

**Plateforme AEROfan,
Plateforme Aquitaine pour l'Enseignement et la Recherche
sur les mOteurs aéronautiques turbofan :
un exemple d'utilisation en automatique à travers l'identification
et la commande du moteur DGEN 380**

P. Melchior¹, W. Ben Messaoud¹, S. Victor¹, F. Cazaurang¹, C. Goetz²

¹IMS UMR 5218 CNRS, Université Bordeaux 1-IPB,

351 cours de la Libération, Bât A31, 33405 TALENCE cedex

²Art&Métiers ParisTech, Centre de Bordeaux-Talence,

Esplanade des Arts et Métiers, 33405 TALENCE cedex

Email : pierre.melchior@ims-bordeaux.fr

Résumé – Ce papier présente une nouvelle plateforme, AEROfan, pour l'enseignement et la recherche en aéronautique. L'objectif de cette plateforme AEROfan est de dynamiser les synergies entre les compétences de l'industrie aéronautique régionale et les centres de formation et de recherche de l'Université de Bordeaux. AEROfan associe en Aquitaine des écoles d'ingénieurs (IPB/Enseirb-Matmeca, Centre Arts et Métiers ParisTech de Bordeaux-Talence, ...), l'Université Bordeaux 1 (Centre de Ressources dédié à l'aéronautique CR-IMA, ...) et des laboratoires de Bordeaux, notamment l'IMS, autour d'un projet fortement innovant en termes de recherche, de co-développement, de transfert de technologie, et de pédagogie sur les moteurs aéronautiques turbofan développés en région Aquitaine par la société Price Induction. Ce papier présente un premier travail et exemple d'utilisation de la plateforme en Automatique, notamment en identification et commande.

Mots clés – *Démonstrateurs Pédagogie/Industrie/Commande, Automatique, Aéronautique, Turbofan, Identification, Commande.*

1. Introduction, contexte

Ce papier présente une nouvelle plateforme, AEROfan, pour l'enseignement et la recherche en aéronautique. L'objectif de cette plateforme AEROfan est de dynamiser les synergies entre les compétences de l'industrie aéronautique régionale et les centres de formation et de recherche de l'Université de Bordeaux. AEROfan associe en Aquitaine des écoles d'ingénieurs (IPB/Enseirb-Matmeca, Centre Arts et Métiers ParisTech de Bordeaux-Talence, ...), l'Université Bordeaux 1 (Centre de Ressources dédié à l'aéronautique CR-IMA, ...) et des laboratoires de Bordeaux, notamment l'IMS, autour d'un projet fortement innovant en termes de recherche, de co-développement, de transfert de technologie, et de pédagogie sur les moteurs aéronautiques turbofan développés en région Aquitaine par la société Price Induction [1].

Ce projet s'inscrit pleinement dans la politique de développement de l'Université de Bordeaux à laquelle est associée l'Ecole des Arts et Métiers ParisTech à travers son centre de Bordeaux-Talence. Enfin, ce projet s'intègre également dans la stratégie de Bordeaux Aéroparc ainsi que celle du pôle mondiale de compétitivité Aerospace Valley.

Les domaines concernés relèvent de la technologie mécanique, l'électronique, le contrôle et la régulation, l'informatique, les procédures de contrôle non destructif, de réparation et de maintenance.

Avec la plateforme AEROfan, l'ambition commune est également de définir une nouvelle illustration des contenus pédagogiques, moderne, concrète, appliquée au domaine aéronautique.

Cette plateforme permettra de développer une communication transverse entre les différents partenaires écoles, université et laboratoires régionaux, répartis sur l'ensemble du territoire de l'Aquitaine, et les établissements relevant de l'enseignement secondaire spécialisés dans le domaine de l'aéronautique.

D'un point de vue besoins industriels la plateforme AEROfan résulte de la conjonction de besoins en moyens d'essais moteur au niveau des établissements d'enseignement supérieur de la Région Aquitaine, et d'une réflexion de la part de Price Induction sur l'opportunité d'une recherche partenariale avec les laboratoires relevant du domaine des Sciences et Technologies. Cette recherche partenariale pourrait être élargie à d'autres partenaires industriels aquitains, PME/PMI et grands groupes comme SPS, notamment à travers le réseau constitué par Bordeaux Aéroparc. Avec cette plateforme AEROfan, l'objectif est aussi de profiter de l'attractivité de Bordeaux Aéroparc pour valoriser le champ des compétences des différents partenaires auprès des PME/PMI locales afin de permettre une plus grande diffusion des savoirs et un accompagnement des futurs sauts technologiques.

Ce papier présente un premier travail et exemple d'utilisation de la plateforme [2]. La Section 2 présente la plateforme. La Section 3 décrit l'identification du moteur pour différents régimes de fonctionnement, permettant de déterminer un modèle nominal et les variations paramétriques associées. La commande actuellement utilisée et implémentée dans le FADEC (Full Authority Digital Engine Control) et une première commande robuste, commande Crone 2G, ainsi que les résultats obtenus en simulation sont proposées en Section 4. La Section 5 présente la conclusion et les perspectives.

2. Présentation de la plateforme

2.1 Présentation du nouveau moteur DGEN 380

Après plusieurs années de recherche, la société Price Induction a développé en Région Aquitaine un moteur aéronautique turbofan double corps double flux, fort taux de dilution, le DGEN 380, dont la poussée est très bien adaptée à l'équipement des nouveaux avions légers de 4 à 6 places que constituent les futurs petits jets d'affaires (PLJ, Personal Light Jet). Ce moteur a été développé avec une véritable vision de ce que sera l'évolution de l'aviation générale, notamment via l'apparition prochainement sur ce marché de ces nouveaux PLJ. Ces nouveaux petits avions auront énormément de succès et d'intérêt économique, à condition de les équiper de nouveaux turbomoteurs modernes, légers, économiques et faciles à intégrer. Pour cela, Price Induction a créé et développé ce tout nouveau moteur, le DGEN 380 présenté Figure 1, réellement très innovant, tout en ayant une architecture classique qui rappelle celle du célèbre moteur CFM56, un des modèles les plus vendus dans le monde.



Figure 1 : Le moteur DGEN 380

Les spécificités et les points forts du moteur Price Induction DGEN 380 sont les suivantes :

- moteur aéronautique civil de 250 daN de poussée dont l'architecture ressemble beaucoup à celle du célèbre moteur CFM 56, véritable succès mondial sur le marché de l'aviation commerciale
- moteur qui présente 3 fortes innovations technologiques : une architecture tout électrique avec alerno-démarrreur intégré ; un réducteur intégré ; un pilotage du moteur par fadec (innovation au niveau de la catégorie de ce moteur)
- moteur compact, et léger (environ 70 kg), faible consommation, faible niveau de bruit, faible coût de maintenance.

2.2 Présentation de la plateforme AEROfan

Price Induction propose également sur le marché éducation une nouvelle solution de banc test moteur pour les écoles, les universités et les laboratoires. Ce banc moteur DGEN 380 bien instrumenté et riche en interfaces utilisateur constitue ainsi un outil très puissant en termes de pédagogie, de formation à la maintenance aéronautique, de recherche et de transfert de technologie.

La plateforme AEROfan, présentée Figures 2 et 3, résulte de la conjonction de besoins en moyens d'essais moteur au niveau des établissements d'enseignement supérieur de la Région Aquitaine, et d'une réflexion de la part de Price Induction sur l'opportunité d'une recherche partenariale avec les laboratoires relevant du domaine des Sciences et Technologies. Cette recherche partenariale pourrait être élargie à d'autres partenaires industriels aquitains, PME/PMI et grands groupes comme SPS, notamment à travers le réseau constitué par Bordeaux Aéroparc.



Figure 2 : La plateforme AEROfan fondée sur le moteur DGEN 380

L'enjeu majeur est d'établir une plateforme technologique qui puisse participer à la mise en commun de nouvelles ressources de pédagogie, de recherche et de transfert de technologie dans le secteur aéronautique en région Aquitaine. Chaque centre partenaire va apporter ses spécificités, utiliser ces différentes ressources en partage et dans le même temps enrichir la

plateforme en termes de nouveaux champs pédagogiques, de recherche et de transfert de technologie..

Cette plateforme est organisée sur 3 sites autour de 2 pôles principaux comme présenté par la Figure 3 :

- un banc moteur installé sur l'Aéroparc à Mérignac, au CR-IMA de l'Université Bordeaux 1
- un moteur et un pupitre déporté avec le simulateur du moteur et le fadec pour mesures et simulations, installés sur le campus à Talence, respectivement sur le Centre Arts et Métiers ParisTech de Bordeaux-Talence et à l'IPB/Enseirb-Matmeca.

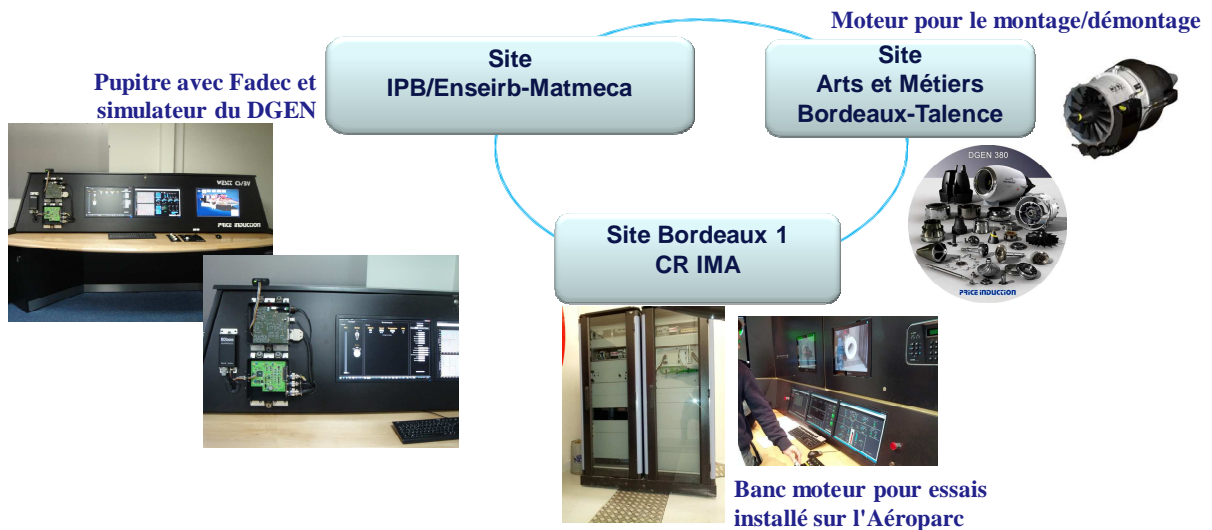


Figure 3 : La plateforme AEROfan fondée sur le moteur DGEN 380

3. Identification du moteur

Les différentes parties du simulateur sont présentées Figure 4.

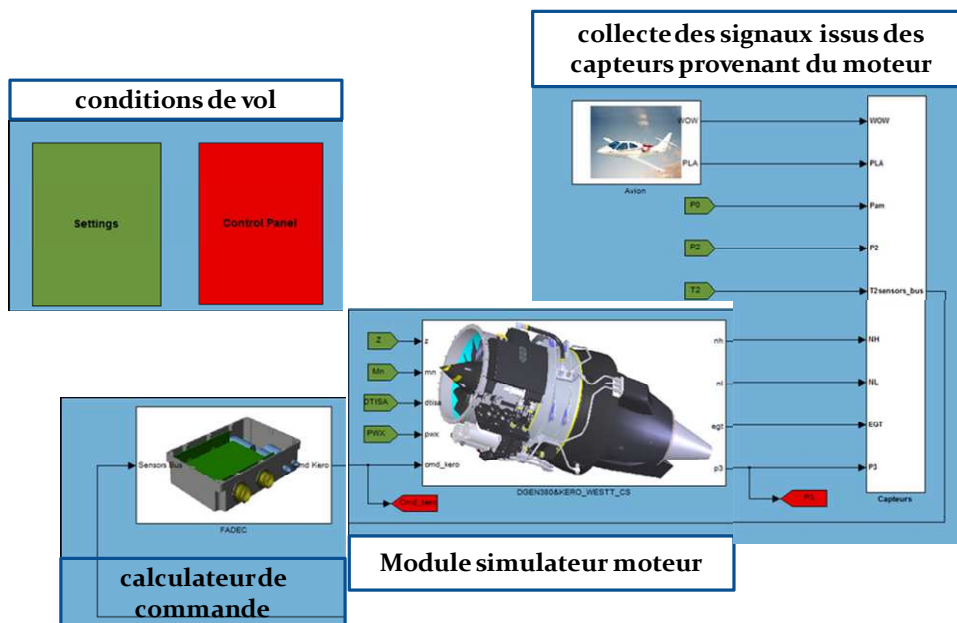


Figure 4 : Ensemble du simulateur du moteur DGEN 380

Le système à identifier est le bloc moteur turboréacteur DGEN 380 qui a cinq entrées, les 4 quatre premières définissent le point de fonctionnement et la cinquième, la commande kérosène, et quatre sorties. Notre étude se limite sur une seule sortie qui est NL, le régime arbre basse pression, comme le montre la Figure 5..

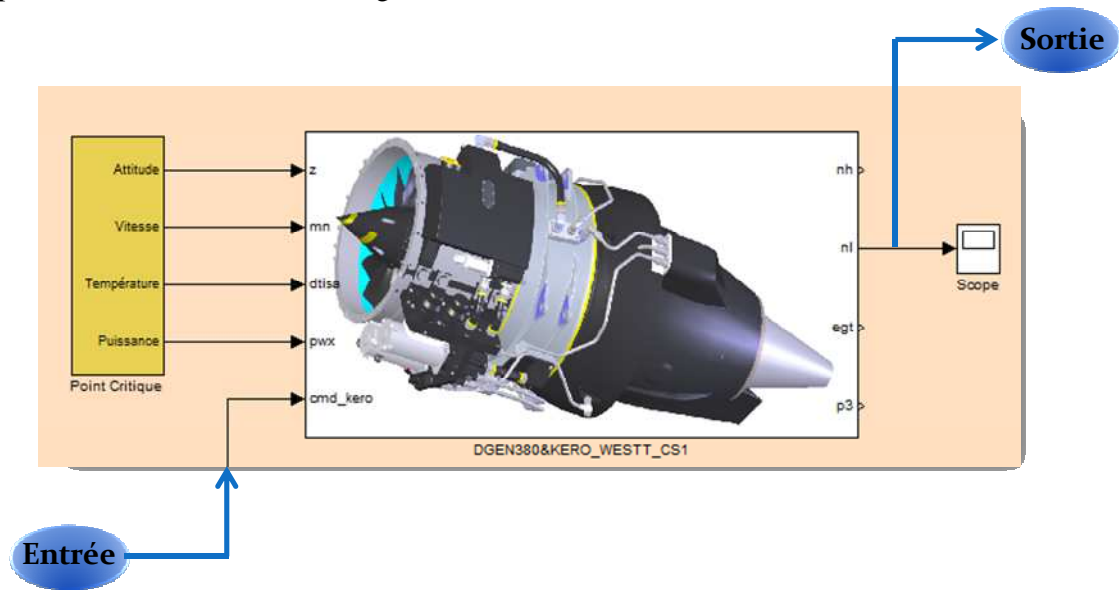


Figure 5 : Système à identifier entrée kérosène/régime arbre basse pression

Pour mener à bien la phase d'identification [3-6], on applique une entrée de commande en kérosène de la forme double échelon ; le premier échelon est d'amplitude B pendant un intervalle de temps égale à T1 secondes pour atteindre le régime permanent, et le deuxième est d'amplitude variable A.

La structure du modèle optimale a été choisie en faisant une comparaison de structure de modèles basée sur l'erreur quadratique moyenne. Celle qui est retenue est une structure présentant un numérateur du premier ordre et un dénominateur du second ordre. Une linéarisation autour de plusieurs points de fonctionnement est effectuée, avec une variation du point de fonctionnement $B = [40, 50, \dots, 150\%]$ et une variation de l'amplitude de l'entrée $= [1, 5, 10\%]$. La méthode d'identification utilisée est la méthode OE.

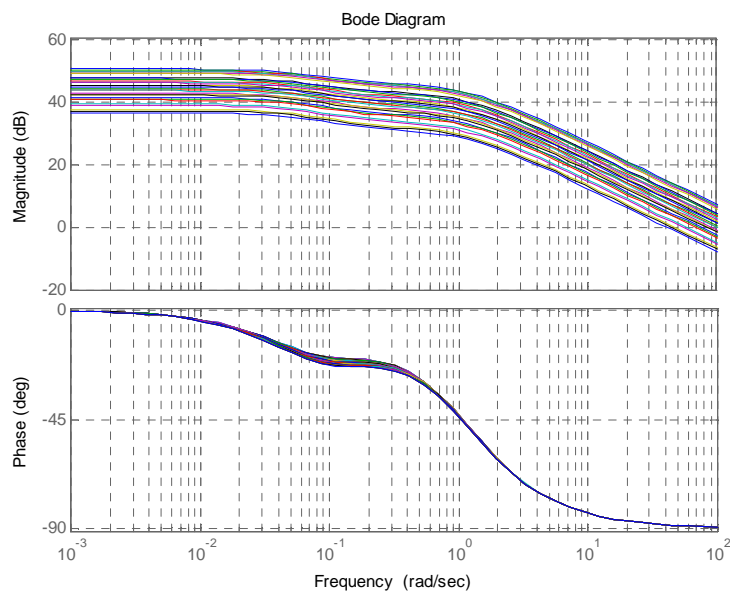


Figure 6 : Diagrammes de Bode du procédé obtenus pour les différents points de fonctionnement

La Figure 6 présente les diagrammes de Bode des réponses en fréquences obtenues. Elle montre que les différents points de fonctionnement conduisent à des variations paramétriques de type gain. Compte-tenu de ces variations et de leur nature, afin d'introduire une robustesse dans les performances, la synthèse d'une loi de commande Crone 2ème génération est effectuée.

4. Etude de la commande kérosène/régime arbre basse pression

La commande actuellement implantée est de type PI. Le régulateur est donné par l'expression suivante :

$$Co(s) = \frac{0.012 \cdot s + 0.015}{s} \quad (1)$$

La pulsation au gain unité est de 1,45 rad/s et la marge de phase de 85°. La Figure 7 présente les diagrammes de Bode et de Nichols de la réponse en fréquences de la boucle ouverte correspondante.

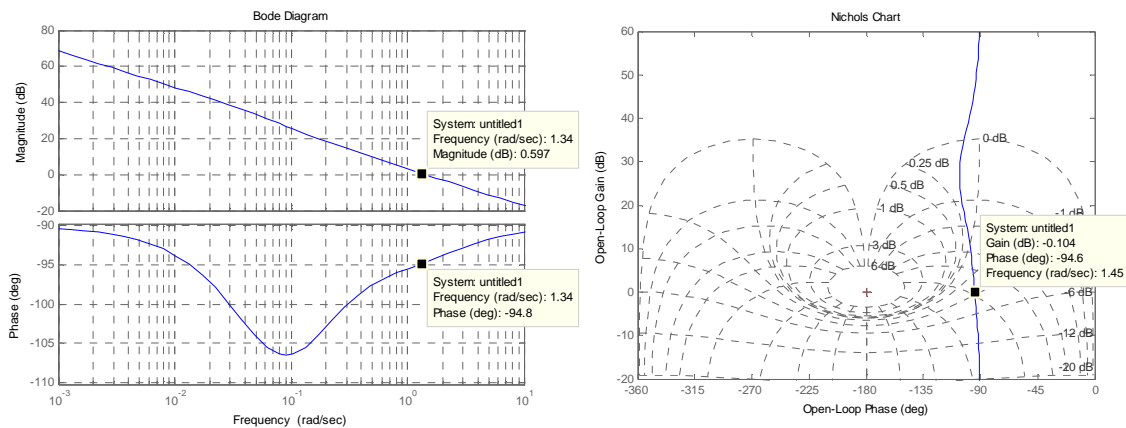


Figure 7 : Diagrammes de Bode et de Nichols de la réponse en fréquences de la boucle ouverte avec un régulateur PI

Afin d'obtenir la robustesse du degré de stabilité, un régulateur Crone 2G est synthétisé [7-8] à l'aide de la Toolbox Crone [9] pour les mêmes spécifications que le régulateur PI initial. Un procédé nominal est défini pour le point de fonctionnement à +40% comme le montre la Figure 8. La comparaison des lieux de Nichols des réponses en fréquences des boucles ouvertes obtenues avec un régulateur PI et Crone 2G est présentée Figure 9.

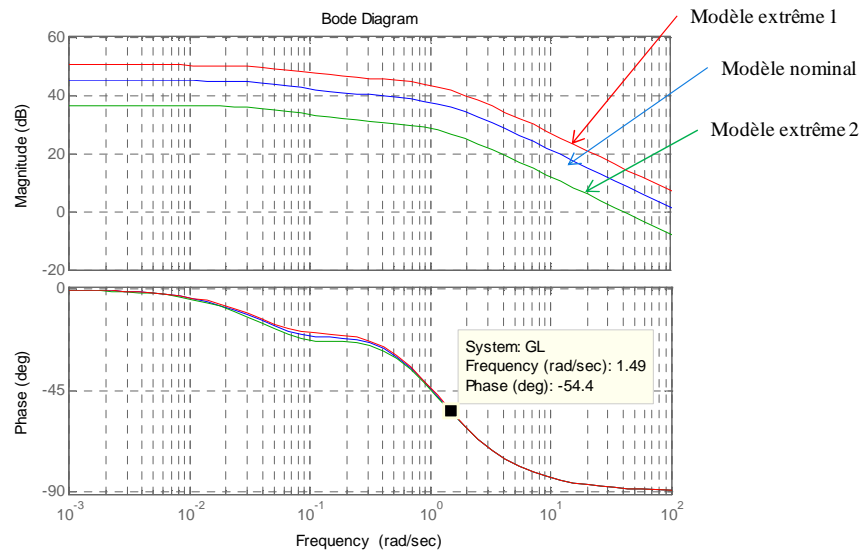


Figure 8 : Procédé nominal et extrémaux considérés

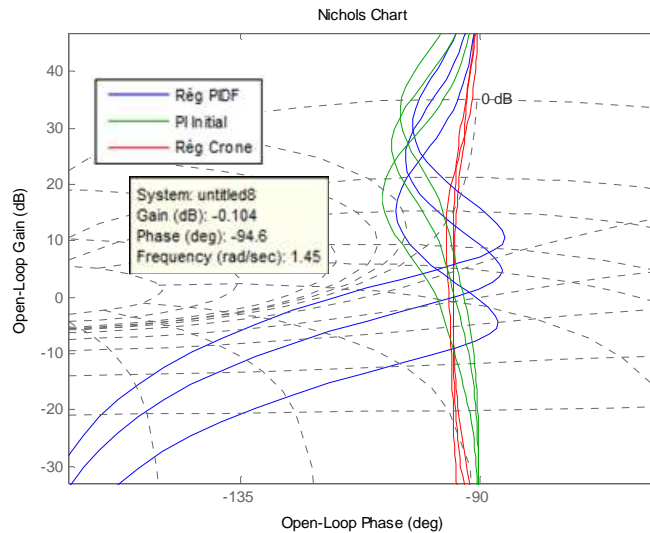


Figure 9 : Lieux de Nichols des réponses en fréquences des boucles ouvertes obtenues avec un régulateur PI et Crone 2G

Sur le procédé nominal, les réponses indicielles et les commandes respectives obtenues avec les correcteurs PI et Crone 2G sont similaires (un premier dépassement de l'ordre de 5%, un temps de réponse à +/- 5% de 1,2s) et sont présentées Figures 10. Les comparaisons des réponses indicielles pour les procédés extrêmes sont présentées Figure 11 et montrent une meilleure robustesse du degré de stabilité vis-à-vis des variations de gain liées au changement de point de fonctionnement.

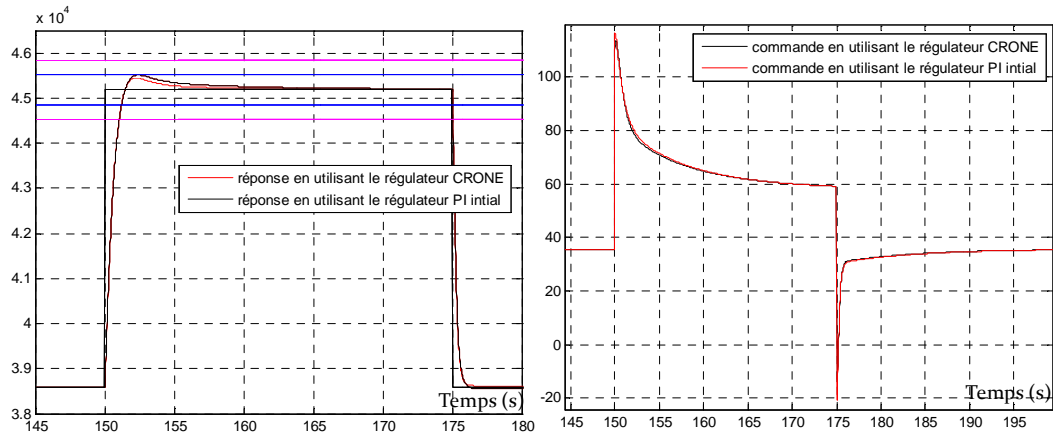


Figure 10 : Réponses indicielles obtenues avec un régulateur PI et Crone 2G pour le procédé nominal

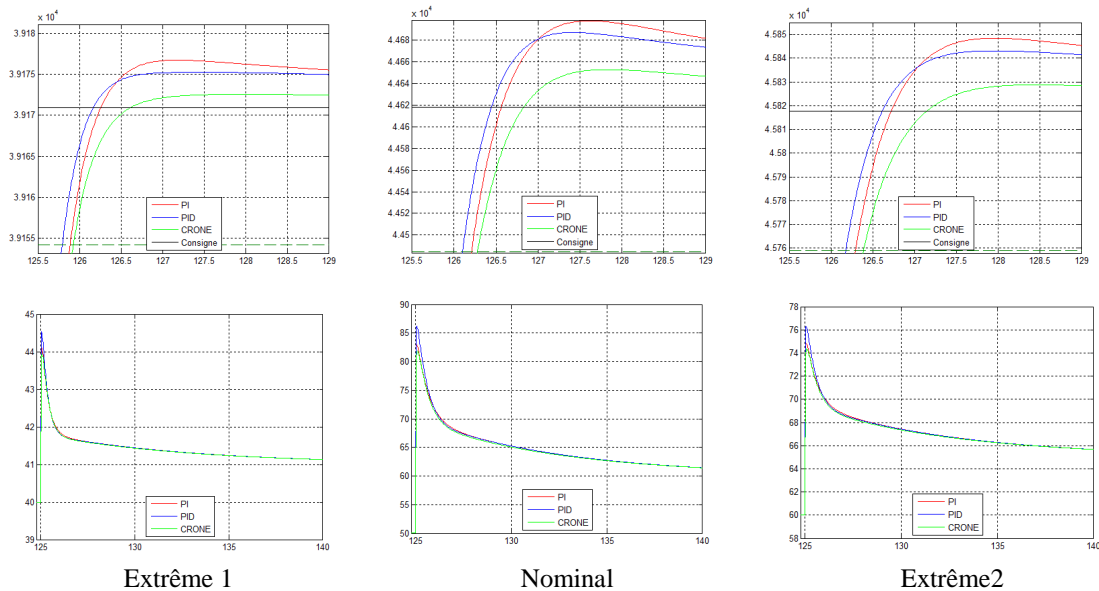


Figure 11 : Zoom sur les réponses indicielles obtenues avec un régulateur PI et Crone 2G pour le procédé nominal et les deux procédés extrêmes

5. Conclusion

La plateforme AEROfan fondée sur le moteur turbofan DGEN 380 a été présentée. Une identification autour de différents points de fonctionnement a permis d'établir un modèle nominal et les variations paramétriques associées. La commande actuellement utilisée est comparée à une première commande robuste de type Crone 2G. Les résultats obtenus en simulation montrent une meilleure robustesse du degré de stabilité vis-à-vis des variations de gain liées au changement de point de fonctionnement.

La poursuite des travaux se fera à travers les tests sur le simulateur du moteur avec le FADEC (simulations HIL), et les essais sur le banc réel. Enfin, outre l'identification et la commande, les perspectives d'utilisation de cette plateforme en enseignement et en recherche sont larges et concernent notamment le diagnostic [10] et la génération de consignes [5].

6. Bibliographie

- [1] Price Induction, <http://www.price-induction.com/fr/>
- [2] Ben Messaoud W., "*Identification et Commande CRONE d'un Moteur Turboréacteur Double Corps, Double Flux Type DGEN 380*", Master Recherche, IMS/ENIS, Université Bordeaux 1, Juin 2012.
- [3] Victor S., "*Identification par modèles non entiers pour la poursuite robuste de trajectoire par platitude*", Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1, 25 Novembre 2010.
- [4] Malti R., Victor S., Oustaloup A., "*Advances in system identification using fractional models*", Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, IDETC/ASME, vol.3, pp. 021401.1-021401.7, 2008.
- [5] Victor S., Melchior P., Oustaloup A., "*Robust path tracking using flatness for fractional linear MIMO systems: a thermal application*", Computers and Mathematics with Application, vol. 59, issue 5, pp. 1667-1678, 2010.
- [6] Victor S., Malti R., Melchior P., Oustaloup A., "*From system identification to path planning using fractional approach: a thermal application example*", 22nd ASME International Design Engineering Technical Conferences, ASME IDETC/CIE'09, San Diego, USA, September 2009.
- [7] Lanusse P., "*De la commande CRONE de première génération à la commande CRONE de troisième génération*", Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1, 1994.
- [8] Oustaloup A., Mathieu B., "*La commande CRONE du scalaire au multivariable*", Hermes Ed., 1999.
- [9] Lanusse P., Malti R., Melchior P., "*Crone control system design toolbox for the control engineering community: tutorial and case study*", Phil. Trans. R. Soc. A 2013 371, N° 1990, 20120149, May 2013.
- [10] Sifi M., Lavigne L., Cazaurang F., Goupil P., "*Oscillatory failure detection in Flight Control System of civil aircraft: EHA actuator servo loop case study*", R3ASC'12, Recent Advances in Aerospace Actuation Systems and Components, Toulouse, 2012.