectoires de référence lorsque le système à contrôler est un système MIMO non linéaire à non minimum de phase en vue de réguler certaines grandeurs physiques du système d'air du moteur Diesel.

Pour ce faire, nous nous sommes intéressés à un modèle de moteur Diesel non linéaire à valeurs moyennes d'ordre 7 issu de la littérature. Nous avons considéré le modèle réduit non linéaire d'ordre 3 issu de ce modèle pour la synthèse de nos contrôleurs. Ces deux modèles ont été validés expérimentalement sur banc moteur dans le cadre d'un projet de recherche.

Nos premiers travaux se sont appuyés sur la platitude qui présente un point de vue intéressant en termes de suivi de trajectoires. L'étude du modèle non linéaire d'ordre réduit nous a montré cependant que ce dernier n'était pas plat. Nous avons donc exploité la platitude dans le cas linéaire pour synthétiser un contrôleur adaptatif mis sous la forme RST. Ce contrôleur a été testé avec succès en simulation sur le modèle non linéaire d'ordre plein. La synthèse de ce contrôleur présentait cependant l'inconvénient de nécessiter la passivation d'une des entrées du modèle d'ordre réduit ainsi que la linéarisation de ce dernier autour d'un point de fonctionnement donné.

Pour nous affranchir de cet inconvénient, nous avons considéré une commande multi-variable linéarisante par bouclage dynamique. Pour ce faire, nous avons procédé à une extension du vecteur d'état et à une modification du vecteur de sortie. Cette approche nous a permis d'exploiter là encore la platitude dans le cas linéaire. Le contrôleur résultant a été implémenté

dans un ordinateur et testé avec succès en simulation temps réel sur le modèle non linéaire d'ordre plein.

Nous avons ensuite pris le parti d'explorer la piste de la GPC qui vise également à optimiser la poursuite de trajectoires de référence. Nous avons commencé à explorer les deux approches possibles : une première approche linéaire s'appuyant sur la GPC à base d'état pour laquelle la catégorie des systèmes MIMO à non minimum de phase posait problème. Les travaux réalisés dans cette voie ont abouti à une méthode originale permettant la synthèse de contrôleurs prédictifs à base d'état sous réserve qu'un découplage des chaînes entrée-sortie du système considéré soit possible. La méthode proposée a été appliquée avec succès au contrôle du système d'air : associé à une stratégie d'accommodation indirecte, le contrôleur résultant présente par ailleurs une certaine robustesse en stabilité lorsqu'un défaut d'actionneur apparaît.

Plus récemment, nous avons commencé à explorer une approche non linéaire basée sur la NCGPC. Afin de nous affranchir du problème de non minimum de phase, nous avons procédé à une extension de dynamique et une modification du vecteur de sortie du modèle non linéaire de moteur diesel. Nous avons proposé une écriture originale de cette loi de commande après développement en série de Taylor de l'erreur de prédiction et résolution de l'équation de minimisation du critère de la NCGPC.

Dans le cadre d'une problématique industrielle de contrôle moteur visant à réguler simultanément deux grandeurs physiques du système d'air fortement couplées entre elles, je me suis également intéressé à la commande floue. La thèse réalisée dans ce domaine a montré les nombreux avantages cette approche : elle dispense d'un modèle de moteur diesel pour le calcul des signaux de commande, elle permet de s'affranchir de certaines cartographies, s'accommode de l'instrumentation disponible mais nécessite une connaissance très fine du système à contrôler.

Les résultats de tous ces travaux ont fait l'objet de publications dans des revues et conférences internationales traduisant l'émergence d'une reconnaissance de notre équipe au sein de la communauté scientifique.

Perspectives en recherche

Au regard des travaux réalisés jusqu'ici, plusieurs pistes théoriques me paraissent particulièrement intéressantes à étudier dans un proche avenir. Je pense notamment à :

- La prise en compte de contraintes sur la commande dans l'élaboration des contrôleurs prédictifs non linéaires,
- L'introduction de la propriété de tolérance aux fautes dans la NCGPC via un module d'accommodation dont la structure reste à définir.

Il est fort probable qu'au moins une de ces pistes soit traitée par ma future doctorante issue de l'Université de Beijing Jiaotong (Chine) et que j'ai aidée à obtenir une bourse du CSC (Chinese Scholarship Council) pour une période de 3 ans. X. MENG rejoindra notre équipe en octobre 2008. Ses travaux porteront très certainement sur le thème de « la commande prédictive non linéaire tolérante aux fautes avec application aux motorisations hybrides », thème que je souhaite développer au sein de notre équipe.

Je vais par ailleurs continuer à m'investir dans le co-encadrement des thèses de K. NAGOUDI-LAYERLE (soutenance prévue en fin d'année 2008) de M. DABO (soutenance prévue en fin d'année 2009) et d'A. BELAÏDI. J'ai notamment proposé aux organisateurs de la prochaine réunion du GT AA se déroulant à l'UTBM les 22 et 23 octobre prochains que K. NAGOUDI-LAYERLE présente la partie de ses travaux appliquée au contrôle moteur.

Ayant le souci de contribuer à mon niveau et dans mon domaine à la réduction de la pollution issue des moyens de transport, je souhaite continuer à mener activement des travaux dans le cadre de collaborations avec d'autres équipes de recherche, sous toutes les formes envisageables (projets de recherche communs, co-direction de thèses, ...).

En termes de projets de recherche, des actions sont déjà en cours au sein de l'ESIGELEC / IRSEEM mais également avec certains de nos partenaires universitaires et industriels. Tous ces projets à caractère national, européen et international feront naturellement l'objet de travaux impliquant des doctorants, des post-doctorants et des étudiants en stage de Master Recherche.

Au sein de l'ESIGELEC / IRSEEM :

Dans le cadre du projet « Campus Intégration Systèmes Embarqués » (CISE) ayant obtenu le label du pôle de compétitivité Move'o, notre équipe est en voie de se doter d'un banc à rouleaux EURO V. Ce banc sera capable d'accueillir différents types de véhicules et

notamment des véhicules hybrides (associant moteur Diesel et moteur électrique). Equipé de baies spécifiques pour la mesure des gaz polluants, ce type de banc est actuellement très peu répandu en dehors des équipements propres aux constructeurs automobiles. Il nous permettra d'étudier et de valider expérimentalement des stratégies de contrôle moteur innovantes. L'analyse et l'amélioration des performances des véhicules seront effectuées via des projets de R&D réalisés dans le cadre du dispositif CARNOT en partenariat avec des laboratoires universitaires et des industriels de la filière concernée.

Au niveau national :

Force est de constater que la diversification des sources d'énergie est devenue une préoccupation majeure pour de nombreux secteurs d'activités (automobile, agriculture, ...). Dans ce contexte lié au développement durable, les chercheurs automaticiens du LAGIS (Lille), du LSIS (Marseille), du MIS (Amiens) et de l'IRSEEM (Rouen) ont créé en octobre 2007 le groupe de travail MACSYME (Maîtrise et Contrôle des Systèmes Multi Energies). L'objectif de ce GT est de proposer des techniques innovantes de contrôle et de diagnostic pour les systèmes utilisant plusieurs sources d'énergie (fossile, solaire, éolien, ...). Pour atteindre cet objectif, les chercheurs impliqués dans MACSYME se proposent d'associer leurs compétences scientifiques et de mutualiser leurs moyens de simulation et de test. Il est prévu que les équipes de ce réseau interrégional collaborent également avec des industriels dans le cadre du dispositif CARNOT et qu'ils répondent conjointement à des appels à projets de l'ANR (notamment sur le thème « énergie durable et environnement »).

Au niveau européen :

Les réflexions menées conjointement avec l'Université de Picardie Jules Verne et l'Université de Brighton ont abouti à la définition d'un projet commun sur le contrôle de systèmes à deux sources d'énergie. Plus précisément, ce projet intitulé CHAMP (low-Carbon **H**ybrid **A**dvanced **M**otive **P**ower) vise à étudier des stratégies de contrôle / commande destinées à des véhicules légers associant motorisations thermique et électrique et capables de transporter un nombre réduit de personnes (2 à 3). A la différence des solutions actuellement proposées par les industriels, le moteur thermique (de faible cylindrée) ne sera exploité que dans une plage de fonctionnement restreinte mais optimisée. Afin de réduire au maximum les émissions de gaz polluants, les stratégies de contrôle / commande qui seront élaborées favoriseront le mode de fonctionnement électrique. L'accent sera donc mis sur le système supervisant et optimisant le fonctionnement du moteur thermique, des moteurs électriques, de la batterie et de tout autre

élément intervenant dans la consommation d'énergie. A ce titre, il est prévu que l'équipe « Automatique & Systèmes » poursuive ses investigations dans le domaine de la commande tolérante aux fautes. Ce projet d'une durée de 2 ans a fait l'objet en juin 2008, d'une demande de subventions auprès FEDER dans le cadre du programme INTERREG IVa.

Les réflexions menées conjointement avec l'Université de Loughborough (UK), l'Université de Coventry (UK), l'Université du Sussex à Brighton (UK), l'Université de HAN (Pays Bas), l'Université Polytechnique de Bucarest (Roumanie) et l'Université de Picardie Jules Verne ont abouti à la définition d'un projet commun sur le contrôle des moteurs diesel équipés de capteurs de pression cylindre. Plus précisément, ce projet intitulé ADELAIDE (**A**dvanced **D**iagnostics and **E**fficient contro**L** **b**Ased on **I**n-cylinder pressure of **D**iesel **E**ngines) vise à élaborer une stratégie de contrôle exploitant le signal fourni par ce type de capteur pour d'une part diagnostiquer des anomalies de combustion et d'autre part maîtriser les profils de pression cylindre et de réguler le couple produit par le moteur. Ce projet d'une durée de trois a fait l'objet, en mai 2008, d'une demande de subvention auprès du FEDER dans le cadre 7^{ème} PCRD.

En appuie de ce programme, nous avons sollicité en mai 2008 en partenariat avec l'Université Polytechnique de Bucarest (Roumanie) et l'Université de Picardie Jules Verne une aide financière auprès du programme PHC Brancusi pour favoriser la mobilité des chercheurs impliqués dans le projet ADELAIDE.

Au niveau international :

Les réflexions entamées avec une équipe de l'Université de Shanghai au cours de la conférence LSMS'07 ont permis d'aboutir à une piste potentielle de travaux communs. Dans le cadre d'un programme de recherche franco-chinois, il est prévu d'investiguer dans le domaine de la commande prédictive tolérante aux fautes des systèmes en réseau. Les travaux envisagés ici se situent à l'intersection des travaux de l'équipe chinoise sur les systèmes de commande à distance et les travaux de notre équipe sur la commande prédictive tolérante aux fautes. Au cours de ce projet, une attention particulière sera portée sur les échanges mutuels de doctorants, notre équipe comptant en effet renforcer son statut d'équipe d'accueil d'étudiants étrangers.

Perspectives en enseignement

En tant que responsable de certains modules d'enseignement au sein de l'ESIGELEC, je vais continuer de m'impliquer dans la réforme du cursus initiée en 2007. Cette implication va se traduire concrètement par la finalisation d'un module « découverte de l'automatique » destiné aux étudiants en première année du cycle ingénieur et la modification du module « Régulation industrielle ». Par ailleurs, fort des acquis sur la théorie de la commande avancée appliquée au contrôle moteur, je souhaite proposer dès la rentrée 2009 un module spécialisé sur cette thématique aux étudiants en dernière année du cycle ingénieur.

Il est également prévu que j'intervienne dès la rentrée 2008 dans le futur Master STIM (Systèmes de Traitement de l'Information & Multimédia) de l'école doctorale SPMII (Universités de Rouen et du Havre). Plus précisément, mon intervention portera sur un module « Identification, Modélisation & Commande des systèmes ».

Annexe :
Nomenclature

Annexe : Nomenclature

Variable	Description
EGR	Gaz d'échappement recyclé
AFR	Rapport Air Carburant
N	Vitesse de rotation du moteur
F_1	Fraction de gaz brûlé dans le collecteur d'admission
F_2	Fraction de gaz brûlé dans le collecteur d'échappement
m_1	Masse de gaz dans le collecteur d'admission
m_2	Masse de gaz dans le collecteur d'échappement
p_1	Pression de gaz dans le collecteur d'admission
p_2	Pression de gaz dans le collecteur d'échappement
P_c	Puissance du compresseur
P_t	Puissance de la turbine
W_e	Débit total de gaz entrant dans le moteur
W_c	Débit du compresseur
W_t	Débit de la turbine
W_f	Débit de fuel
W_{egr}	Débit EGR
V_1	Volume du collecteur d'admission
V_2	Volume du collecteur d'échappement
T_1	Température du collecteur d'admission
T_2	Température du collecteur d'échappement
T_c	Température du compresseur
T_e	Température des gaz d'échappement
T_{egr}	Température EGR
ω_{tc}	Vitesse du turbocompresseur
η_c	Rendement isentropique du compresseur
η_t	Rendement isentropique de la turbine
η_m	Rendement mécanique du turbocompresseur
Γ	Indice adiabatique
R	Constante des gaz
J_{tc}	Moment d'inertie du turbocompresseur

Contribution à la modélisation et à la commande avancée des moteurs Diesel

Résumé: Face au souci constant de la consommation de carburant et au renforcement croissant des normes EURO limitant l'émission de gaz polluants des automobiles, l'optimisation et la maîtrise des phénomènes de combustion sont placées, depuis quelques années, au cœur de la problématique motoriste. Dans ce contexte, je me suis penché sur le problème de la poursuite de trajectoires de référence en vue de réguler certaines grandeurs physiques du système d'air du moteur Diesel.

La première partie de ce mémoire présente les travaux réalisés sur la modélisation du moteur Diesel. Un modèle à valeurs instantanées de type boîte grise a été élaboré pour estimer la pression cylindre à partir du régime moteur. Différents modèles à valeurs moyennes issus de la littérature ont également été étudiés et validés expérimentalement dans le cadre de projets de recherche franco-britanniques.

Dans la seconde partie, nous proposons différentes lois de commande ayant pour objectif de réguler simultanément le taux de gaz recyclés (EGR) et le rapport air / carburant (AFR) pour un régime moteur et une quantité de carburant injectée donnés. Le taux d'EGR et l'AFR n'étant pas directement mesurables, la sélection des variables à réguler nous a conduit à concevoir des méthodes pour la synthèse de contrôleurs destinés aux systèmes MIMO non linéaires à non minimum de phase.

Mots-clés: moteur Diesel, système d'air, régulateur RST, platitude, bouclage dynamique, zéros instables, tolérance aux fautes, commande prédictive, commande floue.

Contribution for modelling and advanced control of diesel engines

Abstract: in front of constant concern on the fuel consumption and on the increasing intensification of the standards limiting the pollutant emissions, optimisation and control of combustion 's phenomena have been placed, for some years, in the heart of engine problems. in this context, I've focused on the issue of trajectory tracking in order to regulate some state variables of diesel engine air path.

The first part of the report deals with the work done on diesel engine modelling. An instantaneous-value model has been designed according the grey-box approach in order to estimate the in-cylinder pressure from engine speed. Different mean-value models from the literature have been studied as well. These models have been validated experimentally in the frame of British-French projects.

In the second part of the report, we propose different control laws aimed to regulate the exhaust gas ratio (EGR) and the air / fuel ratio (AFR) for a given operating point defined by engine speed and injected fuel quantity. Since EGR and AFR can not be measured directly, the choice of to-be-regulated variables has led us to design synthesis methods of controllers dedicated to non-minimum phase systems.

Key-words: diesel engine, air path system, RST controller, flatness, dynamic feedback, unstable zeros, fault tolerant control, predictive control, and fuzzy control.