

# ATOL: outil de contrôle moteur sous MATLAB

Wilfried GILBERT\*

Directeur(s) de thèse : Didier HENRION et Jacques BERNUSSOU

Laboratoire d'accueil :  
LAAS-CNRS  
7, Avenue du Colonel Roche  
31077 Toulouse Cedex 4

Établissement d'inscription :  
INSA Toulouse  
135, Avenue de Ranguel  
31077 Toulouse Cedex 4

---

## Résumé

Cet article décrit les fonctionnalités de l'outil ATOL, développé par Snecma pour le contrôle de moteurs d'avion. ATOL, pour "ATelier contrOLE moteur", est un outil de simulation interfacé avec MATLAB, dont le but est double : (a) simplifier et automatiser autant que possible les différentes phases d'identification, modélisation, synthèse, analyse dans le cadre de la commande de moteurs d'avion ; (b) intégrer de nouvelles techniques de synthèse LPV mises au point dans le cadre d'une collaboration entre le LAAS et Snecma. ATOL permet également de valider ces techniques de synthèse, basées sur la commande  $H_\infty$  via l'optimisation convexe LMI.

## Mots-clés

Commande de moteurs d'avions, systèmes Linéaires à Paramètres Variants (LPV), Inégalités Matricielles Linéaires(LMI), Matlab.

---

## 1 INTRODUCTION

La régulation des turbines à gaz aéronautiques (turboréacteurs ou turbopropulseurs) comme celle des turbines industrielles doit assurer plusieurs fonctions. Elle doit garantir le bon fonctionnement de la machine au point spécifié par le pilote, le passage d'un point de fonctionnement à un autre, le respect des limitations physiques de la machine.

Les premières régulations assurant ces fonctions de base étaient entièrement hydromécaniques. La recherche de performances a mené à l'introduction progressive de l'électronique, analogique dans un premier temps, en complément des organes hydromécaniques. Dans les années 60, les régulations électroniques analogiques ont fait leur apparition permettant l'extension du domaine de vol et l'introduction de nouvelles fonctionnalités. La régulation des turboréacteurs est aujourd'hui généralement assurée par des systèmes numériques à pleine autorité (FADEC). L'objectif premier de ces systèmes de régulation est d'assurer la poussée demandée par le pilote en dosant le débit carburant injecté dans la chambre de combustion. La poussée n'étant pas mesurable, la régulation se fait sur un paramètre représentatif de celle-ci (en général, régimes ou rapports de pression). Cette vue simplifiée permet de considérer le moteur comme un système mono-entrée/mono-sortie (SISO) non linéaire. Une approche largement répandue est la linéarisation du système autour de points de fonctionnement suivi d'une synthèse de correcteurs locaux et d'une interpolation des gains. Ainsi, les techniques de synthèse linéaires temps invariant (LTI) monovariables (placement de pôles) peuvent être

---

\*wgilbert@laas.fr

appliquées avec succès. Cette approche vise à prendre en compte les variations du comportement moteur dans son domaine de fonctionnement, cependant, aucune garantie de stabilité n'est assurée entre deux modèles locaux consécutifs.

Les travaux présentés dans [1, 2, 3] proposent une alternative à la commande séquencée. L'approche linéaire à paramètres variants (LPV) permet de prendre en compte la variabilité du moteur tout en garantissant les propriétés du système régulé. Il s'agit en fait d'une extension des techniques LTI à des modèles dépendant directement de paramètres, de façon à obtenir automatiquement des correcteurs eux-mêmes dépendant de paramètres. Cette approche est basée sur la théorie de la commande robuste.

D'autre part, la présence d'actionneurs supplémentaires (géométries variables, vannes de décharges) sur les moteurs actuels et à venir vient rompre l'hypothèse SISO. L'étude du système multivariable (MIMO) apparaît nécessaire à l'optimisation du fonctionnement de la machine.

La conception des lois de commandes (SISO ou MIMO) a généré de nombreuses études à Snecma (synthèse LQ, LQG,  $H_\infty$ ) notamment à travers une collaboration avec le CNRS-LAAS engagée en 2002. De manière à pérenniser les résultats des différentes études, un environnement de travail appelé *ATOL* « ATelier contrOLE moteur » a été créé. Cet environnement, intégré dans Malab/Simulink, définit un ensemble de classes et de méthodes permettant de réaliser rapidement les différentes tâches de la conception des lois de commandes. Il est enrichi régulièrement avec de nouvelles méthodes (identification, synthèse) et permet ainsi de comparer leurs performances.

Les principales fonctionnalités sont décrites dans la première partie de l'article. Dans une seconde partie, nous présentons une application d'*ATOL* à la synthèse de correcteurs LPV  $H_\infty$  par une approche polynomiale détaillée dans [4].

## 2 DESCRIPTION DES FONCTIONNALITES D'ATOL

Le but d'*ATOL* est donc de réaliser de manière automatique toutes les étapes qui entrent en jeu dans la commande d'un moteur d'avion, de l'identification à la synthèse, sans oublier la validation. Ces différentes phases sont présentées dans cette Section.

### 2.1 IDENTIFICATION

A partir d'un modèle thermodynamique du moteur, tout transfert monovarié ou multivarié peut être identifié. Les identifications donnent lieu à des modèles locaux, uniquement valables autour d'un point de l'enveloppe de vol défini au préalable. Un tel point de fonctionnement est caractérisé par une altitude, un Mach et une position donnée de la manette des gaz (*PLA*).

L'identification en elle-même est réalisée via l'appel à une unique fonction qui renvoie autant de modèles locaux que de points de fonctionnement spécifiés. L'utilisateur choisit tous les paramètres qu'il souhaite : ordre, modèles à temps discret ou continu, avec ou sans retard. Les modèles peuvent être décrits indifféremment par des fonctions de transfert ou des représentations d'état. En ce qui concerne la technique d'identification, une librairie a été créée pour pouvoir utiliser différentes approches. Elle contient les fonctions de base de l'*Identification toolbox* de Matlab (*armax*, *pem*, ...) ainsi que d'autres approches développées dans le cadre de la collaboration entre le LAAS et Snecma [5].

### 2.2 MODELISATION

L'étape suivante consiste à exploiter les modèles locaux afin d'obtenir un modèle LPV.

Il faut tout d'abord trouver des paramètres permettant de relier les modèles locaux, c'est-à-dire les variables de séquençement, qui seront regroupées dans un vecteur noté  $\theta$ .

Il existe ensuite plusieurs méthodes pour obtenir des modèles LPV : représentation LFT où la dépendance en  $\theta$  est contenue dans le bloc  $\Delta$  [6], ou, plus directement, interpolation polynomiale au sens des moindres carrés des coefficients caractéristiques des modèles locaux en fonction de  $\theta$ .

Les deux techniques sont intégrées à *ATOL*. Néanmoins, elles ne sont pour le moment développées que dans le cas où la variable de séquençement  $\theta$  est un scalaire.

## 2.3 SYNTHÈSE

Selon la représentation choisie lors de la modélisation, différentes techniques de synthèse peuvent être appliquées. Un correcteur proportionnel intégral (PI) peut être obtenu par placement de pôles [7] à partir de la famille de modèles locaux.

Dans le cas d'une modélisation LFT, les travaux présentés dans [1, 8] sont implémentés sous *ATOL*. Ils permettent de synthétiser un correcteur  $H_\infty$  à partir du problème de sensibilité mixte [9], voir Figure 1. Il est à noter que l'ordre du correcteur est nécessairement égal à l'ordre du système augmenté du problème de sensibilité mixte (modèle initial augmenté par l'ordre des filtres de pondération).

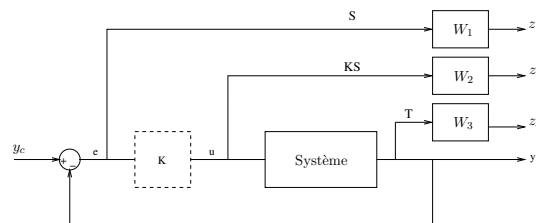


FIG. 1 – Problème de sensibilité mixte

Dans le cadre de la collaboration entre le LAAS et Snecma, une nouvelle technique de synthèse LPV, basée sur la positivité de polynômes, a été mise au point [4]. Elle s'applique à des modèles sous forme de fonction de transfert et fournit des garanties de performance  $H_\infty$  sur l'ensemble des variations possibles de  $\theta$ . Cette approche polynomiale se démarque de l'approche précédente par le fait qu'elle permet d'obtenir un correcteur d'ordre fixé a priori. Dans les deux cas, l'obtention des correcteurs se fait via la résolution d'inégalités matricielles linéaires (LMI).

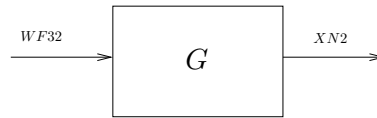
A l'heure actuelle, l'approche polynomiale ne peut être appliquée qu'à des systèmes SISO. L'extension au cas MIMO est une priorité pour les futures évolutions d'*ATOL*.

## 2.4 VALIDATION

*ATOL* permet également de valider des lois de commandes avancées sur le modèle complet non linéaire du moteur. Toutes les limites inhérentes au contrôle d'un moteur d'avion y sont présentes. Différentes manœuvres peuvent être simulées, et ce en n'importe quel point de l'enveloppe de vol.

## 3 APPLICATIONS

On souhaite dans cette section appliquer toutes les fonctionnalités présentées précédemment au transfert SISO, noté  $G$ , entre le débit carburant  $WF32$  et le régime fan  $XN2$ . Pour des raisons de confidentialité, les unités n'apparaissent pas sur les figures. Il en est de même pour les échelles sauf lorsque les variables sont normalisées.



### 3.1 IDENTIFICATION

Après avoir défini correctement les points de fonctionnement à considérer, les identifications peuvent se faire. Par exemple, pour obtenir une fonction de transfert discrète du premier ordre, la commande Matlab suivante sera utilisée :

```
mod_WXN2=identify(G,Liste_points_de_fonctionnement,MMR,{'modeltype', 'tf'...
'time', 'discrete', 'method', 'laas', 'order', 1, 'delay', 0});
```

Les identifications peuvent être vérifiées visuellement a posteriori, cf. Figure 2.

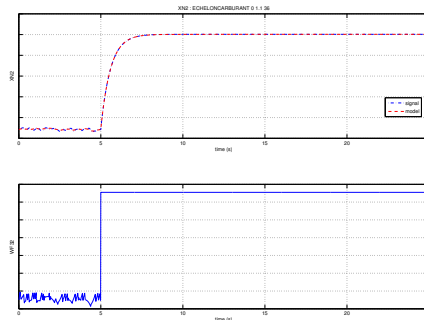


FIG. 2 – Identification

La fonction `identify` renvoie un objet Matlab comprenant tous les modèles locaux et leurs caractéristiques : point de l’enveloppe de vol bien sûr mais aussi valeurs de différentes variables. Ces valeurs seront exploitées par la suite pour déterminer les variables de séquençement.

### 3.2 OBTENTION D’UN MODELE LPV

La fonction `plot` a été surchargée pour faciliter la recherche de  $\theta$  : il est possible de représenter l’évolution des grandeurs caractéristiques des modèles (dans le cas de cet exemple, les coefficients de la fonction de transfert  $G$ ) en fonction d’un paramètre spécifié. La Figure 3 montre d’ailleurs que la pression dans la chambre de combustion,  $PS32$ , est un meilleur choix que l’altitude pour interpoler la fonction  $G$ .

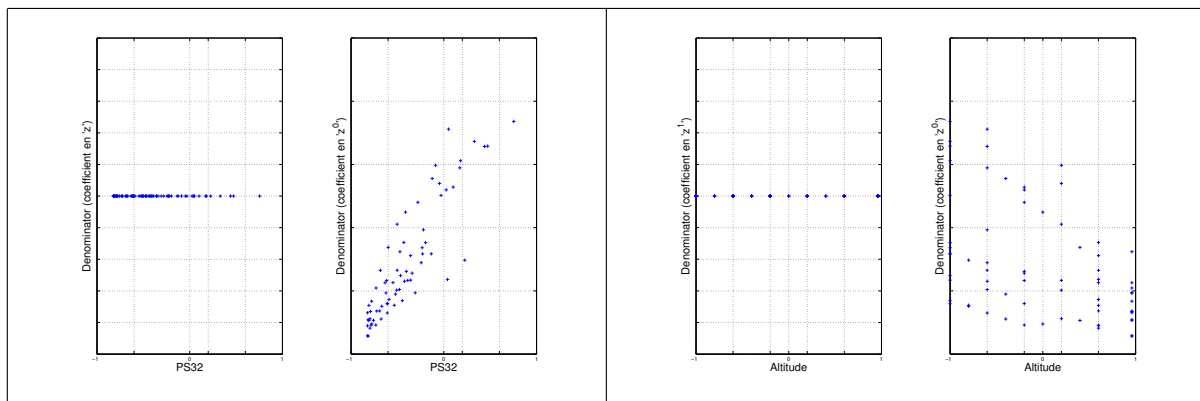


FIG. 3 – Choix de  $\theta$

Reste alors à obtenir un modèle global du transfert considéré. Seule l'interpolation polynomiale est présentée ici. La dépendance en  $\theta$  peut être de tout type : linéaire, polynomiale ou même fractionnelle. L'ordre est spécifié dans la ligne de commande.

```
tf_WXN2=mod2interp(mod_WXN2,degre_num_theta,degre_den_theta,'PS32')
```

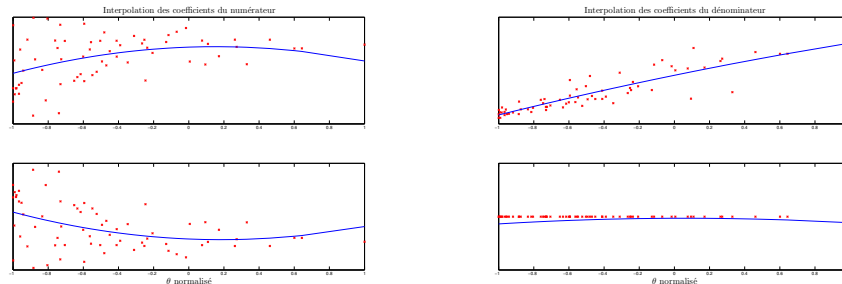


FIG. 4 – Interpolation

Le système renvoyé est soit une représentation d'état LPV, soit une fonction de transfert, selon la nature des modèles locaux. Dans ce dernier cas, le système LPV appartient à la classe `tf_lpv` qui a été développée dans le cadre de cette collaboration.

Le modèle d'ordre 1, obtenu après interpolation de degré 2 et présenté sur la Figure 4 est le suivant :

$$G(z, \theta) = \frac{(0.1 - 0.14\theta + 0.25\theta^2)z - 0.01 + 0.12\theta - 0.26\theta^2}{z - 0.95 + 0.03\theta - 0.01\theta^2}. \quad (1)$$

### 3.3 SYNTHÈSE POLYNOMIALE

Plusieurs paramètres doivent être fixés dans le cas de la synthèse polynomiale. Les caractéristiques du correcteur (ordre, type de dépendance en  $\theta$  du numérateur et du dénominateur) sont à choisir par l'utilisateur.

Pour obtenir des relations linéaires et ainsi pouvoir utiliser l'outil LMI, un polynôme, appelé *polynôme central*, doit également être fixé. Ce polynôme est le paramètre clé de l'approche. Il peut être considéré comme un possible placement de pôles [4]. Comme pour les filtres de pondérations dans le problème de sensibilité mixte, plusieurs itérations sont parfois nécessaires pour que les résultats soient satisfaisants. Il est demandé à l'utilisateur lors de l'exécution de la fonction MATLAB `synthpol_asiso.m`.

```
K=synthpol_asiso(tf_WXN2,gamma,ordre_correcteur,...
                dependance_theta_num,dependance_theta_den)
```

`gamma` représente la norme  $H_\infty$  du système. Ce paramètre doit aussi être défini a priori. En général, le choix  $\gamma = 1.2$  permet d'obtenir de bons résultats (voir [10]).

Pour la fonction de transfert (1), le correcteur obtenu est :

$$K(s, \theta) = \frac{(27.95 + 5.07\theta)z - 25.61 - 5.75\theta}{z - 0.05 + 0.5\theta}. \quad (2)$$

### 3.4 VALIDATION

Finalement, le correcteur synthétisé peut être testé sur le modèle complet du moteur. A cause des non-linéarités et des saturations du système, un dispositif anti-windup [11] est ajouté. La figure 5 montre les résultats obtenus et les compare à une régulation de référence.

Ces résultats sont tout à fait acceptables. Malgré quelques oscillations, les temps de réponse sont plus rapides avec le correcteur LPV développé dans cette section.

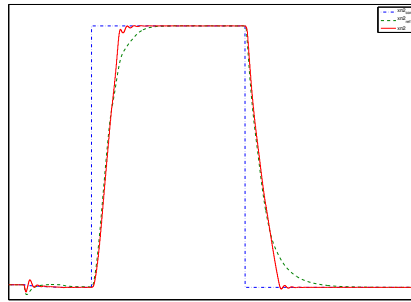


FIG. 5 – Validation

## 4 CONCLUSION

Les principales fonctionnalités de l'outil *ATOL* ont été présentées dans cet article. *ATOL* est d'ores et déjà un outil fiable d'identification et de modélisation LPV. Les blocs Simulink développés pour *ATOL* doivent être compatibles avec l'outil de génération de code critique utilisé par Snecma. Ils peuvent donc être implémentés sur un ordinateur sans problème.

Plusieurs évolutions peuvent cependant être apportées, notamment l'extension au cas MIMO des techniques de synthèse LPV évoquées dans ce papier. Il s'agit d'ailleurs de la prochaine étape en ce qui concerne la collaboration entre le LAAS et Snecma.

## 5 REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'une collaboration entre le LAAS et Snecma. L'auteur tient particulièrement à remercier David Boyer pour les discussions constructives concernant le fonctionnement des turboréacteurs ainsi que pour sa participation à la rédaction de l'article (partie introductive).

## Références

- [1] P. Apkarian et P. Gahinet. A convex characterization of gain-scheduled  $H_\infty$  controllers. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 40(5) :853–864, 1995.
- [2] D.J. Leith et W.E. Leithead. Survey of gain-scheduling analysis and design. *Int. J. Control*, 73(11) :1001–1025, 2000.
- [3] W.J. Rugh et J.S. Shamma. Research on gain scheduling. *Automatica*, 36 :1401–1425, 2000.
- [4] W. Gilbert, D. Henrion, et J. Bernussou. Polynomial lpv synthesis applied to turbofan engines. In *IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace*, Toulouse, France, 2007.
- [5] D. Lebel. Méthodologie d'identification/linéarisation de modèles de moteurs d'avions, 2003. Rapport de stage de fin d'études, ENSEEIHT.
- [6] D. Boyer. Commande robuste LPV de turboréacteurs, 2004. Rapport interne.
- [7] L. Reberga, D. Henrion, et J. Bernussou. Régulation de moteur monovarié par correcteurs PI et avance de phase, 2004. Rapport de contrat Snecma.
- [8] T. Iwasaki. *Advances in Linear Matrix Inequality Methods in Control*, chapter 12 Control Synthesis for Well-Posedness of Feedback Systems, pages 229–247. *Advances in Design and Control*. SIAM, 2000. edited by L. El Ghaoui and S.-I. Niculescu.
- [9] S. Skogestad et I. Postlethwaite. *Multivariable feedback control*. Wiley, Londres, 2005.
- [10] K.J. Astrom. Limitations on control system performance. *European J. of Control*, 6 :2–20, 2000.
- [11] J.M. Gomes da Silva Jr. et S. Tarbouriech. Anti-windup design with guaranteed regions of stability : an LMI-based approach. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 50(1) :106–111, 2005.