



Projet de collaboration

Institut FARMAN, ENS Cachan

entre les laboratoires LSV et SATIE

Projet TOAST

**Théorie des jeux, Outils de l'automatique, de
l'Algorithmique et du Signal pour les Télécommunications**

Porteurs du projet :

Marc Jungers (SATIE) et Nicolas Markey (LSV)

1 Introduction

Les systèmes à commander dans le domaine industriel sont désormais de plus en plus complexes et de plus en plus nombreux, qu'il s'agisse du domaine des télécommunications, de la gestion de robots, des sciences économiques ou de l'automobile. Depuis un certain nombre d'années les études portent tout particulièrement sur la gestion des systèmes embarqués. Il s'agit généralement de systèmes distribués, c'est-à-dire de systèmes que l'on peut décomposer en sous-systèmes (identiques ou non) qui communiquent entre eux. Les actions des sous-systèmes ne sont souvent que locales et non globales. Cette catégorie de systèmes est à opposer aux systèmes centralisés, qui, même s'ils peuvent être décomposés en sous-systèmes, sont soumis à l'action globale d'un des sous-systèmes appelé coordinateur ou organe central.

La modélisation du problème de commande peut se formaliser comme un problème d'optimisation multi-entrées et multi-objectifs, car à chaque sous-système, il est possible de définir une entrée de commande et un objectif qui se traduit par l'optimisation d'un critère propre. Ce type de problème ne mène généralement pas à un problème global d'optimisation convexe. Les techniques classiques adaptées aux problèmes de commande des systèmes centralisés ne s'appliquent pas ici. Il est nécessaire de définir des compromis ou équilibres pour obtenir une solution à ce type de problème. La théorie des jeux étant la science qui s'attache à la prise de décision pour les systèmes où l'objectif propre de chaque entrée (appelée joueur) dépend de l'action de tous les autres, c'est un cadre naturel à la détermination de commandes pour ce type de problème multi-objectifs [10, 39].

L'application de la commande multi-objectifs qui nous intéresse dans ce projet est la commande de puissance de transmission dans les lignes d'abonnés numériques (*DSL* pour Digital Subscriber Lines), avec plusieurs utilisateurs [43]. Il s'agit d'un problème d'optimisation ou d'*allocation de ressources*. Une technique classique pour ce problème est le *water-filling* [41, 18]. Pour un utilisateur, la performance est représentée par le débit utile des données transmises, dont le maximum, appelé *capacité de canal*, a été déterminé par Shannon [12]. Ce débit est fonction du rapport signal sur bruit et interférence liée à la présence d'autres utilisateurs (*SINR* Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio).

Le débit offert à chaque utilisateur dépend donc non seulement de sa propre allocation de puissance, mais aussi des allocations de puissance des autres utilisateurs. Le phénomène d'interférence entre utilisateurs est appelé *diaphonie* [47] : il existe deux types de diaphonies : la paradiaphonie (*NEXT* Near-End Crosstalk), qui correspond à la perturbation du signal que reçoit un utilisateur par les signaux émis dans son environnement et la télédiaphonie (*FEXT* Far-End Crosstalk), qui correspond à la perturbation du signal que reçoit un utilisateur par les signaux reçus par d'autres utilisateurs distants.

Ce phénomène d'interférence entre utilisateurs est souvent, par rapport au bruit de fond, la perturbation prépondérante. Ceci est d'autant plus vrai que les fréquences augmentent pour les utilisations actuelles (*VDSL* Very high Digital Subscriber Lines). Le même phénomène d'interférence intervient aussi dans les liaisons hertziennes. En réalité, le modèle à prendre en considération est plus complexe car il faut tenir compte des modifications temporelles des canaux (applications à la téléphonie portable par exemple),

mais aussi du fait que les puissances à allouer dépendent de la fréquence.

La synthèse de la puissance de transmission de chaque utilisateur doit réaliser un compromis. Effectivement la puissance de transmission doit être suffisante pour obtenir un SINR et donc un débit suffisant. En revanche, une puissance de transmission trop élevée perturbera les voisins et incitera les autres joueurs à augmenter leur propre puissance, ce qui dégradera le SINR. Dans les télécommunications sans fils, cette puissance de transmission est aussi limitée par les ressources en énergie (batterie) des portables [20].

La littérature sur la commande de puissance de transmission est — bien que récente — déjà riche sur l’approche par la théorie des jeux [36, 37, 48, 35, 46, 4, 38, 11, 25, 42, 40]. Les équilibres de Nash et de Stackelberg sont déjà utilisés comme modélisation du problème d’optimisation multi-critères et certains résultats sont notables sur l’existence et l’unicité de ces équilibres dans certains cas spécifiques [25, 11, 38, 4].

Nous nous proposons ici d’approfondir cette approche par une modélisation de systèmes dynamiques et aussi d’utiliser une modélisation par automates. Ce genre de modèle est très utilisé dans le domaine de la vérification de systèmes réactifs, notamment pour les techniques de *model-checking* [14, 19]. Le *model-checking* est une technique permettant de vérifier de manière complètement automatique et exhaustive qu’un (modèle d’un) système satisfait un ensemble de (formules exprimant des) propriétés. Au cours des quinze dernières années, les techniques de *model-checking* ont été étendues et adaptées dans plusieurs directions, dont deux nous intéressent particulièrement ici :

- d’une part, pour ajouter une dimension « quantitative » aux modèles et aux propriétés que l’on vérifie [6, 5, 7]. L’objectif initial était d’inclure une notion quantitative de temps dans les propriétés que l’on vérifie (par exemple, « *une demande d’accès à un canal est servie en moins de 10 unités de temps* »). Du point de vue de la modélisation, cela a conduit à la définition des *automates temporisés* : ce sont des automates équipés d’horloges, ces horloges permettant de mesurer le temps passé dans un état, ou le temps séparant deux évènements.

Outre la notion du temps, les automates ont également été étendus avec d’autres notions quantitatives : automates à coûts [9, 13] (permettant, par exemple, de modéliser la consommation d’énergie ou la quantité de données émises au cours de l’exécution), automates probabilistes [32, 45], ...

- d’autre part, pour étendre le problème du model-checking au domaine du contrôle et de la synthèse de contrôleurs [44, 8]. Le but est alors de décider s’il est possible de *guider* un système (en restreignant ses comportements) de telle sorte qu’il satisfasse un objectif donné. Bien entendu, lorsque la réponse à ce problème est positive, on souhaite également pouvoir construire le *contrôleur* qui permet de réaliser cet objectif.

Ce problème est, là encore, très proche de la théorie des jeux : il s’agit en effet de synthétiser une *stratégie* permettant, quoi qu’il arrive (c-à-d., quoi que fassent les adversaires), d’atteindre un objectif (par exemple, d’éviter certains états « indésirables » de l’automate).

L’utilisation des automates constitue l’originalité forte de notre approche, par rapport à la littérature existante.

2 Présentation des équipes et des compétences spécifiques

Le projet TOAST dans le cadre de l'Institut Fédératif de Recherche Farman a pour vocation de rapprocher des composantes de deux laboratoires de l'ENS de Cachan : les axes TEMPO (vérification de systèmes temporisés) et INFINI (algorithmique de la vérification symbolique) du Laboratoire Spécification et Vérification (LSV, UMR CNRS-ENS Cachan 8643) et l'équipe Traitement de l'Information Multicapteur (TIM) du Laboratoire Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Energie (SATIE, UMR CNRS-ENS Cachan 8029). L'équipe TIM du laboratoire SATIE regroupe entre autres l'activité d'automatique et du traitement du signal – télécommunications du laboratoire. Les treize personnes impliquées dans ce projet sont

| Nom | Prénom | Position | Lab. | Temps |
|------------------|----------------|---------------------------|--------------|-------|
| Abbas-Turki | Mohamed | M.d.C., ENS Cachan | SATIE | 10% |
| Barbot | Jean-Pierre | M.d.C., ENS Cachan | SATIE | 10% |
| Bay | Stéphanie | Doctorante ENS Cachan | SATIE | 5% |
| Bouyer | Patricia | C.R., CNRS | LSV | 5% |
| Brihayé | Thomas | Post-doc., ENS Cachan | LSV | 10% |
| Franco Driemeyer | Ana Lúcia | Post-doc., ENS Cachan | SATIE | 5% |
| Geller | Benoît | M.d.C., délég. ENS Cachan | SATIE | 15% |
| Jungers | Marc | Ag.Pr., ENS Cachan | SATIE | 20% |
| Laroussinie | François | M.d.C., ENS Cachan | LSV | 10% |
| Larzabal | Pascal | P.U., Paris Sud 11 | SATIE | 5% |
| Markey | Nicolas | C.R., CNRS | LSV | 20% |
| Oreiby | Ghassan | Doctorant ENS Cachan | LSV | 10% |
| Schnoebelen | Philippe | D.R., CNRS | LSV | 5% |

Il est naturel d'associer sur un tel projet les composantes de ces deux laboratoires. Effectivement ces équipes ont déjà acquis une expérience reconnue sur des domaines qui correspondent à différents aspects de ce projet. Il est possible de mettre en avant les expertises suivantes :

- La composante « automatique » du laboratoire SATIE s'attache à étudier la robustesse des commandes multi-objectifs issues de la théorie des jeux, dans le cadre des systèmes modélisés par une représentation d'état à temps continu [26, 2]. Les diverses stratégies de Nash (rôles identiques pour les joueurs) et de Stackelberg (rôles hiérarchisés pour les joueurs) sont déjà considérées. Selon les classes admissibles de commandes, ces stratégies mènent à la résolution d'équations différentielles de type Riccati [1, 28, 30, 27], qui s'avère complexe ou de problèmes Problèmes Semi-Définis, sous contraintes d'Inégalités Matricielles Linéaires [29]. Des liens entre théorie des jeux et commande mixte $\mathcal{H}_2 / \mathcal{H}_\infty$ [31] sont mis en avant.
- La composante « traitement du signal – télécommunications » du laboratoire SATIE est reconnue pour son expertise dans le domaine des *turbo-codes blocs* et de la *synchronisation de phase*. Plusieurs articles de conférences, dont [24] et les références indiquées dans la thèse de Christophe Vanstraceele [47] attestent cette

reconnaissance. Aussi le dépôt de plusieurs brevets dont [23, 22] permettent à cette composante du laboratoire SATIE d'apporter une expérience cruciale dans le choix des modèles et surtout des approximations faites, afin que le cadre de travail reste réaliste pour le monde industriel [21].

- Le LSV s'intéresse aux problèmes de vérification de systèmes réactifs (systèmes embarqués, systèmes critiques, ...), et plus particulièrement aux techniques de *model-checking* et de synthèse de contrôleurs. Dans l'axe TEMPO du LSV, ces thèmes sont étudiés plus particulièrement dans le cadre des systèmes temps-réel [3, 34, 16, 33, 15, 17]. L'axe INFINI du LSV développe des techniques symboliques de vérification de systèmes infinis (systèmes paramétrés, systèmes à pile, ...).

Au cours des trois dernières années, en particulier dans le cadre de l'Action Concertée Incitative CORTOS (portée par Patricia Bouyer), le LSV a acquis une expertise importante dans le domaine de la synthèse de contrôleurs pour les systèmes temporisés et leurs extensions (automates temporisés à coûts, ...). Le LSV a par ailleurs de nombreuses collaborations nationales (LIAFA, IRCCyN, LaBRI, VERIMAG, ...) et internationales (Universités d'Aalborg, de Bruxelles, d'Oxford, de Chennai, ...)

Les deux équipes prennent également une part active dans le développement d'outils de vérification. L'axe INFINI a développé l'outil FAST, qui permet d'accélérer le calcul de l'ensemble des états accessibles dans des systèmes à compteurs. L'axe TEMPO a participé au développement (tant théorique que pratique) de l'outil Uppaal, l'outil de model-checking de systèmes temporisés le plus puissant actuellement.

L'association de ces différentes composantes nous semble donc être un atout essentiel pour la réussite d'un tel projet de recherche.

3 Objectifs

L'objectif principal de ce projet de recherche est de rapprocher des activités de recherche proches de deux laboratoires (LSV et SATIE) au sein de l'Institut Farman et d'enrichir les différentes approches par les diverses expériences des équipes. Il s'agit d'étudier comment il est possible de concilier les modélisations par automate et par représentation d'état d'un même système. L'application proposée porte sur les télécommunications, qui est à l'heure actuelle un thème très dynamique de la recherche internationale.

Ce projet s'inscrit également dans la volonté du GDR MACS (Groupe de Recherche CNRS Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes dynamiques) de rapprocher les domaines de l'automatique et de l'informatique du domaine du traitement du signal, en particulier par la participation à des congrès mixtes nationaux (GRETSI par exemple) ou internationaux.

La durée estimée du présent projet est estimée à deux années. Nos ambitions sur cette période sont de pouvoir publier 4 à 6 communications de congrès dans les différents domaines, ainsi qu'une ou deux publications dans des revues internationales.

Une remise de deux rapports (l'un à mi-parcours et l'autre en fin de parcours) est prévue, de façon à mettre en valeur les résultats et publications réalisés. Une page web peut aussi être conçue pour améliorer la visibilité de notre projet de recherche.

4 Axes de recherche envisagés

Le projet TOAST est avant tout un projet de recherche exploratoire. Comme indiqué précédemment, une part importante du projet sera d'établir le lien avec les automates, afin de correctement poser le problème. Les différentes étapes de la recherche sont indiquées ci-dessous :

Modélisation. La première étape consiste à modéliser le problème d'automatique sous la forme d'automates. Il nous semble que cela nécessitera, du moins dans un premier temps, de discrétiser le modèle. En effet, bien qu'il soit possible de modéliser fidèlement le problème en utilisant des *systèmes hybrides* (qui permettent en particulier de manipuler des variables dont l'évolution suit une équation différentielle), il a été montré que le problème de l'accessibilité dans ces automates est indécidable. Une telle modélisation serait donc peu utilisable.

Nous nous orientons donc vers une modélisation sous la forme d'un ensemble d'automates temporisés, éventuellement étendus avec des *coûts* permettant de modéliser, par exemple, la consommation d'énergie ou la quantité de données émises.

Vérification. Une fois le modèle construit, nous pourrions utiliser les outils classiques de simulation et de vérification afin de s'assurer de la fidélité du modèle au système de départ, synthétiser un contrôleur efficace et vérifier des propriétés du système contrôlé. Dans un premier temps, nous devrions probablement nous limiter à un cadre simple, bien que réaliste pour les télécommunications par lignes fixes :

- nombre d'utilisateurs constant ;
- les canaux ont des caractéristiques fixes, qui en particulier n'évoluent pas dans le temps ;
- ces caractéristiques de canaux sont connues avec certitude ;
- les niveaux de puissances sont indépendants de la fréquence dans la bande fréquentielle considérée.

Les résultats obtenus pourront ainsi être comparés aux méthodes classiques déjà mises en œuvre, afin de valider la pertinence de notre approche originale grâce à la modélisation par des automates.

À partir de ce point d'avancement dans le projet, certaines hypothèses contraignantes pourront être relâchées, permettant la prise en compte éventuelle :

- de l'évolution du nombre d'utilisateurs,
- de l'évolution des caractéristiques du canal,
- d'incertitudes des paramètres du canal,
- de la dépendance fréquentielle des puissances de transmission.

Ce projet de recherche est aussi l'occasion d'appliquer les perfectionnements obtenus des outils de la théorie des jeux pour les systèmes dynamiques à la commande de puissance pour les télécommunications, l'idée ici étant d'étendre les équations matricielles de Riccati (commande robuste utilisant un filtre de Kalman [46]) à des équations matricielles couplées de type Riccati de la théorie des jeux.

5 Besoins

Le projet n'incluant pas encore de validation sur une maquette, mais uniquement des validations par simulations à l'aide de logiciels déjà disponibles pour les autres activités des laboratoires LSV et SATIE, les besoins portent principalement sur une reconnaissance des tutelles dans le cadre de l'Institut Farman, vis-à-vis d'une visibilité extérieure et sur un soutien financier. Une meilleure connaissance des domaines implique un achat supplémentaire d'ouvrages de références. Un point crucial est de communiquer sur les résultats obtenus et de les confronter aux autres études du domaine. L'idéal serait de pouvoir participer à 4 à 6 conférences (inscriptions et déplacement compris). Une estimation des besoins financiers est indiquée dans le tableau suivant :

| Objet | Estimation du coût | Laboratoire |
|------------------|---------------------------|--------------------|
| Achat d'ouvrages | 500 € | LSV |
| Achat d'ouvrages | 500 € | SATIE |
| Conférences | $3 \times 1\,500$ € | LSV |
| Conférences | $3 \times 1\,500$ € | SATIE |
| Total | 10 000 € | |

Bibliographie

- [1] H. Abou-Kandil, G. Freiling, V. Ionescu et G. Jank. *Matrix Riccati Equations in Control and Systems Theory*. Birkhäuser, 2003.
- [2] H. Abou-Kandil et M. Jungers. *Commande optimale*, chapitre Commande optimale multicritère : introduction à la théorie des jeux. Hermès, 2004.
- [3] L. Aceto et F. Laroussinie. Is your model checker on time? On the complexity of model checking for timed modal logics. *Journal of Logic and Algebraic Programming*, 52-53:7–51, Août 2002.
- [4] T. Alpcan et T. Başar. *Advances in Dynamic Games : Applications to Economics, Finance, Optimization, and Stochastic Control, Annals of Dynamic Games*, volume 7, chapitre Distributed Algorithms for Nash Equilibria of Flow Control Games, pages 473–498. Birkhäuser, 2005.
- [5] R. Alur, C. Courcoubetis et D. L. Dill. Model-checking in dense real-time. *Information & Computation*, 104(1):2–34, 1993.
- [6] R. Alur et D. L. Dill. A theory of timed automata. *Theoretical Computer Science*, 126(2):183–235, 1994.
- [7] R. Alur et T. A. Henzinger. Real-time logics : Complexity and expressiveness. *Information & Computation*, 104(1):35–77, 1993.
- [8] R. Alur, T. A. Henzinger et O. Kupferman. Alternating-time temporal logic. *Journal of the ACM*, 49(5):672–713, 2002.
- [9] R. Alur, S. La Torre et G. J. Pappas. Optimal paths in weighted timed automata. In *Proc. 4th Intl. Workshop Hybrid Systems : Computation and Control (HSCC'01)*, volume 2034 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 49–62. Springer, 2001.
- [10] T. Başar et G. J. Olsder. *Dynamic Noncooperative Game Theory*. SIAM, 1995.
- [11] T. Başar et R. Srikant. A stackelberg network game with a large number of followers. *J. Optimization Theory and Applications*, 115(3):479–490, December 2002.
- [12] G. Battail. *Théorie de l'information*. Masson, 1997.
- [13] G. Behrmann, A. Fehnker, Th. Hune, K. G. Larsen, P. Pettersson, J. Romijn et F. Vaandrager. Minimum-cost reachability for priced timed automata. In *Proc. 4th Intl. Workshop Hybrid Systems : Computation and Control (HSCC'01)*, volume 2034 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 147–161. Springer, 2001.

- [14] B. Bérard, M. Bidoit, A. Finkel, F. Laroussinie, A. Petit, L. Petrucci et Ph. Schnoebelen. *Systems and Software Verification. Model-Checking Techniques and Tools*. Springer, 2001.
- [15] P. Bouyer, L. Bozzelli et F. Chevalier. Controller synthesis for MTL specifications. In C. Baier et H. Hermanns, éditeurs, *Proceedings of the 17th International Conference on Concurrency Theory (CONCUR'06)*, volume 4137 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 450–464, Bonn, Germany, Août 2006. Springer.
- [16] P. Bouyer, F. Cassez et F. Laroussinie. Modal logics for timed control. In M. Abadi et L. de Alfaro, éditeurs, *Proceedings of the 16th International Conference on Concurrency Theory (CONCUR'05)*, volume 3653 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 81–94, San Francisco, CA, USA, Août 2005. Springer.
- [17] P. Bouyer, K. G. Larsen, N. Markey et J. I. Rasmussen. Almost optimal strategies in one-clock priced timed automata. In N. Garg et S. Arun-Kumar, éditeurs, *Proceedings of the 26th Conference on Foundations of Software Technology and Theoretical Computer Science (FSTTCS'06)*, volume 4337 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 346–357, Kolkata, India, Décembre 2006. Springer. To appear.
- [18] M. Chiang, C. W. Tan, D. P. Palomar, D. O'Neill et D. Julian. Power control by geometric programming. *à paraître dans IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2007.
- [19] E. M. Clarke, O. Grumberg et D. A. Peled. *Model Checking*. MIT Press, 1999.
- [20] X. Fan, T. A. , M. Arcak, T. J. Wenc et T. Başar. A passivity approach to game-theoretic cdma power control. *Automatica*, 42(11):1837–1847, November 2006.
- [21] B. Geller. *MIDAS Technical Report, WP2-C01, rapport final d'activité*. Medea+A110 MIDAS, 2005.
- [22] B. Geller. Procédé de paramétrage d'une transmission de bits pour système à porteuses multiples avec voie de retour. Rapport technique BR 25767/EP/FL, ENS Cachan, 2006.
- [23] B. Geller, J. P. Barbot, J. M. Brossier et C. Vanstraceele. Procédé de décodage itératif de codes blocs et dispositif décodeur correspondant. Rapport technique 04O6291, ENS Cachan, 2004.
- [24] B. Geller, I. Diatta, A. Wei, F. Rambeau et J. M. Brossier. Power masks for low-complexity very high bit rate multi-carrier local loop. In *VTC*, 2006.
- [25] O. Ç. İmer et T. Başar. *Constructive solutions to a decentralized team problem with application in flow control for networks*, chapitre Topics in Control and Its Applications, pages 117–141. Springer Verlag, 1999.
- [26] M. Jungers. *Commande robuste multicritère : une approche par la théorie des jeux*. Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Septembre 2006.
- [27] M. Jungers. On Stackelberg linear quadratic games with time preference rate. *Soumis à IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006.

- [28] M. Jungers et H. Abou-Kandil. Properties of coupled Riccati equations in Stackelberg games with time preference rate. *In IFAC SSSC*, Oaxaca, Mexico, December 2004.
- [29] M. Jungers, E. B. Castelan, E. R. D. Pieri et H. Abou-Kandil. Bounded Nash equilibrium for uncertain linear systems. *Deuxième relecture, Automatica*, 2006.
- [30] M. Jungers, E. D. Pieri et H. Abou-Kandil. Solving coupled algebraic Riccati equations from closed-loop Nash strategy, by lack of trust approach. *In 13th IFAC Workshop on Control Applications of Optimisation, CAO'06*, Cachan, France, 26-28 Avril 2006.
- [31] M. Jungers, E. Trélat et H. Abou-Kandil. Commande mixte $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$: une approche par la stratégie de Stackelberg. *JESA accepté*, 2006.
- [32] M. Z. Kwiatkowska, G. Norman, R. Segala et J. Sproston. Verifying quantitative properties of continuous probabilistic timed automata. *In Proc. 11th Int. Conf. Concurrency Theory (CONCUR 2000)*, University Park, PA, USA, Aug. 2000, volume 1877 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 123–137. Springer, 2000.
- [33] F. Laroussinie, N. Markey et G. Oreiby. Model checking timed ATL for durational concurrent game structures. *In E. Asarin et P. Bouyer, éditeurs, Proceedings of the 4th International Conference on Formal Modelling and Analysis of Timed Systems (FORMATS'06)*, volume 4202 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 245–259, Paris, France, Septembre 2006. Springer.
- [34] F. Laroussinie et J. Sproston. Model checking durational probabilistic systems. *In V. Sassone, éditeur, Proceedings of the 8th International Conference on Foundations of Software Science and Computation Structures (FoSSaCS'05)*, volume 3441 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 140–154, Edinburgh, U.K., Avril 2005. Springer.
- [35] J. Lee, R. V. Sonalkar et J. M. Cioffi. A multi-user power control algorithm for digital subscriber lines. *IEEE Communications Letters*, 9(3):193–195, March 2005.
- [36] A. B. MacKenzie et S. B. Wicker. Game theory and the design of self-configuring, adaptive wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, November 2001.
- [37] A. B. MacKenzie et S. B. Wicker. Game theory in communications : Motivation, explanation and application to power control. *In GlobeCom2001*, pages 821–826, San Antonio, Texas, November 2001.
- [38] R. T. Maheswaran et T. Başar. Multi-user flow control as a Nash game : Performance of various algorithms. *In Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 1090–1095, December 1998.
- [39] J. V. Neumann et O. Morgenstern. *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University press, 1944.
- [40] D. P. Palomar, J. M. Cioffi et M. A. Lagunas. Uniform power allocation in MIMO channels : A game-theoretic approach. *IEEE Transactions on Information Theory*, 49(7):1707–1727, July 2003.

- [41] D. P. Palomar et J. Fonollosa. Practical algorithms for a family of waterfilling solutions. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 53(2):686–695, February 2005.
- [42] D. P. Palomar, M. A. Lagunas et J. M. Cioffi. Optimum linear joint transmit-receive processing for mimo channels with QoS constraints. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 52(5):1179–1197, May 2004.
- [43] J. G. Proakis. *Digital Communications*. McGraw-Hill International Editions, 1995.
- [44] P. J. Ramadge et W. M. Wonham. Supervisory control of a class of discrete event processes. *SIAM J. Control Optim.*, 25(1):206–230, 1987.
- [45] M. Stoelinga. *Alea jacta est : verification of probabilistic, real-time and parametric systems*. Thèse de Doctorat, University of Nijmegen, the Netherlands, Avril 2002.
- [46] A. Subramanian et A. H. Sayed. Joint rate and power control algorithms for wireless networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 53(11):4204–4214, November 2005.
- [47] C. Vanstraceele. *Turbo Codes et estimation paramétrique pour les communications à haut débit*. Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2005.
- [48] W. Yu, G. Ginis et J. Cioffi. Distributed multiuser power control for digital subscriber lines. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20(5):1105–1115, June 2002.