

Panorama des principales approches relevant du « cadre H_∞ »

Survey of the main approaches in the “ H_∞ framework”

par Gilles DUC

École Supérieure d'Électricité, Service Automatique
Plateau de Moulon
91192 Gif-sur-Yvette cedex
Tel : 01 69 85 13 88 – Fax : 01 69 85 12 34
Email : Gilles.Duc@supelec.fr

résumé et mots clés

Cet article a pour but de mettre en perspective les approches utilisant les outils développés dans le cadre linéaire à partir du formalisme H_∞ . Les aspects liés à la notion de robustesse y sont plus particulièrement soulignés, à la lumière de l'expérience acquise au cours des travaux effectués dans le *Service Automatique de Supélec*.

Synthèse H_∞ , valeur singulière structurée, robustesse, inégalités matricielles linéaires.

abstract and key words

The aim of this paper is to give an insight into the approaches developed for linear systems in the H_∞ framework. A particular attention is devoted to robustness aspects, taking advantages of the experience obtained during the works performed by the *Service Automatique of Supélec*.

H_∞ synthesis, structured singular value, robustness, linear matrix inequalities.

1. introduction

La synthèse d'une loi de commande passe par l'utilisation de modèles qui ne sont qu'une représentation imparfaite de la réalité : hormis le fait que les lois de la Physique ne fournissent qu'une représentation globale des phénomènes, donc valable à une certaine échelle, il y a toujours des incertitudes de modélisation, de sorte qu'on ne peut pas décrire exactement par un modèle mathématique le comportement d'un processus physique.

Dès lors qu'on travaille sur des modèles, dont la validité est limitée, il faut se préoccuper de la *robustesse* de la loi de commande, c'est-à-dire être capable de garantir non seulement la sta-

bilité mais aussi certaines performances vis-à-vis d'incertitudes de modèles. Ce dernier point demande de compléter le travail de modélisation par une description précise des incertitudes de modèle, et de les inclure dans un formalisme général permettant de les prendre en compte et d'en déduire certaines conclusions.

La synthèse d'une loi de commande s'articule ainsi autour de 2 étapes fondamentales, qui en pratique sont répétées alternativement jusqu'à ce que le concepteur juge les résultats satisfaisants :

– calcul du régulateur : dans cette étape, peuvent être pris en compte certains objectifs de performances et certains objectifs de robustesse seulement,

– analyse des propriétés du système commandé, tant du point de vue des performances que de la robustesse de celles-ci.

2. l'approche H_∞

La préoccupation de robustesse, sous-jacente dans les méthodes de l'Automatique classique, réapparaît vers la fin des années 70, après avoir été assez largement occultée lors du développement des méthodes d'état. Elle est à l'origine du développement des approches H_∞ [42], parmi lesquelles deux directions ont principalement émergé :

2.1. l'approche H_∞ standard

Dans cette approche, le concepteur introduit des filtres sur des signaux intervenant en différents points de l'asservissement. On obtient ainsi un système augmenté, dont la forme générale est donnée sur la figure 1 : le vecteur w représente les entrées extérieures (signaux de référence, perturbations, bruits), le vecteur u représente les commandes, les signaux e sont choisis pour caractériser le bon fonctionnement de l'asservissement, et y représente les mesures disponibles; $K(s)$ est le correcteur cherché, qui doit assurer la stabilité du système, tout en conférant au transfert $T_{ew}(s)$ entre w et e une norme H_∞ inférieure à un niveau γ donné.

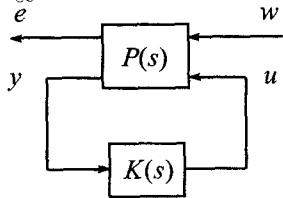


Figure 1. – Problème H_∞ standard

Si le niveau γ est atteint, les propriétés de la norme H_∞ entraînent alors que :

– chaque transfert $T_{e_i w_j}(s)$ entre une composante w_j de w et une composante e_i de e , vérifie :

$$\forall \omega \in \mathbf{R}, \quad |T_{e_i w_j}(j\omega)| < \gamma \quad (1)$$

– le système reste stable pour toute incertitude de modèle, caractérisée par $w(s) = \Delta(s)e(s)$, où $\Delta(s)$ est une matrice de transfert stable quelconque de norme H_∞ inférieure à $1/\gamma$.

On peut donc utiliser ces résultats de différentes façons :

– imposer des gabarits à certains transferts, en choisissant de façon appropriée les signaux e et w ; si par exemple $e(s) = W_1(s)z(s)$, où z est la sortie à contrôler et w est une perturbation, on obtient :

$$\forall \omega \in \mathbf{R}, \quad |T_{zw}(j\omega)| < \frac{\gamma}{|W_1(j\omega)|} \quad (2)$$

de sorte que le filtre $W_1(s)$ permet de modéliser le transfert $T_{zw}(s)$ entre la perturbation et la sortie.

– effectuer la synthèse d'un correcteur assurant la robustesse vis-à-vis d'incertitudes de modèle $\Delta(s)$ bornées en norme (dans ce cas, les signaux e et w ne correspondent pas à des entrées et sorties de l'asservissement, mais résultent d'une modélisation appropriée);

– et bien sûr adopter une combinaison de ces 2 approches.

Il est à noter que si, historiquement, c'est plutôt la deuxième approche qui est à l'origine du développement des synthèses H_∞ , le fait de rassembler toutes les incertitudes de modèle dans une seule matrice de transfert $\Delta(s)$ est une représentation très pauvre, qui conduit dans la plupart des cas pratiques à des résultats limités. La synthèse H_∞ doit donc plutôt être vue, conformément à la première approche, comme un moyen d'imposer des gabarits au modèle nominal de l'asservissement, sans que tous les objectifs de robustesse puissent être pris en compte dès la synthèse.

2.2. l'approche H_∞ par « loop-shaping »

Cette approche a été introduite à partir de la notion de factorisation première d'une matrice de transfert, et de la stabilisation d'un système incertain décrit sous cette forme [20]. Sa mise en œuvre utilise un problème H_∞ particulier (où les entrées et les sorties sont imposées). Le réglage des performances est obtenu par un modelage préalable de la boucle ouverte (étape de « loop-shaping »), par adjonction de réseaux correcteurs classiques, le problème H_∞ étant ensuite résolu sur la base du système ainsi mis en forme [27, 28].

Cette approche est intéressante, dans la mesure où elle permet de réutiliser le savoir-faire issu de l'Automatique classique. De plus le problème H_∞ sur lequel elle repose permet d'assurer une bonne robustesse globale de la commande aux incertitudes sur le modèle.

2.3. méthodes de résolution

Deux méthodes de résolution sont plus particulièrement utilisées. Toutes deux utilisent une représentation d'état de la matrice $P(s)$ qui apparaît sur la figure 1. La première est basée sur la résolution de 2 équations de Riccati [19]. La seconde conduit à un problème de faisabilité sous des contraintes exprimées par des Inégalités Matricielles Linéaires (LMI) [17, 18, 24]. Des méthodes efficaces existent pour résoudre ce type de problème, qui est convexe [6, 31].

Ces 2 méthodes conduisent à des correcteurs d'ordre égal à celui de la matrice $P(s)$, qui comprend le modèle du système à réguler augmenté soit par les filtres exprimant les objectifs de synthèse (dans l'approche standard) soit par les réseaux correcteurs effectuant le modelage de la boucle ouverte (dans l'approche par « loop-shaping »). Or on conçoit aisément que cet ordre, qui peut être très élevé, n'est pas forcément nécessaire pour obtenir une politique de commande satisfaisante.

2.4. synthèse avec contrainte sur l'ordre du correcteur

La formulation par LMI permet d'envisager la synthèse H_∞ avec une contrainte d'ordre : cette dernière introduit une contrainte de rang qui fait perdre la convexité du problème, mais des heuristiques dédiées à ce type de problèmes peuvent être employées avec efficacité. On pourra consulter [36] pour différents exemples traités par la méthode proposée par [8], et [37, 39] pour des applications de l'algorithme proposé dans [10].

3. la μ -analyse

En ce qui concerne l'analyse de robustesse, il est clair aujourd'hui que la représentation par Transformation Fractionnaire Linéaire (LFT) et la valeur singulière structurée μ , apparues au début des années 80, ont constitué des avancées majeures, perceptibles notamment par le changement qu'elles ont induit dans la façon de raisonner : elles rendent en effet possibles la description et l'analyse de propriétés sur une famille de modèles, et donc une étude précise et quantifiée des propriétés de robustesse d'une loi de commande.

3.1. LFT et valeur singulière structurée

La μ -analyse utilise le schéma général de la figure 2 (dont on peut noter la parenté avec celui utilisé en synthèse H_∞) : toutes les incertitudes de modèle sont rassemblées dans la matrice $\Delta(s)$; la matrice de transfert $H(s)$ – qui dans le cas d'un système asservi dépend évidemment du correcteur – modélise les interconnexions entre les entrées w , les sorties e , et les signaux v et z qui permettent de faire intervenir les incertitudes.

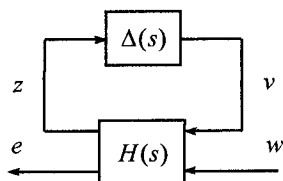


Figure 2. – Représentation par LFT des incertitudes de modélisation

Si la matrice de transfert $H(s)$ peut être quelconque, il n'en va pas de même de la matrice $\Delta(s)$, qui possède une structure particulière. Typiquement, cette matrice sera bloc-diagonale, et composée d'une part de fonctions ou matrices de transfert (représentant les phénomènes dynamiques négligés ou incertains), d'autre part de blocs diagonaux réels (représentant les incertitudes paramétriques). Dans ce qui suit, on appellera \mathbf{S} l'ensemble de toutes les matrices complexes de taille et de structure identiques

à celles de $\Delta(s)$ (en d'autres termes, $\Delta(s) \in \mathbf{S}$ pour toute valeur de s).

Soit M une matrice complexe de même dimension que $\Delta(s)$. La valeur singulière structurée de M , relative à l'ensemble \mathbf{S} , est définie par :

$$\mu_{\mathbf{S}}(M) = \left(\inf_{\Delta \in \mathbf{S}} (\bar{\sigma}(\Delta) : \det(I - \Delta M) = 0) \right)^{-1} \quad (3)$$

3.2. principaux résultats de robustesse

La valeur singulière structurée permet d'établir différents résultats [9]. Ainsi :

– si $H(s)$ est stable, le système de la figure 2 est stable pour toute matrice $\Delta(s)$ telle que $\|\Delta(s)\|_\infty < \alpha$ si et seulement si :

$$\forall \omega \in \mathbf{R}, \mu_{\mathbf{S}}(H_{11}(j\omega)) \leq 1/\alpha \quad (4)$$

– si de plus $\|H_{22}(s)\|_\infty < 1$, le système de la figure 2 a une norme H_∞ inférieure à 1 pour toute matrice $\Delta(s)$ telle que $\|\Delta(s)\|_\infty < 1$ si et seulement si :

$$\forall \omega \in \mathbf{R}, \mu_{\mathbf{S}'}(H(j\omega)) \leq 1 \quad (5)$$

où \mathbf{S}' est obtenu en complétant \mathbf{S} par des matrices complexes quelconques de mêmes dimensions que $H_{22}(s)$.

Le premier résultat est clairement un résultat de robustesse de la stabilité aux incertitudes de modélisation. Le second est un résultat de robustesse des performances, puisqu'il garantit que chaque fonction de transfert $T_{e_i w_j}(s)$ a un gain inférieur à 1 pour toutes les fréquences.

3.3. mise en œuvre

La mise sous forme LFT, nécessaire à cette approche, n'est certes pas une étape triviale en présence d'incertitudes paramétriques : en dehors des modèles affines en les paramètres incertains [30], il n'existe pas en effet de solution définitive, dans la mesure où les algorithmes proposés [4, 25, 3, 7, 15] ne garantissent pas que la matrice rassemblant les incertitudes soit de dimension minimale. Une procédure alternative consiste à construire la forme LFT sans préoccupation de minimalité, puis à utiliser un algorithme de réduction multidimensionnelle (exacte ou approchée). On pourra consulter [23] pour l'application de différents algorithmes de réduction, obtenus notamment à partir des travaux de [5].

Par ailleurs, le calcul exact de la valeur singulière structurée est un problème de complexité non polynomiale en dehors de cas simples. On sait cependant rechercher une borne supérieure en général peu pessimiste, en résolvant un problème d'optimisation sous contraintes LMI [11, 40].

Un point faible des procédures de μ -analyse réside dans l'évaluation du maximum de cette borne supérieure à partir d'un échantillonnage en fréquence, procédé assez peu élégant mais

aussi dangereux en présence de pics, ou de discontinuités, de la fonction μ . Différentes approches ont été développées pour remédier à ce problème : l'utilisation de la valeur singulière structurée dissymétrique permet de considérer la fréquence comme un paramètre incertain traité d'une façon particulière [21, 13, 16]. Une autre approche consiste à déterminer, à partir des résultats de l'optimisation pour une fréquence donnée, un intervalle de fréquences sur lequel on peut garantir que la valeur singulière structurée est inférieure à un niveau donné [26, 12, 38].

4. la μ -synthèse

D'un abord séduisant, la μ -synthèse combine les 2 approches précédentes, en cherchant un correcteur qui garantisse que la norme H_∞ du système reste inférieure à un niveau γ donné, ce système étant explicitement soumis à différentes incertitudes de modèle. On considère pour cela le schéma de la figure 3. En supposant, sans perte de généralité, que le niveau γ à satisfaire est égal à 1 et que $\|\Delta(s)\|_\infty < 1$, le correcteur $K(s)$ doit assurer que la valeur singulière structurée du transfert de $(v \ w)^T$ vers $(z \ e)^T$ soit inférieure à 1 pour toutes les fréquences.

A la différence des problèmes de synthèse H_∞ et de calcul de μ , celui-ci n'est pas convexe. Différentes heuristiques ont été proposées sans garantie de convergence, même vers un minimum local [9, 41]. Une utilisation intelligente de cette technique consiste donc à l'employer avec un nombre d'incertitudes limité, en sélectionnant les plus pénalisantes. Elle ne dispense évidemment pas d'une analyse plus fine, effectuée *a posteriori*, des performances et des propriétés de robustesse obtenues.

5. analyse et synthèse de systèmes LPV

L'utilisation d'un correcteur fixe, même « robuste », n'est pas envisageable pour des processus dont les paramètres varient fortement. Si l'on peut décrire celui-ci par un système Linéaire à Paramètres Variant (système LPV), il est possible d'analyser ses performances ou ses propriétés de robustesse, et de rechercher un correcteur sous la même forme [32, 1, 2, 33] : celui-ci comporte une réplique des paramètres variant, et s'adapte donc à l'évolution de ceux-ci [22].

Il est intéressant de noter que les outils mis en œuvre dans ce problème sont de même nature que ceux utilisés par les approches précédentes, à savoir la représentation par LFT et la formulation comme un problème d'optimisation sous contraintes LMI.

Plus généralement, ces dernières années ont vu un développement considérable des approches consistant à traduire les problèmes d'analyse et de synthèse au moyen de LMI. Les 2 paragraphes suivants donnent 2 autres types d'applications.

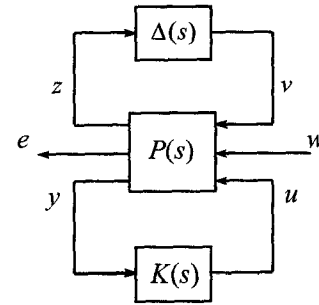


Figure 3. – Problème de synthèse robuste

6. synthèse multi-modèle

Une approche de la robustesse peut être de chercher un correcteur unique qui garantisse des propriétés sympathiques pour un nombre fini de modèles (représentant par exemple un même processus pour différentes configurations paramétriques). Dans le cadre H_∞ , cette approche est possible à partir d'une formulation par LMI de la synthèse H_∞ par « loop-shaping », tout en imposant l'ordre du correcteur [29, 37].

7. synthèse multi-critère

L'évaluation des performances d'un système ou la synthèse d'un correcteur peut se faire suivant différents critères mathématiques. On peut par exemple chercher à :

- limiter la norme H_∞ d'un transfert particulier
- minimiser la norme H_2 d'un autre transfert
- obtenir un régime transitoire au moins aussi rapide que la fonction $e^{-\alpha t}$ (avec $\alpha > 0$)
- placer les pôles du système asservi dans une région du plan complexe
- limiter la commande à une valeur donnée, pour un ensemble de conditions initiales spécifiées

Moyennant certaines hypothèses, ces objectifs (dont la liste n'est pas limitative) peuvent se formuler comme des contraintes LMI, et donc déboucher sur des procédures de synthèse de correcteur. On trouvera un nombre important de critères avec leur mise en forme pour l'analyse et la synthèse dans les références [14, 34, 35].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. Apkarian, J.M. Biannic, P. Gahinet, «Self-Scheduled H_∞ Control of Missiles via Linear Matrix Inequalities», *J. of Guidance, Control and Dynamics*, vol. 18, p. 532–538, 1995.
- [2] P. Apkarian, P. Gahinet. «A Convex Characterization of Gain-Scheduled H_∞ Controllers», *IEEE Trans. Autom. Control*, AC 40, p. 853–864, 1995.
- [3] C. Beck, «Minimality for Uncertain Systems and IQC's», *33rd IEEE Conf. on Decision and Control*, p. 3068–3073, Lake Buena Vista, 1994.

- [4] C.M. Belcastro, B.C. Chang, «On Parametric Uncertainty Modeling for Real Parameter Variations», *31st IEEE Conf. on Decision and Control*, p. 674–679, Tucson, 1992.
- [5] C. Beck, J. Doyle, F. Glover, «Model Reduction of Multi-Dimensional and Uncertain Systems», *IEEE Trans. Autom. Control*, AC 41, p. 1466–1477, 1996.
- [6] S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Féron, V. Balakrishnan, *Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory*, SIAM Publications, 1994.
- [7] Yi Cheng, B. De Moor, «A Multidimensional Realization Algorithm for Parametric Uncertainty Modelling and Multiparameter Margin Problems», *Int. J. Control*, vol. 60, p. 789–807, 1994.
- [8] J. David, B. De Moor, «Designing Reduced Order Output Feedback Controllers Using a Potential Reduction Method», *American Control Conf.*, p. 845–849, Baltimore, 1994.
- [9] J.C. Doyle, «Structured Uncertainty in Control Systems Design», *24th IEEE Conf. on Decision and Control*, p. 260–265, Ft Lauderdale, 1985.
- [10] L. El Ghaoui, F. Oustry, M. AitRami, «A Cone Complementary Linearization Algorithm for Static Output Feedback and Related Problems», *IEEE Trans. Autom. Control*, AC 42, p. 1171–1175, 1997.
- [11] M.K.H. Fan, A. Tits, J.C. Doyle, «Robustness in the Presence of Mixed Parametric Uncertainty and Unmodeled Dynamics», *IEEE Trans. Autom. Control*, AC 36, p. 25–38, 1991.
- [12] G. Ferreres, J.M. Biannic, «A μ -Analysis Technique without Frequency Gridding», *American Control Conf.*, p. 2294–2298, Philadelphie, 1998.
- [13] G. Ferreres, V. Fromion, «Computation of the Robustness Margin with the Skewed μ Tool», *Systems & Control Letters*, vol. 32, p. 193–202, 1997.
- [14] J.P. Folcher, *Approche Multicritère par Formulation LMI de la Commande des Systèmes*, Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 1997.
- [15] S. Font, *Méthodologie pour Prendre en Compte la Robustesse des Systèmes Asservis : Optimisation H_∞ et Approche Symbolique de la Forme Standard*, Thèse de Doctorat, Supélec et Paris-Sud, 1995.
- [16] J.P. Friang, G. Duc, J.P. Bonnet, «Robust Autopilot for a Flexible Missile : Loop-Shaping H_∞ Design and Real ν -Analysis», *Int. J. of Robust & Nonlinear Control*, vol. 8, p. 129–153, 1998.
- [17] P. Gahinet, P. Apkarian, «A Linear Matrix Inequality Approach to H_∞ Control», *Int. J. of Robust & Nonlinear Contr.*, vol. 4, p. 421–448, 1994.
- [18] P. Gahinet, «Explicit Controller Formulas for LMI-based H_∞ Synthesis», *American Control Conf.*, p. 2396–2400, Baltimore, Maryland, 1994.
- [19] K. Glover, J.C. Doyle, «State-Space Formulae for all Stabilizing Controllers That Satisfy an H_∞ -Norm Bound and Relations to Risk Sensitivity», *Systems & Control Letters*, vol. 11, p. 167–172, 1988.
- [20] K. Glover, D. McFarlane, «Robust Stabilization of Normalized Coprime Factor Plant Description with H_∞ -Bounded Uncertainty», *IEEE Trans. Autom. Control*, AC 34, p. 821–830, 1989.
- [21] A. Helmersson, «A Finite Frequency Method for μ -Analysis», *3rd European Control Conf.*, p. 171–176, Rome, 1995.
- [22] A. Huret, G. Duc, J.P. Friang, «The Application of an LPV/loop-shaping Synthesis for a Missile Autopilot», *IFAC World Congress*, Beijing, 1999 (à paraître).
- [23] A. Huret, C. Valentin-Charbonnel, G. Duc, J.P. Bonnet, «Different Multi-dimensional Reduction Algorithms for the LFT Model of a Missile», *2nd IMACS Intern. Multiconference CESA'98*, Nabeul-Hammamet, 1998.
- [24] T. Iwasaki, R.E. Skelton, «All Controllers for the General H_∞ Control Problem : LMI Existence Conditions and State-Space Formulas», *Automatica*, vol. 30, p. 1307–1317, 1994.
- [25] P. Lambrechts, J. Terlouw, S. Bannani, M. Steinbuch, «Parametric Uncertainty Modeling using LFTs», *American Control Conf.*, p. 267–272, San Francisco, 1993.
- [26] J.F. Magni, C. Döll, *μ -analysis for Flexible Systems*, Rapport technique, ONERA-CERT, soumis pour publication, 1998.
- [27] D. McFarlane, K. Glover, *Robust Controller Design Using Normalized Coprime Factor Plant Descriptions*, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer Verlag, 1990.
- [28] D. McFarlane, K. Glover, «A Loop Shaping Design Procedure Using H_∞ Synthesis», *IEEE Trans. Autom. Control*, AC 37, p. 759–769, 1992.
- [29] S. Miyamoto, G. Vinnicombe, «Fixed Structure H_∞ Control Design for Multiple Plant. A Coprime Factorisation LMI Based Approach», *4th European Control Conf.*, Bruxelles, 1997.
- [30] B.G. Morton, «New Applications of μ to Real Parameter Variation Problems», *24th IEEE Conf. on Decision and Control*, p. 242–250, Ft Lauderdale, 1985.
- [31] Y. Nesterov, A. Nemirovsky, *Interior Point Polynomial Methods in Convex Programming : Theory and Applications*, SIAM, 1993.
- [32] A. Packard, «Gain Scheduling via Linear Fractional Transformations», *Systems & Control Letters*, vol. 22, p. 79–92, 1994.
- [33] G. Scorletti, L. El Ghaoui, «Improved Linear Matrix Inequality Conditions for Gain Scheduling», *34th IEEE Conf. on Decision and Control*, p. 3626–3631, New-Orleans, 1995.
- [34] C. Scherer, «Multiobjective H_2/H_∞ Control», *IEEE Trans. Autom. Contr.*, AC 40, p. 1054–1062, 1995.
- [35] C. Scherer, P. Gahinet, M. Chilali, «Multiobjective Output-Feedback Control via LMI Optimization», *IEEE Trans. Autom. Contr.*, AC 42, p. 896–911, 1997.
- [36] C. Valentin, G. Duc, «Low Order H_∞ Controller Design : A Practical Analysis of the Potential Reduction Method», *4th European Control Conf.*, Bruxelles, 1997.
- [37] C. Valentin-Charbonnel, *Commande Robuste avec Contrainte d'Ordre, par la Norme H_∞ et le Formalisme LMI. Application au Contrôle d'Attitude d'un Satellite d'Observation de la Terre*, Thèse de Doctorat, Supélec et Paris-Sud, 1998.
- [38] C. Valentin-Charbonnel, G. Duc, «Optimising μ -Analysis without Frequency Gridding. Application to a Satellite Attitude Control Law», *5th European Control Conf.*, Karlsruhe, 1999 (à paraître).
- [39] C. Valentin-Charbonnel, G. Duc, S. Le Ballois, «Low-Order Robust Attitude Control of an Earth Observation Satellite», *Control Engineering Practice*, 1999 (à paraître).
- [40] P.M. Young, M.P. Newlin, J.C. Doyle, «Computing Bounds for the Mixed μ Problem», *Int. J. of Robust & Nonlinear Control*, vol. 5, p. 573–590, 1995.
- [41] P.M. Young, «Controller Design with Mixed Uncertainties», *Int. J. Control*, vol. 65, p. 469–509, 1996.
- [42] G. Zames, «Feedback and Optimal Sensitivity : Model Reference Transformations, Multiplicative Seminorms and Approximate Inverses», *IEEE Trans. Autom. Control*, AC 11, p. 465–476, 1981.

Manuscrit reçu le 1 mars 1999.

L'AUTEUR

Gilles DUC



Gilles Duc, diplômé de l'École Supérieure d'Électricité en 1978, a soutenu sa Thèse en 1981 au Laboratoire des Signaux et Systèmes, dirigé à l'époque par Bernard Picinbono. Professeur à l'École Supérieure d'Électricité, il encadre des doctorants depuis 1989. Ses centres d'intérêt sont l'analyse de la robustesse des lois de commande aux incertitudes de modélisation et le développement de procédures de synthèse de commandes robustes. Ses recherches sont menées avec le souci de faire le lien entre des résultats théoriques récents et des applications sur des problèmes concrets, pour la plupart issu du domaine aérospatial.