

Activités de recherche

Euriell Le Corrond

2 avril 2013

Ce document présente mes activités de recherche réalisées entre 2008 et 2012 en tant que Doctorante et ATER au LISA (Angers), puis durant l'année 2012/2013 en tant que Post-Doctorante au LJK (Grenoble) et en collaboration avec l'INRIA (équipe SPADES). Les références bibliographiques citées entre parenthèses (\cdot) sont les articles issus de ma bibliographie personnelle présentée dans la section 3 (Liste des publications).

1 Travaux de thèse et d'ATER - 2008/2012 LISA, Université d'Angers

Mots-clés : Systèmes à Événements Discrets, Algèbres (Min,+) et (Max,+), Network Calculus, Évaluation de Performance, Régulation de Flux, Window Flow Control

1.1 Introduction

Lors de mes quatre années au LISA en tant que Doctorante puis ATER, mes travaux de recherche ont concerné les systèmes à événements discrets modélisés par des algèbres de type (min,+) et (max,+) et dont les domaines d'application sont l'analyse de performance des systèmes et réseaux informatiques et la régulation des flux de données [2], [11], [6], (7). Cette thématique est appelée *théorie des systèmes (min,+)-linéaires (resp. (max,+)-linéaires)* et son application aux réseaux informatiques est connue sous le nom *Network Calculus*. J'ai principalement travaillé avec Laurent Hardouin (Professeur des Universités, Responsable de l'équipe Systèmes Dynamiques et Optimisation et Directeur de thèse) et Bertrand Cottenceau (Maître de Conférences et Co-encadrant de thèse).

1.2 1ère partie : Outil de calculs efficace pour les systèmes (min,+)-linéaires

Dans ce contexte des systèmes (min,+)-linéaires, j'ai tout d'abord travaillé sur un axe de recherche traitant des problèmes de complexité algorithmique des opérations usuelles. Ces opérations (voir Figure 1) sont la somme (utilisée pour les besoins en synchronisation), le produit d'inf-convolution (utilisé lors de la concaténation de systèmes), et l'étoile de Kleene (également appelée clôture sous-additive dans la théorie du Network Calculus, opération utilisée pour les systèmes avec des architectures en boucle fermée).

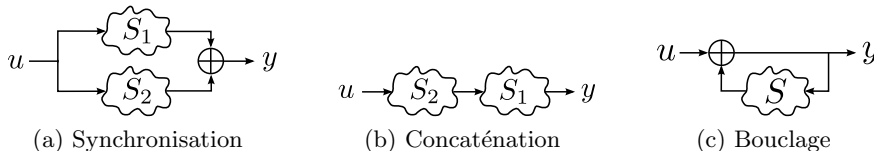


Figure 1: Combinaison de systèmes S .

Il arrive en effet que ces opérations soient coûteuses en espace mémoire et en temps de calculs, principalement à cause du développement des comportements transitoires des systèmes modélisés qui peuvent être significativement longs [7], [3], [13]. Afin de réduire la quantité de données sauvegardées ainsi que la complexité algorithmique des calculs, nous avons donc proposé de réaliser des calculs approchés au moyen de fonctions d'inclusion, solution inspirée de l'analyse par intervalles [10], (2).

Les résultats obtenus sont des intervalles particuliers appelés conteneurs. La borne supérieure d'un conteneur est l'élément le plus grand de la classe d'équivalence du système approché selon la transformée de Legendre-Fenchel, il s'agit alors d'une fonction convexe. De manière complémentaire, la borne inférieure est une fonction

concave et représente un minorant de cette classe d'équivalence et ainsi du système exact. En d'autres termes, le conteneur est considéré comme l'intersection entre un intervalle de fonctions dans lequel le système exact est nécessairement contenu, et la classe d'équivalence du système approché modulo la transformée de Legendre-Fenchel (voir Figure 2). De ce fait, nous savons que ce système de calcul approché conserve certaines caractéristiques importantes comme la pente asymptotique des fonctions qui représente le rythme de fonctionnement nominal du système (*i.e.* le débit de paquets). De plus, grâce aux caractéristiques de convexité des bornes du conteneur, leur représentation informatique nécessite moins d'espace mémoire, et les algorithmes permettant le calcul des fonctions d'inclusion sont de complexité linéaire (pour la somme et le produit d'inf-convolution) et quasi-linéaire (pour l'étoile de Kleene).

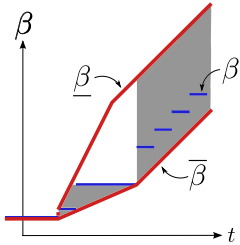


Figure 2: Conteneur $[\underline{f}, \bar{f}]_{\mathcal{L}}$ (zone grisée du schéma) résultant de l'intersection entre l'intervalle $[\underline{f}, \bar{f}]$ dans lequel le système exact f est nécessairement contenu, et la classe d'équivalence $[\bar{f}]_{\mathcal{L}}$ du système approché modulo la transformée de Legendre-Fenchel \mathcal{L} .

Afin de diffuser ces résultats, le conteneur défini et les algorithmes de calculs des fonctions d'inclusion ont été mis en œuvre en C++ dans une bibliothèque de calculs appelée **ContainerMinMaxGD** et disponible à l'adresse suivante : <http://www-ljk.imag.fr/membres/Euriell.LeCorronc/Recherche/software.php>. Les publications (12), (10) et (3) ont permis de diffuser ces résultats au niveau national et international. L'article (1) présente l'ensemble de ce travail dans un journal international réputé dans le domaine des Systèmes à Événements Discrets.

1.3 2nde partie : Commande de systèmes (min,+)-linéaires incertains

Parallèlement à ces travaux, j'ai effectué des recherches sur la commande des systèmes (min,+)-linéaires, c'est-à-dire la régulation des flux d'entrée afin d'atteindre un comportement spécifié, des performances souhaitées ou une certaine qualité de service. Pour ce faire, différents correcteurs et équipements sont ajoutés aux systèmes nominaux : filtre en entrée pour une structure de contrôle en boucle ouverte, ou en retour de sortie pour une structure de contrôle en boucle fermée [1], [12] (voir Figure 3). Pour ces problèmes de commande, nous sommes placés dans un contexte de systèmes incertains, soit lorsque leurs dynamiques β ne sont connues qu'à travers des intervalles $[\underline{\beta}, \bar{\beta}]$ dont les bornes représentent le comportement le plus lent et le comportement le plus rapide. Ces incertitudes peuvent apparaître suite aux calculs effectués sur les conteneurs proposés ci-dessus, mais également lorsque des paramètres incertains ou variables sont présents lors des modélisations. Dans le cadre du Network Calculus, ces dynamiques sont appelées *courbes de service* et considèrent la capacité d'un élément du réseau à fournir un service au flux de données.

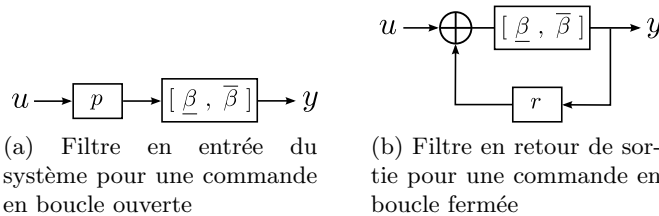


Figure 3: Contrôle de flux de systèmes (min,+)-linéaires incertains uniquement connus à travers des bornes $\underline{\beta}$ et $\bar{\beta}$.

Un premier problème de régulation de trafic et de garantie de performances est celui du contrôle de flux par fenêtre (*i.e.* par retour de sortie) utilisé dans les protocoles de type TCP (Transmission Control Protocol) et connu sous le nom anglais Window Flow Control. Ce problème proposé dans (4) et (9) est étudié avec deux configurations associées :

- les courbes de service décrivant le traitement des flux de données (de la source à la destination) et les acquittements (de la destination à la source) sont différentes,
- ces courbes de service sont représentées bornées par des intervalles.

Concrètement, le contrôleur placé en retour de sortie est une fenêtre qui filtre les entrées afin de garantir une quantité de données en transit dans le réseau toujours plus petite que sa taille. La dynamique du système en boucle fermée est alors obtenue identique à celle du système en boucle ouverte, c'est-à-dire que le flux d'acquiescement ne freine en aucun cas le flux de données.

Dans un second temps, nous avons utilisé la théorie de la résiduation permettant de considérer des pseudo-inverses d'applications isotones et trouver des solutions optimales à des inégalités. Ainsi, à partir de la capacité de service du réseau modélisé (*i.e.* la courbe de service), l'objectif était de trouver la contrainte optimale que le flux d'entrée doit respecter afin de ne pas dépasser des valeurs fixées de délai de transmission ou de quantité de données en attente de service. Cette contribution a également été présentée dans (4).

Un troisième problème traité dans (5) est celui de l'impact de la loi de commande sur l'incertitude de la sortie du système. Nous avons ainsi montré que l'ajout d'un filtre en entrée d'un système incertain fait nécessairement décroître cette incertitude. Le problème de commande considéré est alors celui de la recherche d'un correcteur tel que l'incertitude soit bornée par une valeur donnée. La synthèse d'un tel filtre est obtenue par la recherche d'un point fixe d'une application isotone.

Pour finir, le dernier problème considéré dans (6) est celui de la synthèse d'un filtre neutre. Il s'agit alors d'un contrôleur qui retarde l'entrée le plus possible sans pour autant retarder davantage la sortie par rapport au système seul, et cela en regard du critère du juste-à-temps. Un tel correcteur a l'avantage d'améliorer les flux internes (les tailles des files d'attente), sans dégrader les performances du système.

1.4 Conclusions

Dans l'ensemble, ce travail fournit donc une méthode de calcul approché pour les systèmes (min,+)-linéaires et la théorie du Network Calculus, ainsi qu'un certain nombre de problèmes de contrôle de flux dans un objectif de garantie de performances temporelles et matérielles, problèmes qui peuvent être traités malgré l'incertitude engendrée par un tel outil de calculs.

2 Travaux de Post-Doctorat - 2012/2013 LJK, Université Joseph Fourier de Grenoble et INRIA Rhône-Alpes, Grenoble

Mots-clés : Systèmes Hybrides et à Commutation, Systèmes Physico-Numériques, Stabilité Incrémentale, Bisimulation Approchée, Synthèse de Contrôleurs, Vérification de Contraintes

2.1 Introduction

Depuis septembre 2012, je suis Post-Doctorante à Grenoble dans le domaine des systèmes dynamiques hybrides [14], systèmes permettant de considérer à la fois des dynamiques continues et discrètes. Dans cette classe de système, je m'intéresse aux systèmes dits à commutation. Il s'agit de systèmes ayant plusieurs modes de fonctionnement : dans chaque mode l'espace d'état est continu; le passage d'un fonctionnement à un autre se fait grâce aux entrées discrètes qui sont alors les modes de commutation. De tels systèmes sont particulièrement adaptés pour représenter des systèmes physico-numériques, c'est-à-dire des systèmes dans lesquels les processus physiques (par exemple des réseaux de capteurs) sont contrôlés par des systèmes numériques. Les domaines d'application sont la gestion de la température dans un bâtiment, les circuits électriques, ou encore la régulation des densités de circulation sur des routes. Dans cette thématique, je travaille avec Antoine Girard (Maître de Conférences à l'Université Joseph Fourier et Responsable de l'équipe CASYS du LJK) et Gregor Goessler (Chargé de Recherche à l'INRIA au sein de l'équipe SPADES).

2.2 Recherche de modèles symboliques pour des systèmes à commutation (systèmes physico-numériques)

Dans ce contexte, je cherche à construire des modèles symboliques pour des systèmes à commutation sous la condition de stabilité incrémentale, c'est-à-dire que les trajectoires soumises à la même séquence de modes (donc à la même séquence d'entrées discrètes) convergent vers la même trajectoire indépendamment de leurs conditions initiales : le passé est progressivement oublié.

Jusqu'à présent, les abstractions pour de tels systèmes sont obtenues en discrétisant l'espace d'état grâce à des grilles uniformes ou multi-échelles [9], [4]. Cette méthode de modélisation peut rapidement être pénalisée si des systèmes de grande dimension sont concernés puisque cela amène alors à découper d'autant plus l'espace d'état. Ainsi, l'idée de nos travaux est de considérer les séquences de modes du système à commutation et de conserver ces séquences selon une longueur donnée comme états symboliques (voir Figure 4). Le modèle symbolique alors obtenu approxime le système original avec une précision arbitraire dépendante de la longueur des séquences et mesurée grâce à la notion de bisimulation approchée [8]. L'avantage d'une telle approche est double. Tout d'abord, la relation de transition du modèle symbolique admet une représentation très compacte sous la forme d'un opérateur de décalage (le passage de l'état 000 à l'état 001 s'obtient en "oubliant" l'ancien mode 0 et en ajoutant le nouveau mode 1). Ensuite, puisque nous n'utilisons pas de discrétisation de l'espace d'état, des systèmes de grande dimension peuvent potentiellement être traités sans incidence dans le nombre d'états du modèle symbolique.

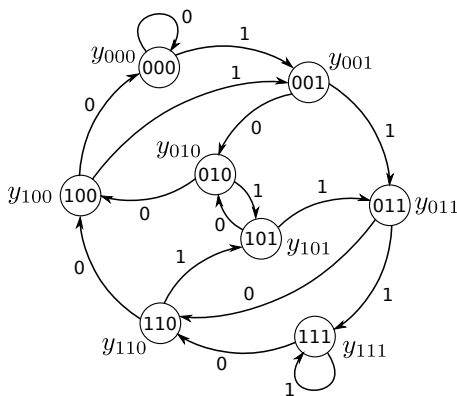


Figure 4: Modèle symbolique $T_N(\Sigma)$ d'un système à commutation Σ à 2 modes $\{0, 1\}$. Les états w de $T_N(\Sigma)$, au nombre de 8, sont obtenus en considérant toutes les séquences de modes de longueur $N = 3$ et une sortie physique y_w est associée à chaque état.

2.3 Exemple d'application

Afin de tester cette approche, nous avons pris comme exemple d'application la modélisation d'une route découpée en tronçons et dont nous souhaitons contrôler les densités de circulation selon des contraintes de sûreté et d'équité. Cet exemple est inspiré des travaux sur les Cell Transmission Models [5]. Une fois le modèle symbolique construit, nous cherchons les états dont les densités de circulation dans les tronçons sont inférieures à un seuil dit dangereux (contrainte de sûreté) et dont les entrées permettent d'alterner les accès à la route (contrainte d'équité).

2.4 Diffusion et perspectives

Ces travaux ont donné lieu à la soumission de l'article (8) pour la conférence internationale IEEE CDC (Conference on Decision and Control). Pour la suite, l'objectif est d'obtenir efficacement des contrôleurs discrets en exploitant au mieux la représentation particulière de ces modèles symboliques.

3 Liste des publications

Revue internationale avec comité de lecture

- (1) *Container of $(\min, +)$ -linear systems*
E. Le Corrond, B. Cottenceau et L. Hardouin
 Journal of Discrete Event Dynamic Systems (IF : 0, 979), Springer, DOI: 10.1007/s10626-012-0148-9, 2012
- (2) *Interval systems over idempotent semiring*
 L. Hardouin, B. Cottenceau, M. Lhommeau et **E. Le Corrond**
 Linear Algebra and its Applications (IF : 1, 011), Elsevier, vol. 431, no. 5-7, pages 855–862, 2009

Conférences internationales avec actes et comité de lecture

- (3) *ContainerMinMaxGD: a toolbox for $(\min, +)$ -linear systems*
E. Le Corronc, B. Cottenceau et L. Hardouin
1st Workshop on Network Calculus, WoNeCa 2012
- (4) *Flow control with $(\min, +)$ algebra*
E. Le Corronc, B. Cottenceau et L. Hardouin
4th International Symposium On Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation, Special Session Worst Case Traversal Time, ISOLA 2010
- (5) *Control of uncertain $(\max, +)$ -linear systems in order to decrease uncertainty*
E. Le Corronc, B. Cottenceau et L. Hardouin
10th International Workshop on Discrete Event Systems, WODES 2010
- (6) *Control of uncertain $(\min, +)$ -linear systems*
E. Le Corronc, B. Cottenceau et L. Hardouin
3rd International Symposium on Positive Systems: Theory and Applications, POSTA 2009
- (7) *Performance analysis of linear systems over semiring with additive inputs*
L. Hardouin, B. Cottenceau, S. Lagrange et **E. Le Corronc**
9th International Workshop on Discrete Event Systems, WODES 2008

Soumission - Conférence internationale avec actes et comité de lecture

- (8) *Mode sequences as symbolic states in abstractions of incrementally stable switched systems*
E. Le Corronc, A. Girard et G. Goessler
52nd IEEE Conference on Decision and Control, CDC 2013

Conférences nationales avec actes et comité de lecture

- (9) *Contrôle de flux : problème du Window Flow Control*
E. Le Corronc, B. Cottenceau et L. Hardouin
Journées Nationales du GDR Génie de la Programmation et du Logiciel, GPL 2011
- (10) *Encadrement de systèmes $(\min, +)$ -linéaires*
E. Le Corronc, B. Cottenceau et L. Hardouin
7ème colloque francophone sur la Modélisation des Systèmes Réactifs, MSR 2009
- (11) *Représentation tridimensionnelle de la dynamique des graphes d'événements temporisés généralisés*
B. Cottenceau, L. Hardouin et **E. Le Corronc**
7ème colloque francophone sur la Modélisation des Systèmes Réactifs, MSR 2009
- (12) *Approximation convexe de systèmes $(\max, +)$ -linéaires*
E. Le Corronc, B. Cottenceau et L. Hardouin
Journées Doctorales du GDR Modélisation, Analyse, Conduite des Systèmes dynamiques, JDMACS 2009

4 Références bibliographiques

- [1] R. Agrawal, R.L. Cruz, C. Okino, and R. Rajan. Performance bounds for flow control protocols. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 7(3):310–323, 1999.
- [2] F. Baccelli, G. Cohen, G.J. Olsder, and J.-P. Quadrat. *Synchronization and linearity: an algebra for discrete event systems*. Wiley and sons, 1992.
- [3] A. Bouillard, B. Cottenceau, B. Gaujal, L. Hardouin, S. Lagrange, and M. Lhommeau. COINC library: a toolbox for the network calculus. In *Proceedings of the 4th International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools, ValueTools'09*, 2009. <http://www.istia.univ-angers.fr/~hardouin/>.
- [4] J. Camara, A. Girard, and G. Goessler. Safety controller synthesis for switched systems using multi-scale symbolic model. In *50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, CDC-ECC'11*, 2011.

- [5] C. Canudas-de Wit, L. R. Leon Ojeda, and A. Y. Kibangou. Graph constrained-CTM observer design for the Grenoble south ring. In *13th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems, CTS'12*, 2012.
- [6] C.S. Chang. *Performance guarantees in communication networks*. Springer, 2000.
- [7] B. Cottenceau, M. Lhommeau, L. Hardouin, and J.-L. Boimond. Data processing tool for calculation in dioid. In *5th International Workshop on Discrete Event Systems, WODES'00*, 2000. <http://www.istia.univ-angers.fr/~hardouin/>.
- [8] A. Girard and G. J. Pappas. Approximation metrics for discrete and continuous systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52(5):782–798, 2007.
- [9] A. Girard, G. Pola, and P. Tabuada. Approximately bisimilar symbolic models for incrementally stable switched systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 55(1):116–126, 2010.
- [10] L. Jaulin, M. Kieffer, O. Didrit, and E. Walter. *Applied interval analysis*. Springer London, 2001.
- [11] J.-Y. Le Boudec and P. Thiran. *Network calculus: a theory of deterministic queuing systems for the internet*. Springer, 2001.
- [12] C.A. Maia, L. Hardouin, R. Santos-Mendes, and B. Cottenceau. Optimal closed-loop control of timed event graphs in dioids. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 48(12):2284–2287, 2003.
- [13] J.B. Schmitt and F.A. Zdarsky. The disco network calculator: a toolbox for worst case analysis. In *Proceedings of the 1st international conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools, ValueTools'06*, 2006. http://disco.informatik.uni-kl.de/content/Network_Calculator.
- [14] P. Tabuada. *Verification and Control of Hybrid Systems: A Symbolic Approach*. Springer, 2009.