

Projet METALAU

Méthodes, Algorithmes et Logiciels pour L'automatique

Rocquencourt

THÈME 4A



*R*apport
d'Activité

2001

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	4
3	Fondements scientifiques	4
3.1	Systèmes à événements discrets et algèbre max-plus	4
3.2	Systèmes implicites	13
3.3	Détection de pannes dans les systèmes dynamiques	16
4	Domaines d'applications	16
4.1	Transport	16
5	Logiciels	17
5.1	Scilab	17
5.1.1	Diffusion	17
5.1.2	Scilab et la recherche	17
5.1.3	Scilab et le projet	18
5.1.4	Scilab et l'enseignement	18
5.2	Systèmes dynamiques hybrides - Scicos	18
5.3	Metanet	19
5.4	CDROM : suite de calcul scientifique	19
6	Résultats nouveaux	20
6.1	CAO en Automatique	20
6.1.1	Liens Scilab - Calcul formel	20
6.1.2	Scicos implicite	20
6.1.3	Amélioration des fonctionnalités existantes	20
6.1.4	Scilab parallèle	22
6.1.5	Boîte à outils Labostat	22
6.2	Commande des Systèmes	22
6.2.1	Commande de systèmes à retard avec sortie tout-ou-rien	22
6.2.2	Conception simultanée de contrôleur et de détecteur de pannes	23
6.2.3	Inéquations variationnelles couplées	23
6.3	Systèmes à événements discrets, algèbre max-plus et programmation dynamique	24
6.3.1	Asymptotique de systèmes dynamiques monotones homogènes	24
6.3.2	Algorithmes d'itérations sur les politiques et jeux stochastiques	24
6.3.3	Réalisation minimale max-plus	24
6.3.4	Semimodules Rationnels et Espaces Invariants Max-Plus	25
6.3.5	Dimension de l'espace propre d'opérateurs monotones homogènes convexes	25
6.3.6	Transformée de Fenchel généralisée	26
6.3.7	Analyse convexe dans l'algèbre maxplus	26
6.3.8	Géodésique dans des réseaux	26

6.3.9	Perturbations de valeurs propres et vecteurs propres et algèbre max-plus	27
6.4	Transports	27
6.4.1	LaRA : la route automatisée	27
6.4.2	Calcul de plan de feux de circulation des villes à géométrie régulière	27
6.4.3	Modélisation microscopique du trafic	28
6.4.4	Equilibre de Wardrop et boîte à outils trafic de Scilab	28
6.4.5	Tarifcation optimale de moyens de transport	29
6.4.6	Tarifcation optimale des réseaux de télécommunication et optimisation bi-niveaux	30
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	30
7.1	Identification aveugle, suivi des modes et tests	30
7.2	Projet Sacso	30
7.3	RNTL2	31
7.4	Projet RNTL SIMPA	31
7.5	Projet PREDIT : Tarifcation transport	31
8	Actions régionales, nationales et internationales	31
8.1	Actions nationales	31
8.2	Actions européennes	32
8.2.1	Alapedes	32
8.2.2	Niconet	32
8.3	Actions internationales	32
8.3.1	Convention NSF-INRIA	32
8.4	Accueils de chercheurs étrangers	32
9	Diffusion de résultats	33
9.1	Animation de la communauté scientifique	33
9.2	Enseignement universitaire	33
9.3	Autres enseignements	34
9.4	Encadrement de thèse	34
9.5	Membre de jury	34
9.6	Participation à des colloques, séminaires, invitations	35
10	Bibliographie	37

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Maurice Goursat [DR, Inria]

Responsable permanent

François Delebecque [DR, Inria]

Assistante de projet

Martine Verneuille [SAR, Inria]

Personnel Inria

Marianne Akian [CR]

Stéphane Gaubert [CR, détaché à l'Ensta jusqu'au 31 octobre 2001]

Claude Gomez [DR]

Carlos Klimann [CR]

Ramine Nikoukhah [DR]

Jean-Pierre Quadrat [DR]

Serge Steer [DR]

Laura Wynter [Maître de Conf., Université de Versailles, en délégation]

Ingénieur associé

Djalel Abdemouche [depuis le 15 septembre 2001]

Conseiller scientifique

Guy Cohen [École Nationale des Ponts et Chaussées]

Collaborateurs extérieurs

Jean-Philippe Chancelier [École Nationale des Ponts et Chaussées]

Philippe de Reffye [Liama - Pékin]

Anne-Laure Michel [Pulv/Saphir-control]

Matthieu Philippe [jusqu'en septembre 2001 (Saphir-Control)]

Edmundo Rofman

Chercheurs invités

Ravindra Bapat [Indian Statistical Institute]

Petko Petkov [Technical University of Sofia - Bulgarie]

Ivan Singer [Bucharest - Institut de math.]

Mohamed Lamine Gaye [Université Cheikh Anta Diop - Dakar]

Ababcar Sadikhe Ndao [Université Cheikh Anta Diop - Dakar]

Steve Campbell [Université de Caroline du Nord]

Chercheurs post-doctorants

Pablo Lotito [co-tutuelle avec Numopt]

Elina Mancinelli [co-tutuelle avec Numopt]

Ider Tsevendorj [jusqu'au 31.11.01]

Cormac Walsh [depuis le 1er septembre]

Ingénieurs experts

Rachid Djenidi [depuis septembre 2001]

Matthieu Philippe [depuis septembre 2001]

Doctorants

Azzedine Azil [Université d'Orsay]

Jean Cochet-Terrasson [École des Mines]
 Madiagne Diallo [UVSQ]
 Gaël Desiles [Ecole des Mines]
 Rachid Djenidi [Université de Créteil jusqu'en juin 2001]
 Oumar Fall [Bourse de coopération, Université de Dakar]
 Ricardo Katz [Université de Rosario (co-tutelle)]
 Mohamad Javad Khosrowjerdi [Université de Teheran]

Stagiaires

Kimberly Drake [Université de Caroline du Nord]
 Yu Fang [université de JangSu]
 Surendu Korgaokar [ITT - Bombay]
 Arun Upadhyay [ITT - Bombay]
 Hong Ping Yan [Liama - Pékin]

2 Présentation et objectifs généraux

L'objet du projet est de réaliser des environnements logiciels pour l'automatique et de développer de nouvelles méthodes et algorithmes pour l'identification et la commande des systèmes dynamiques.

Une compétence particulière a été acquise dans le domaine de la commande optimale éventuellement stochastique ou robuste, dans la théorie des systèmes linéaires aussi bien dans l'algèbre ordinaire que dans l'algèbre max-plus, ainsi que dans la détection de pannes, le calcul formel, la modélisation et l'optimisation des réseaux et les systèmes hybrides.

Les développements logiciels se sont concentrés sur Scilab et ses boîtes à outils . . . Ces outils conceptuels et logiciels sont appliqués sur des problèmes industriels : régulation de cours d'eau, surveillance de structures vibrantes, modélisation et commande de systèmes de transport.

Un de nos objectifs est de faire de Scilab la référence du domaine pour les logiciels libres.

Un autre objectif important du projet est le développement de l'algèbre max-plus qui est l'algèbre de l'optimisation et qui, à ce titre, devrait jouer un rôle aussi important que l'algèbre de Boole et que l'algèbre ordinaire. Enfin les applications aux problèmes de transport prennent de plus en plus d'importance dans le cadre de la coopération l'ENPC-Cermics et le Livic.

3 Fondements scientifiques

3.1 Systèmes à événements discrets et algèbre max-plus

Mots clés : algèbre max-plus, systèmes à événements discrets, décision markovienne.

Participants : M. Akian, G. Cohen, S. Gaubert, J.-P. Quadrat.

Résumé : *L'idée est de substituer au corps des nombres réels le semicorps idempotent \mathbf{R}_{\max} des nombres réels auxquels on ajoute $-\infty$ et que l'on munit des opérations max et +. A partir de ce semicorps, on peut développer l'analogie de l'algèbre*

linéaire classique, une théorie des systèmes dynamiques linéaires, un analogue du calcul des probabilités, l'analogue des espaces de Sobolev etc . . .

Les nouveaux systèmes dynamiques linéaires ainsi obtenus ne sont rien d'autre que les systèmes régis par des équations de la programmation dynamique qui jouent un rôle important en ingénierie et en physique.

L'algèbre max-plus Le semianneau max-plus, parfois appelé « algèbre max-plus », et noté \mathbb{R}_{\max} , est l'ensemble $\mathbb{R} \cup \{-\infty\}$, muni des lois \max et $+$. Traditionnellement, on note \oplus au lieu de \max ($2 \oplus 3 = 3$), et \otimes au lieu de $+$ ($1 \otimes 1 = 2$). L'élément zéro, c'est-à-dire le neutre pour la loi \oplus , est noté ε (ici $\varepsilon = -\infty$). L'unité, c'est-à-dire le neutre pour la loi \otimes , est notée e (ici $e = 0$). Les axiomes de structure des *semianneaux* sont ici satisfaits : \oplus est associative, commutative, a un zéro, \otimes est associative, a une unité, distribue par rapport à \oplus , et zéro est absorbant. Le semianneau max-plus est très particulier : il est *commutatif* ($a \otimes b = b \otimes a$), *idempotent* ($a \oplus a = a$), et les éléments ont un inverse, hormis zéro (on nomme *semicorps* les semianneaux qui satisfont cette dernière propriété).

Ces nouvelles notations \oplus et \otimes sont mieux adaptées que \max et $+$ aux réflexes de calcul qui sont liés à l'algèbre ordinaire. Nous écrivons par exemple :

$$ab = a \otimes b, \quad a^n = a \otimes \dots \otimes a \quad (n \text{ fois}), \quad 2^3 = 6, \quad \sqrt{3} = 1.5, \\ \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 4 & \varepsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 10 \\ 103 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \otimes 10 \oplus 0 \otimes 103 \\ 4 \otimes 10 \oplus \varepsilon \otimes 103 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 103 \\ 14 \end{bmatrix}, \\ (3 \oplus x)^2 = (3 \oplus x)(3 \oplus x) = 6 \oplus 3x \oplus x^2 = 6 \oplus x^2 \quad (= \max(6; 2 \times x)).$$

Le tableau 1 donne une liste d'autres semianneaux apparentés au semicorps max-plus.

\mathbb{R}_{\max}	$(\mathbb{R} \cup \{-\infty\}, \max, +)$	semianneau $(\max, +)$	semicorps idempotent
\mathbb{R}_{\max}	$(\mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}, \max, +)$	semianneau $(\max, +)$ complété	$-\infty + (+\infty) = -\infty,$ car $\varepsilon \otimes a = \varepsilon$
$\mathbb{R}_{\max, \times}$	$(\mathbb{R}^+, \max, \times)$	semianneau (\max, \times)	isomorphe à \mathbb{R}_{\max} ($x \mapsto \log x$)
\mathbb{R}_{\min}	$(\mathbb{R} \cup \{+\infty\}, \min, +)$	semianneau $(\min, +)$	isomorphe à \mathbb{R}_{\max} ($x \mapsto -x$)
\mathbb{N}_{\min}	$(\mathbb{N} \cup \{+\infty\}, \min, +)$	semianneau tropical	fameux en théorie des langages
$\mathbf{R}_{\max, \min}$	$(\mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}, \max, \min)$	algèbre goulot, ou floue	n'est pas un semicorps.
\mathbb{B}	$(\{\text{false, true}\}, \text{or, and})$	semianneau de Boole	isomorphe à $(\{\varepsilon, e\}, \oplus, \otimes),$ pour n'importe lequel des semianneaux ci-dessus
\mathbb{R}_h	$(\mathbb{R} \cup \{-\infty\}, \oplus_h, +)$ $a \oplus_h b =$ $h \log(e^{a/h} + e^{b/h})$	semianneaux « de Maslov »	déformation de $(\mathbb{R}^+, +, \times)$ $\lim_{h \rightarrow 0^+} \mathbb{R}_h = \mathbb{R}_0 = \mathbb{R}_{\max}$

TAB. 1 – La famille des semianneaux $(\max, +)$ et tropicaux

Systèmes dynamiques max-plus linéaires et graphes d'événements Certains systèmes à événements discrets (les graphes d'événements) se modélisent par des systèmes dynamiques sur le semianneau max-plus. Considérons par exemple un système comprenant n tâches répétitives (on peut penser à des assemblages dans un atelier, à des rendez-vous dans un réseau). L'instant de démarrage d'une tâche est conditionné par l'exécution d'autres tâches devant être effectuées antérieurement. Supposons que la k -ième occurrence de la tâche i (tir de

la transition i) ne puisse commencer que τ_{ij} unités de temps après que la dernière des occurrences ($k - \nu_{ij}$) des tâches j n'ait eu lieu. Alors, clairement, les dates au plus tôt d'occurrence des k -ième tâches sont données par la récurrence

$$x_i(k) = \max_j [\tau_{ij} + x_j(k - \nu_{ij})] , \quad (1)$$

qui n'est autre qu'un système linéaire stationnaire sur le semi-anneau max-plus. On peut l'écrire en termes matriciels

$$x(k) = \bigoplus_{\nu \in F} A_\nu x(k - \nu) , \quad (2)$$

où F est un ensemble fini, et $\{A_\nu\}_{\nu \in F}$ une famille de matrices que l'on écrira aisément.

On a obtenu un modèle linéaire pour l'évaluation de performance d'un système dans lequel les préconditions d'une tâche sont fixées a priori et invariantes en temps. En termes de système de production cela signifie à peu près qu'un ordonnancement périodique a été défini.

L'algèbre max-plus permet d'analyser complètement cette classe de systèmes. Un des résultats intéressants obtenus consiste à remarquer que la relation : instants d'entrée - instants de sortie des pièces, est max-plus linéaire et shift invariante. C'est une inf-convolution de la suite des instants d'entrée et d'une suite caractéristique du système (sa réponse impulsionnelle au sens max-plus). On a donc une bonne notion de fonction de transfert. Ce sont les séries formelles rationnelles¹ (si le graphe d'événement n'a qu'un nombre fini de transitions) à coefficients dans l'algèbre max-plus. Ces résultats ont été largement expliqués dans [5, 3, 8].

Cette classe est trop restreinte (dans la majorité des applications, trouver un bon ordonnancement fait partie du problème). Elle peut être élargie au prix de la perte de la linéarité max-plus.

Systèmes dynamiques ($\min, +, \times$) implicites, réseaux de Petri, programmation dynamique stochastique La modélisation de réseaux de Petri temporisés généraux ne peut pas se faire dans le semi-anneau \mathbb{R}_{\max} ou \mathbb{R}_{\min} , la multiplication est indispensable.

On note \mathcal{P} l'ensemble des places, \mathcal{Q} l'ensemble des transitions, M les multiplicités des arcs, m le marquage initial, τ les temps de séjour. à chaque place $p \in \mathcal{P}$ on associe un compteur $Z_p : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{Z}$, ($Z_p(t)$ est le numéro du dernier jeton entré avant l'instant t , en incluant les jetons du marquage initial); de même, pour chaque transition $q \in \mathcal{Q}$, $Z_q(t)$ note le numéro du dernier tir de q arrivé avant l'instant t . Ces fonctions sont croissantes, par définition. On a les bilans suivants (on note x^{in} et x^{out} les ensembles des prédécesseurs et successeurs d'un nœud x , respectivement) :

$$Z_p(t) = m_p + \sum_{q \in p^{\text{in}}} M_{pq} Z_q(t) , \quad (3)$$

$$Z_p(t - \tau_p) \geq \sum_{q' \in p^{\text{out}}} M_{q'p} Z_{q'}(t) . \quad (4)$$

Par exemple, pour le réseau de Petri de la Figure 1, $Z_{q_3}(t) + 2Z_{q_2}(t) \leq Z_{p_2}(t - \tau_{p_2})$ traduit le fait qu'un jeton en p_2 peut contribuer au tir d'une transition q_3 , et qu'il en faut deux pour tirer q_2 .

¹Elles sont caractérisées par leurs accroissements ultimement périodiques.

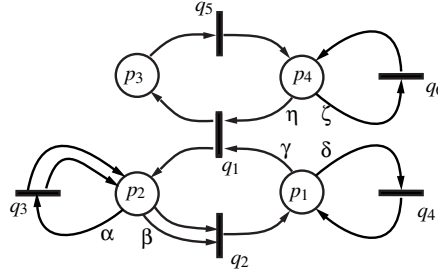


FIG. 1 – Un réseau de Petri temporisé

Dans un fonctionnement au plus tôt, au moins une inégalité de type 4 est saturée (i.e. au moins une place est indisponible) en amont de chaque transition. On a donc :

$$\forall q \in \mathcal{Q}, \min_{p \in q^{\text{in}}} \left\{ m_p + \sum_{q'' \in p^{\text{in}}} M_{pq''} Z_{q''}(t) - \sum_{q' \in p^{\text{out}}} Z_{q'}(t) M_{q'p} \right\} = 0. \quad (5)$$

Ce problème posé dans [Lib97] est un système dynamique $(\min, +, \times)$ implicite sur lequel on ne sait à peu près rien dire. Résoudre ce genre de problème, même dans le cas statique, revient à étudier les variétés algébriques max-plus. La programmation linéaire devrait être d'une aide précieuse pour la résolution de ces systèmes.

On peut néanmoins simplifier ce problème en forçant des routages stationnaires : on notera alors ρ_{qp} la proportion de fluide (cas où on ne se préoccupe pas de l'intégrité des jetons) routé vers q par la place p , avec $\sum_{q \in p^{\text{out}}} \rho_{qp} = 1$. En posant,

$$\mu_{pq} \stackrel{\text{déf}}{=} M_{pq}, \quad \mu_{qp} \stackrel{\text{déf}}{=} M_{qp}^{-1}, \quad \mu'_{qp} \stackrel{\text{déf}}{=} \mu_{qp} \rho_{qp}$$

l'évolution du système devient cette fois :

$$Z_q(t) = \min_{p \in q^{\text{in}}} \left[\mu'_{qp} (m_p + \sum_{q'' \in p^{\text{in}}} \mu_{pq''} Z_{q''}(t - \tau_p)) \right]. \quad (6)$$

On reconnaît une équation de la programmation dynamique, pour un processus de décision semi-Markovien, avec coût additif actualisé général. On peut alors calculer l'asymptotique de Z par des algorithmes du type itération sur les politiques [CGJ95].

Systèmes dynamiques monotones homogènes La modélisation de systèmes à événements discrets plus généraux peut se faire en remplaçant 1, 6 par des dynamiques $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$

[Lib97] L. LIBEAUT, *Sur l'utilisation des dioïdes pour les commandes des systèmes à événements discrets*, thèse de doctorat, Université, Nantes, 1997.

[CGJ95] G. COHEN, S. GAUBERT, J.P. QUADRAT, « Asymptotic throughput of continuous timed petri nets », in : *CDC-AC*, New Orléans, décembre 1995.

qui satisfont les trois axiomes :

$$\begin{array}{lll}
 \text{Homogénéité} & f(\lambda + x) = \lambda + f(x) & (H) \\
 \text{Monotonie} & x \leq y \Rightarrow f(x) \leq f(y) & (M) \\
 \text{Contraction} & \|f(x) - f(y)\|_\infty \leq \|x - y\|_\infty, & (C)
 \end{array}$$

pour tout $\lambda \in \mathbb{R}, x, y \in \mathbb{R}^n$, avec $\lambda + x \stackrel{\text{def}}{=} (\lambda + x_1, \dots, \lambda + x_n)$, et où \leq désigne l'ordre partiel usuel sur \mathbb{R}^n . L'importance des applications monotones homogènes est bien connue. Elles interviennent dans la version intrinsèque de la théorie de Perron-Frobenius développée initialement par Krein et Rutman, dans divers problèmes de « scaling », en économie, et surtout en commande optimale et théorie des jeux, comme opérateurs de programmation dynamique. Voir [R.D90] pour un panorama des résultats théoriques.

On peut dire que les propriétés d'homogénéité H et de contraction C, sont le minimum vital pour faire une théorie de Perron-Frobenius, la propriété H donne du sens au problème spectral $f(x) = \lambda + x$, la propriété C garantit en particulier que la limite $\chi(f) = \lim_{k \rightarrow \infty} f^k(x)/k$, quand elle existe, est indépendante du point de départ $x \in \mathbb{R}^n$. Cette limite est appelée temps de cycle dans la communauté des systèmes à événements discrets, car les coordonnées de $\chi(f)$ mesurent les temps moyens entre événements. Un problème central consiste à caractériser les f telles que la limite $\chi(f)$ existe et au delà, à déterminer plus précisément l'asymptotique de f pour des classes raisonnables d'applications. (Le cas d'applications contractantes pour des normes strictement convexes est plus simple [KN81].)

Pour fixer les idées, considérons le jeu à deux joueurs et somme nulle représenté sur la Figure 2. Deux joueurs, appelés « Rond » et « Carré », s'affrontent en déplaçant à tour de rôle un jeton sur le graphe. Quand le jeton est sur un sommet carré, c'est Carré qui joue, et de même pour Rond. Au début, le jeton est dans l'état 1, c'est donc Rond qui commence. à chaque mouvement, Carré paie à rond le nombre de francs indiqué sur l'arc (si ce nombre est négatif, c'est Rond qui paie l'opposé à Carré). On veut savoir comment croissent les gains optimaux de Rond, lorsque le nombre de tours de jeu tend vers l'infini. Pour cela, on introduit $x_i(k)$, le gain optimal de Rond partant de i en k tours, et l'on note que $x(k)$ vérifie $x(k) = f(x(k-1))$, où

$$f(x) = \begin{pmatrix} \max(2 + x_1, \min(8 + x_1, 13 + x_2)) \\ \min(9 + x_1, -5 + x_2) \end{pmatrix}$$

Il n'est pas difficile de voir ici que $\chi(f) = (2, -5)^T$, i.e., que Rond gagne en moyenne 2 francs par tour de jeu s'il part de 1, et en perd en moyenne 5 s'il part de 2. De manière surprenante, nous ne connaissons pas de méthode élémentaire pour des jeux généraux de ce type. (Voir

[R.D90] R.D. NUSSBAUM, « Hilbert's projective metric and iterated nonlinear maps », *Memoirs of the AMS* 95, 391, 1990.

[KN81] E. KOHLBERG, A. NEYMAN, « Asymptotic behavior of nonexpansive mappings in normed linear spaces », *Israel J. Math.* 38, 4, 1981, p. 269-275.

cependant [Koh80,GG98b] pour des méthodes non-élémentaires coûteuses). Dans [CTGG99,GG98a], on a donné un algorithme d'itérations sur les politiques qui permet de calculer efficacement $\chi(f)$ (à chaque itération, on résout un problème à un joueur, i.e., un problème spectral max-plus).

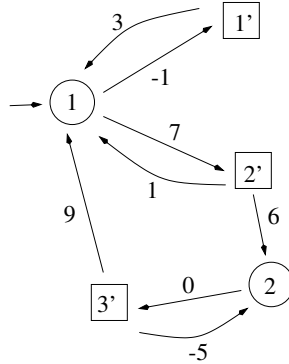


FIG. 2 – Un jeu déterministe répété à deux joueurs et somme nulle

Ressources partagées, empilements de tâches et automates max-plus Un système à ressources partagées peut être vu comme un empilement de tâches (représentées par les contraintes temporelles imposées sur les ressources par ces tâches) du type jeu de Tetris.

Dans l'espace temps-ressource $\mathbb{R} \times \mathcal{R}$ avec $\mathcal{R} = \{1, \dots, n\}$. Une tâche a est une classe d'équivalence de formes géométriques (deux formes sont équivalentes si elles sont superposables par une translation temporelle). D'un point de vue physique, une tâche mobilise des ressources de façon synchronisée. Elle peut être retardée ou avancée. La tâche a utilise les ressources $R(a)$. Une tâche en position λ immobilise la ressource r à la date $d_r(a) + \lambda$ et la libère à la date $f_r(a) + \lambda$. $d(a), f(a) : R(a) \rightarrow \mathbb{R}$ sont donnés.

Un travail w est un ensemble ordonné de tâches à accomplir $w = a_1 \cdots a_k$. On peut alors vouloir calculer les instants de libération des ressources au plus tôt $x(w)$ pour un travail w donné, sachant que les ressources étaient disponibles au départ aux instants g ($g : \mathcal{R} \rightarrow \mathbb{R}$). Cela correspond au calcul du profil haut d'un empilement de pièces si l'on donne une interprétation spatiale à l'axe temporel. Le vecteur g est alors le profil du sol. L'exécution au plus tôt des différentes tâches d'un travail w revient à laisser tomber les pièces a_1, \dots, a_k sur le sol g , comme dans le jeu de téttris. Ce profil haut se calcule récursivement par la programmation dynamique.

[Koh80] E. KOHLBERG, « Invariant half-lines of nonexpansive piecewise-linear transformations », *Math. Oper. Res.* 5, 3, 1980, p. 366–372.

[GG98b] S. GAUBERT, J. GUNAWARDENA, « A Non-Linear Hierarchy for Discrete Event Dynamical Systems », in: *Proc. of the Fourth Workshop on Discrete Event Systems (WODES98)*, IEE, Cagliari, Italy, 1998.

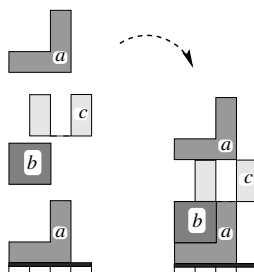
[CTGG99] J. COCHET-TERRASSON, S. GAUBERT, J. GUNAWARDENA, « A constructive fixed point theorem for min-max functions », *Dynamics and Stability of Systems* 14, 4, 1999.

[GG98a] S. GAUBERT, J. GUNAWARDENA, « The duality theorem for min-max functions », *C.R.A.S* 326, Jan. 1998, p. 43–48.

$$x() = g, \quad (7)$$

$$x(wa)_r = \max_{s \in R(a)} [f(a)_r - d(a)_s + x(w)_s], \quad \forall r \in R(a), \quad (8)$$

$$x(wa)_r = x(w)_r, \quad \forall r \notin R(a). \quad (9)$$



$$\begin{aligned} R(c) &= \{2, 4\}, \quad d(c) = [\cdot, 0, \cdot, 0], \quad f(c) = [\cdot, 2, \cdot, 2] \\ R(b) &= \{1, 2\}, \quad d(b) = [0, 0, \cdot, \cdot], \quad f(b) = [2, 2, \cdot, \cdot] \\ R(a) &= \{1, 2, 3\}, \quad d(a) = [0, 0, 0, \cdot], \quad f(a) = [1, 1, 3, \cdot] \end{aligned}$$

FIG. 3 – Un jeu de Tetris à trois types de pièces et quatre ressources

En termes algébriques, à chaque pièce a prise dans un ensemble de pièces \mathcal{T} , on associe la matrice $M(a) \in (\mathbb{R}_{\max})^{\mathcal{R} \times \mathcal{R}}$ $M(a)_{r,s} = f(a)_s - d(a)_r$ si $r, s \in R(a)$, et $M(a)_{r,r} = e$ pour les coefficients diagonaux hors $R(a)$ (les autres coefficients valent ε). On a :

$$x(w) = gM(a_1) \dots M(a_k), \quad y(w) = x(w)e_{\mathcal{R}}, \quad (10)$$

où $e_{\mathcal{R}}$ désigne un vecteur de zéro et donc $y(w)$ représente la date de fin du travail (la hauteur du tas).

Autrement dit, la série génératrice $\bigoplus_{w \in \mathcal{T}^*} y(w)w \in \mathbb{R}_{\max} \langle \langle \Sigma \rangle \rangle$ est reconnue par un automate à coefficients dans le semi-anneau max-plus. D'après le théorème de Kleene-Schützenberger, c'est une série rationnelle. On peut ainsi traduire en termes algébriques les classiques problèmes d'ordonnancement, qui reviennent à minimiser la vitesse de croissance du tas par rapport à l'ordre des lettres dans le mot w . Ils se ramènent à l'étude des semigroupes de matrices à plusieurs générateurs $M(a_1), \dots, M(a_k)$. Ces résultats algébriques ont été développés dans [9],^[Gau96] et appliqués dans [7] aux tas de pièces.

Vers une approche géométrique des systèmes dynamiques linéaires sur le semi-anneau $(\max, +)$ La solution du système

$$x(k) = Ax(k-1) \oplus Bu(k), \quad y(k) = Cx(k),$$

[Gau96] S. GAUBERT, « On the Burnside Problem for Semigroups of Matrices in the $(\max, +)$ Algebra », *Semigroup Forum* 52, 1996, p. 271–292.

où $x(-1) = -\infty$, est donnée par :

$$y(k) = \bigoplus_{l=0}^k CA^{k-l}Bu(l).$$

Dans un atelier, $y(k)$ s'interprète comme la date d'obtention de la k -ième pièce (on suppose, afin d'alléger la notation, que le système a une seule entrée $u(k) \in \mathbb{R}$ et une seule sortie $y(k) \in \mathbb{R}$).

Les problème de suivi de trajectoire consiste à rechercher u tel que $y(k) \leq \eta(k)$, pour $k = 0, 1, \dots$ (η représente un carnet de commandes à suivre).

Le problème d'atteignabilité en horizon k consiste à rechercher u tel que $x(k) \leq \xi$ (ξ est un vecteur des dates de disponibilité des « ressources » internes, machines, palettes, personnel, etc.).

Ces deux problèmes sont de la forme $Fu \leq v$, où F est un opérateur linéaire. E.g., dans le deuxième cas, $Fu = C_k u_k$, où $C_k = [B, AB, \dots, A^k B]$ et $u_k = [u(k), \dots, u(0)]^T$. Il n'est pas en général possible de résoudre exactement $Fu = v$ pour toute valeur de v , car génériquement, un opérateur linéaire $(\max, +)$ n'est ni surjectif ni injectif. Cependant, il est facile de voir que $Fu \leq v$ a toujours une solution maximale, $F \setminus v$, donnée en termes matriciels par

$$(F \setminus v)_i = \inf_j (-F_{ji} + v).$$

(il s'agit d'un cas particulier de *résiduation* ^[BJ72], [3]). On peut ainsi calculer la solution au plus tard satisfaisant le carnet de commande, où l'état atteignable maximal en dessous de ξ . En outre, on sait tester l'atteignabilité exacte de ξ en temps k : il suffit de vérifier que l'égalité $C_k(C_k \setminus \xi) = \xi$ est vraie.

La version la plus achevée de ces problèmes d'atteignabilité dans le cas classique a été donnée dans ^[W.M79]. Elle est basée sur une discussion des espaces invariants d'un opérateur linéaire. L'extension de cette théorie au cas max-plus passe par une meilleure compréhension des semi-modules (analogue sur un semi-anneau des espaces vectoriels). Même lorsque les semimodules sont finiment engendrés, très peu de choses sont connues. Plusieurs notions d'indépendance existent, conduisant, chacune, à des notions, distinctes, de rang. De plus un sous semimodule n'a pas toujours de supplémentaire. Ces difficultés sont répertoriées dans la théorie des modules. Cependant, une nouvelle difficulté surgit ici : l'analogue d'un noyau doit être posé dans un espace double $\ker C = \{(x, y) \mid Cx = Cy\}$. En effet, dans cette structure tous les termes d'une équation ne peuvent pas être ramenés dans un même membre, puisque, en général, un élément n'a pas d'opposé.

Dualité entre l'optimisation et le calcul des probabilités Dans de nombreux domaines (grandes déviations en probabilité, entropie en mécanique statistique et théorie de l'information, dualité filtrage-commande en commande, maximum de vraisemblance en statistique, passage de la mécanique quantique à la mécanique classique, méthode de Hopf pour la résolution

[BJ72] T. BLYTH, M. JANOWITZ, *Residuation theory*, Pergamon Press, Oxford, 1972.

[W.M79] W.M. WONHAM, *Linear multivariable control: a geometric approach*, Springer-Verlag, 1979.

explicite d'équations d'Hamilton Jacobi etc.) une dualité entre le calcul des probabilités et l'optimisation est utilisée implicitement.

Dans un certain nombre de travaux relativement récents, cette dualité a été explicitée par divers groupes indépendamment [Mas87,Pap95,dTRS90,Qua90,AQV94]. On dispose maintenant d'une théorie très satisfaisante [Aki99]. Cette dualité, a pour intérêt, en dehors de son caractère esthétique et unifiant, de faire ressortir les dissymétries existantes dans le développement des deux domaines. Le calcul des probabilités contient beaucoup de résultats analytiques et conceptuels. L'optimisation est beaucoup plus développée au niveau algorithmique.

Un problème d'optimisation est souvent présenté comme le calcul de

$$\inf_{x \in A} c(x),$$

pour des c et des A suffisamment simples pour qu'il existe un x optimal calculable algorithmiquement. Des notions importantes sont apparues, comme la dualité, surtout pour des raisons algorithmiques.

Dans le calcul des probabilités on s'intéresse au calcul de la probabilité d'événements, c.a.d.

$$\int_A p(x) dx$$

pour des A et p pouvant être très compliqués. On appelle $P(A)$ le résultat et on fait la théorie des applications $A \mapsto P(A)$. On fait apparaître toutes sortes de notions intéressantes : moyenne, variance, fonction caractéristique, etc. On fait aussi des calculs, mais surtout, dans des cas où il est possible d'obtenir des résultats explicites.

Il suffit d'appeler $C(A) \stackrel{\text{déf}}{=} \inf_{x \in A} c(x)$ pour être dans une situation complètement analogue au calcul des probabilités au remplacement de l'algèbre ordinaire par \mathbb{R}_{\min} près. Pratiquement tous les concepts des probabilités ont une notion duale, utile en optimisation. Citons en trois. Le dual de la loi Gaussienne $\mathcal{N}_{m,\sigma}$ est la forme quadratique

$$Q_{m,\sigma}(x) \stackrel{\text{déf}}{=} \frac{1}{2} \left(\frac{x-m}{\sigma} \right)^2.$$

Le dual de la transformée de Laplace est la transformée de Fenchel. Le dual de la convolution des lois est l'inf-convolution des coûts.

A l'opposé, aucun algorithme sérieux n'est donné, pour calculer la probabilité d'un événement un peu compliqué de \mathbb{R}^n , exceptée la méthode de Monte-Carlo.

- [Mas87] V. MASLOV, *Méthodes opératorielles*, Edition Mir, Moscou, 1987.
- [Pap95] E. PAP, *Null-Additive Set Functions*, Kluwer, Dordrecht, 1995.
- [dTRS90] P. DEL MORAL, T. THUILLET, G. RIGAL, G. SALUT, « Optimal versus random processes: the nonlinear cases », *Rapport de recherche*, 1990.
- [Qua90] J. QUADRAT, « Théorèmes asymptotiques en programmation dynamique », *Note C.R.A.S.*, 311, 1990, p. 745-748.
- [AQV94] M. AKIAN, J. QUADRAT, M. VIOT, « Bellman Processes », *in: LNC in Control and Information Sciences n. 199 : 11th International Conference on Analysis and Optimization of Systems*, G. Cohen, J.P. Quadrat (éditeurs), Springer-Verlag, 1994.
- [Aki99] M. AKIAN, « Densities of idempotent measures and large deviations », *Transactions of the American Mathematical Society* 351, 11, 1999, p. 4515-4543.

Il existe un moyen systématique de transférer les résultats du calcul des probabilités. C'est l'utilisation de la transformée de Cramer \mathcal{C} définie par

$$\mathcal{C} = \mathcal{F} \circ \log \circ \mathcal{L},$$

où \mathcal{L} désigne la transformée de Laplace, \mathcal{F} la transformée de Fenchel. On a par exemple :

$$\mathcal{C}(\mathcal{N}_{m,\sigma}) = \mathcal{Q}_{m,\sigma}.$$

La transformée de Cramer a de nombreuses propriétés. Par exemple, elle transforme les convolutions de mesures en inf-convolutions de coûts convexes. Ses propriétés de continuité pour des topologies adéquates ont été étudiées dans [Aki96]. Elles permettent dans des cas assez restreints (loi log concave) le transfert immédiat des théorèmes asymptotiques du calcul de probabilités à des théorèmes analogues en optimisation.

Pages WEB On pourra consulter les pages web : <http://www-rocq.inria.fr/scilab/cohen>, <http://amadeus.inria.fr/TROPICAL/>, <http://www-rocq.inria.fr/scilab/quadrat>

pour obtenir des informations supplémentaires ou des publications complètes dans ce domaine.

3.2 Systèmes implicites

Participants : R. Nikoukhah, F. Delebecque, S.L. Campbell.

Résumé : *La modélisation des phénomènes physiques conduit souvent à des systèmes implicites. On travaille sur la théorie et les applications de ces systèmes.*

De très nombreux phénomènes physiques sont naturellement modélisables par des systèmes d'équations algébriques-différentielles de type

$$F(\dot{\xi}, \xi, z, t) = 0, \quad (11)$$

ou

$$F_k(\xi_{k+1}, \xi_k, z_k) = 0, \quad (12)$$

en temps discret. En fonction du domaine d'application, le modèle (11) est appelé système descripteur, système implicite, DAE (differential-algebraic equations), modèle comportemental ...

Dans certains cas, même s'il est possible de convertir un modèle implicite en un modèle explicite, il est préférable de garder le modèle implicite pour préserver la structure naturelle du système (par exemple son caractère creux).

La plupart des problèmes classiques de l'automatique tels que la construction d'observateurs, le placement de pôles, le filtre de Kalman, etc ..., peuvent se formuler plus facilement

[Aki96] M. AKIAN, « On the continuity of the Cramer transform », *Rapport de Recherche n° 2841*, Inria, Rocquencourt, 1996, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-2841.html>.

dans un cadre implicite. Il est alors clair que l'étude systématique des propriétés fondamentales des systèmes implicites comme l'existence, l'unicité, la régularité des solutions et l'analyse numérique correspondante sont des points cruciaux pour les applications à l'automatique. De même, le développement de code performant et fiable pour la résolution numérique de ces systèmes est essentiel, aussi bien pour la conception hors ligne de contrôleurs et de filtres, que pour les implémentations temps réel.

Le cas linéaire. Un système linéaire implicite

$$\mathcal{E}\dot{\xi} = \mathcal{F}\xi + \mathcal{G}z, \quad (13)$$

ou sa version discrète

$$\mathcal{E}\xi_{k+1} = \mathcal{F}\xi_k + \mathcal{G}z_k, \quad (14)$$

conduit à l'étude des propriétés du « faisceau » $\{\mathcal{E}, \mathcal{F}\}$ (en général non carré). Une théorie géométrique générale existe pour les faisceaux de matrices. Cette théorie peut être utilisée pour montrer et souvent généraliser un grand nombre de résultats en théorie des systèmes linéaires. Pour donner un exemple simple, considérons le système

$$\dot{x} = Ax + Bu. \quad (15)$$

Toutes les propriétés de commandabilité de ce système sont contenues dans le faisceau singulier $\{[I \ 0], [A \ B]\}$ qui correspond au système implicite (13) obtenu à partir de (15) en posant $\xi = \begin{pmatrix} x \\ u \end{pmatrix}$. Dans cet exemple, le calcul d'un certain sous-espace (ou plus exactement d'une paire de sous-espaces) donne à la fois des propriétés qualitatives de commandabilité et permet de calculer une matrice de gain plaçant les pôles commandables. La géométrie d'un faisceau général peut être assez complexe car on peut combiner de manière combinatoire les sous-espaces associés (noyau, image, modes stables, modes statiques, modes impulsions, etc). Ces sous-espaces peuvent être obtenus par des opérations numériques dont on peut contrôler le conditionnement.

Le point de vue implicite est intéressant car il englobe dans un cadre unique les problèmes classiques. Par exemple, il est bien connu que la solution des diverses formes de l'équation de Riccati algébrique peut être construite très efficacement en calculant les sous-espaces stables des Hamiltoniens associés qui sont encore des faisceaux de matrices [12]. En fait ce faisceau est associé au système implicite aux deux bouts donné par les conditions nécessaires d'optimalité.

C'est en adoptant ce point de vue qu'on a pu étendre plusieurs résultats classiques au cas implicite, ce qui conduit à des problèmes originaux et à généraliser des concepts bien établis. Montrons cela sur l'observabilité. Considérons le système dynamique à entrée inconnue

$$\dot{x} = Ax + Bu + Mv, \quad (16)$$

$$y = Cx + Du + Nv, \quad (17)$$

où le vecteur v désigne l'entrée inconnue. Dans cette modélisation, ce qui compte est qu'on a des vecteurs inconnus (x et v), des vecteurs connus (u et y) et un ensemble d'équations. Il est donc naturel de considérer le modèle implicite 13 où $\{\mathcal{E}, \mathcal{F}\}$ est un faisceau arbitraire en

posant $\xi = (x, v)$ et $z = (u, y)$. Pour ce modèle on a pu caractériser complètement les signaux $w = H\xi$ qui peuvent être reconstruits à partir des entrées et sorties connues du modèle (le noyau de H est le sous-espace inobservable).

L'approche consiste à construire par un algorithme (numériquement stable) un certain sous espace \mathcal{Z} associé au modèle implicite 13 qui généralise le sous espace d'inobservabilité classique : tous les signaux de la forme $w = H\xi$ avec $\ker(H) \supset \mathcal{Z}$ sont reconstructibles par un observateur causal qui est construit comme un sous produit de l'algorithme.

On a étudié les problèmes de caractérisation des propriétés géométriques et de stabilité [13], filtrage de Kalman [11, 12], construction d'observateurs « tracking » [16], etc .. On a aussi étudié l'application de ces méthodes aux systèmes classiques par exemple pour la construction du filtre générateur de résidus [14] et les problèmes de découplage. On a aussi étudié la construction d'observateurs pour des systèmes linéaires non stationnaires [SND99]. Cette classe de systèmes a été beaucoup étudiée ces dernières années et une théorie générale se développe.

Le cas non linéaire. En reprenant le point de vue implicite discuté plus haut pour reformuler des problèmes d'automatique non linéaire, on s'intéresse aux systèmes implicites non linéaires. Ces problèmes sont en général d'indice élevé et/ou mal défini (l'indice d'un système implicite correspond en gros au nombre de fois qu'il faut dériver ses équations pour le rendre explicite), contrairement par exemple au cas des systèmes utilisés pour les simulations en mécanique où l'indice est structurel. Un simple modèle de bras de robot commandé pour suivre une trajectoire peut conduire à un système d'indice cinq.

Contrairement à d'autres approches basées sur l'inversion, pour faire de la commande ou de l'observation, on ne cherche pas une formule explicite, mais on admet que la solution puisse être le résultat d'un solveur numérique implémenté en temps réel. En particulier, pour les problèmes de suivi de trajectoires cela nous a permis de proposer une nouvelle méthode de commande prédictive, appelée DPC (descriptor predictive control). Dans cette méthode, la contrainte de trajectoire est rajoutée aux dynamiques du système pour obtenir un système implicite en (x, u) .

L'indice de ce système, souvent élevé, peut aussi être réduit, si la complexité le permet, par des méthodes formelles. Puis, une solution numérique est calculée par un solveur numérique et appliquée sur une fenêtre glissante. Le contrôle obtenu par cette stratégie, n'est en général pas stabilisant. Pour que cette approche puisse marcher, on a montré qu'il faut effectuer un feedback préliminaire linéaire approprié. Ce feedback nécessite encore le calcul de certains sous-espaces liés au faisceau linéaire tangent [16].

La même idée a été utilisée pour la construction d'observateurs non linéaires.

Le cadre implicite est aussi un point de passage obligé pour la définition d'un formalisme modélisant un système hybride général. On s'intéresse à ce problème car même pour modéliser le plus simple des systèmes réels commandés, on doit considérer le couplage d'un système discret (en l'occurrence le contrôleur) et l'environnement continu (souvent implicite). On a commencé à étudier un formalisme mathématique pour définir les systèmes hybrides (à composantes continues, discrètes et événementielles) (voir 5.2).

[SND99] S.L. CAMPBELL, R. NIKOUKHAH, F. DELEBECQUE, « Nonlinear descriptor systems », *in: Advances in Control*, P.M. Frank (éditeur), Springer Verlag, 1999.

3.3 Détection de pannes dans les systèmes dynamiques

Participants : R. Nikoukhah, F. Delebecque, S.L. Campbell, M. Goursat.

On peut classer les problèmes de détection de pannes en deux catégories : la détection passive et la détection active. Dans le cas passif, on suppose que le détecteur observe les entrées et les sorties du système qui est sous surveillance mais qu'il ne peut en aucun cas agir sur le système. La plupart des systèmes de surveillance sont de ce type. Les méthodes classiques de conception de détecteur dans ce cas sont basées sur la construction des observateurs ou des filtres de Kalman. L'application des résultats obtenus dans l'étude des systèmes implicites permet d'obtenir des méthodes de conception de détecteur plus simples et numériquement fiables.

Dans certains cas, en particulier quand le système sous surveillance est un système commandé, la surveillance passive n'est pas satisfaisante. La propriété (désirable) de robustesse du contrôleur fait que les changements du comportement du système sont gommés. Cela, clairement, diminue la performance du détecteur de pannes. Une solution pour contourner ce problème est d'injecter, régulièrement ou à des instants critiques, un signal auxiliaire pour « secouer » le système et exhiber les pannes potentielles. Il est bien entendu préférable que ce signal n'affecte pas trop le fonctionnement normal du système. On a développé une méthodologie pour la construction des signaux auxiliaires de faible énergie et des détecteurs correspondants. On travaille sur la généralisation de ces résultats pour mieux intégrer les incertitudes de modèle.

La détection de panne pour les systèmes passifs est également un sujet d'intérêt depuis plusieurs années. La première étape a été de développer des méthodes d'identification aveugle c'est à dire avec la seule observation de la sortie du système, celui-ci étant en fonctionnement et soumis à l'excitation ambiante. Les cas applicatifs traités étaient par exemple les machines tournantes de centrales électriques, la fusée Ariane 5, les châssis d'automobiles, les ponts . . .

Les problèmes de détection de changement (plutôt que de panne véritable) ont été largement abordés mais de nombreux tests restent à développer et mettre au point. Le problème traité dans le cadre d'un projet Eureka est celui du suivi de l'amortissement des modes d'un avion en vol pour détecter une apparition possible du flottement qui conduit à la destruction de l'appareil. Les autres cas concernent les ouvrages d'art où les tests doivent être robustes vis à vis des changements de certains paramètres (vent, température, pluie . . .). Enfin la partie diagnostic physique est encore un sujet de recherche pour une longue période (Ces études sont menées avec le projet Sigma2 de Rennes).

4 Domaines d'applications

4.1 Transport

Un domaine d'application privilégié est en train d'apparaître dans le projet grâce aux collaborations avec les équipes s'occupant de Lara (La Route Automatisée) à l'Inrets et à l'Inria ainsi que l'équipe à l'ENPC-Cermics autour de G. Cohen.

Plusieurs motivations conduisent à s'intéresser aux problèmes de transports.

1. La recherche d'application de la boîte à outils Metanet de Scilab et de façon plus générale à Scilab.

2. L'application de la théorie des systèmes max-plus linéaires.
3. Le développement d'une boîte à outils transport dans Scilab.

Ce domaine d'application crucial ne semble pas complètement fédéré au niveau logiciel. D'autre part le point de vue théorie des systèmes semble largement développable dans cette application. Malgré une recherche intense pendant plusieurs décennies, les problèmes restent ouverts du fait de leur taille et complexité. D'autre part les données relevant des pouvoirs publics sont accessibles contrairement à beaucoup de domaines industriels où le secret nuit à la diffusion de l'information.

5 Logiciels

5.1 Scilab

Participants : F. Delebecque, C. Gomez, M. Goursat, R. Nikoukhah, S. Steer, J.-Ph. Chancelier.

Scilab est un logiciel interactif dédié aux calculs numériques. Il contient des centaines de fonctions mathématiques, des structures de données sophistiquées (incluant les listes, les polynômes, les fractions rationnelles, les systèmes linéaires), un interpréteur et un langage de programmation de haut niveau, de grandes possibilités graphiques 2D, 3D, avec animation, ainsi que des liens avec le système de calcul formel.

Scilab a été conçu pour être un système le plus ouvert possible avec la possibilité de définir de nouvelles fonctions, de nouvelles primitives et de nouveau type de données.

5.1.1 Diffusion

La diffusion de Scilab sur l'année 2001 a encore augmenté significativement sur le site ftp de l'Inria, un afflux de contributions confirme l'impact de ce logiciel. Ce type de logiciel est aujourd'hui indispensable dans de très nombreux secteurs de l'industrie et de la recherche mais aussi de l'enseignement.

Cet attrait résulte essentiellement dans l'accès très facile, à travers un environnement homogène, à toutes les composantes du calcul numérique, du graphique ainsi qu'aux outils d'interfaces homme-machine au prix d'un effort de programmation très faible comparé à la réalisation de programmes « classiques ».

Le niveau de diffusion impose d'avoir un produit de très grande qualité et de changer de mode de « gestion » en ouvrant le plus possible son développement à des partenaires extérieurs.

5.1.2 Scilab et la recherche

Scilab est un bon intégrateur pour ce qui se fait à l'Inria et dans la recherche. C'est donc un outil indispensable de diffusion des résultats de recherche.

En quelques années Scilab a servi de base à la diffusion des travaux de recherche du projet (LMIttool, Boite à outil H-infini, Max-Plus) et d'autres projets Inria (Fractales) ainsi que d'autres laboratoires. Cette tendance doit s'amplifier dans le futur (statistiques avec le projet

Sodas, éléments finis avec le projet Gamma, calcul parallèle avec les projets ReMaP et Résédas, calcul formel, algorithmique pour l'automatique dans le cadre du réseau européen Niconet, boîte à outil Finance avec le projet Mathfi, ...)

La maîtrise du code a facilité le développement d'une boîte à outils max-plus.

5.1.3 Scilab et le projet

Après une longue période de développement du noyau du logiciel et d'une base raisonnable de boîtes à outils qui a reposé quasi exclusivement sur les forces du projet, Scilab peut et doit jouer pleinement son rôle d'intégrateur. Le rôle du projet vis à vis de Scilab va se transformer progressivement dans deux directions : formation, coordination, animation, aide aux développements d'une part, réalisation de boîtes à outils résultant des travaux de recherche.

Les efforts en 2000 ont été dans ce sens. On peut donc citer la participation à la première session de formation organisée par Saphir Control, la préparation du lancement d'un consortium, l'organisation d'un workshop en Inde et en Chine, les réunions avec quelques grands industriels français et la rédaction d'un ouvrage en français (à paraître fin 2000/début 2001 chez Springer).

5.1.4 Scilab et l'enseignement

Scilab est actuellement utilisé à l'université, dans des écoles d'ingénieurs ; il a également été choisi pour l'épreuve de modélisation de l'agrégation externe de mathématiques. Il y a un avantage important pour les étudiants : disposer librement d'une version personnelle.

Pour la diffusion de Scilab, des contacts ont été pris avec des responsables de l'Education Nationale. Un CD-Rom contenant Scilab, MuPAD et CAML devrait être réalisé par l'Inria puis édité et diffusé par le CNDP (voir 5.4).

5.2 Systèmes dynamiques hybrides - Scicos

Participants : R. Nikoukhah, S. Steer.

On a développé un formalisme mathématique pour modéliser les systèmes dynamiques hybrides, c.à.d des systèmes incluant des parties continues, discrètes et événementielles. La motivation première pour ce travail était la construction d'un outil pour modéliser et simuler les systèmes de détection de pannes qui sont de nature hybride. Cet outil, nommé Scicos, a très rapidement trouvé des applications dans divers domaines. En particulier, il a été utilisé par EDF dans le domaine de la régulation des aménagement hydrauliques et on l'a utilisé pour modéliser un moteur à injection directe et de valider par simulation son régulateur dans le cadre d'un contrat avec Renault. Le travail a aboutit à un brevet : *Procédé de commande d'un moteur à combustion interne*^[RSJ]. L'utilisation de Scicos dans des vraies applications industrielles a beaucoup contribué à son développement. Scicos comprend un éditeur graphique (type schéma blocs) permettant la construction interactive de modèles, un compilateur et un simulateur.

[RSJ] V. RAUCH, M. SORINE, H. JREIJ, « Procédé de commande d'un moteur à combustion interne », Brevet. Numéro d'enregistrement national : 99 02505.

Il existe de nombreux formalismes de modélisation de systèmes hybrides. Le souci principal ici était l'efficacité de la simulation et de la génération de codes donc elle ne pouvait pas par exemple ignorer les propriétés du solveur numérique utilisé pour la simulation. Le formalisme Scicos est inspiré en partie par le langage Signal et en particulier de son extension en temps continu.

Scicos est actuellement utilisé dans plusieurs domaines d'application chez Eurocopter, ESA, EDF . . . Il est aussi utilisé par des chercheurs ; par exemple à l'Inria, Scicos est utilisé, entre autres, pour analyser des signaux dans le domaine médical et pour simuler le comportement de voitures électriques.

Dans le cadre d'un contrat RNTL débuté en 2001 le formalisme de Scicos va être étendu pour permettre la modélisation et la simulation des systèmes dynamiques implicites.

5.3 Metanet

Participants : C. Gomez, M. Goursat, J.Ph. Chancelier.

J.P. Chancelier a ré-écrit le programme de visualisation des graphes en utilisant les fonctions internes de Scilab, ce qui permet à ce programme, appelé Scigraph, d'être indépendant des plates-formes et de fonctionner en particulier sous Windows.

5.4 CDROM : suite de calcul scientifique

Participants : C. Gomez, F. Delebecque.

Nous réalisons, avec l'aide du ministère de l'éducation nationale et de la recherche, une suite de calcul scientifique sous la forme d'un CDROM. Il contiendra les logiciels Scilab, CAML et MuPAD Light. Ce CDROM sera diffusé par le CNDP.

Le public visé pour ce CDROM, en plus des étudiants qui préparent l'agrégation de mathématiques (Scilab et MuPAD sont deux des logiciels choisis pour l'épreuve d'oral de modélisation) et des universitaires, est celui des classes scientifiques des lycées : secondaire, STS, et classes préparatoires aux grandes écoles. C'est dans le but de toucher ce dernier public qu'ont été réalisés :

- la traduction en français d'une grande partie de l'aide en ligne de Scilab (cette partie a été choisie en collaboration avec des professeurs de mathématiques) ;
- le changement du format de l'aide en ligne (XML, HTML) de Scilab afin de le rendre hypertexte ;
- l'intégration à la distribution Scilab sous Windows d'un éditeur.

Ces travaux ont été financés par le ministère de l'éducation nationale et de la recherche. Pour les réaliser, nous avons embauché Matthieu Philippe comme ingénieur expert.

De plus, une convention réalisée spécialement pour ce CDROM avec la société Sciface qui distribue MuPAD permet aux lycées d'utiliser le logiciel MuPAD Light dans le cadre de l'enseignement.

Ce CDROM sera disponible en début 2002 et doit permettre de toucher le public des lycées.

6 Résultats nouveaux

6.1 CAO en Automatique

6.1.1 Liens Scilab - Calcul formel

Participant : C. Gomez.

La liaison entre Scilab et le système de calcul formel MuPAD est aujourd'hui en beta-test dans la version 2.1 de MuPAD qui devrait sortir en 2002. Cette liaison fonctionne de la façon suivante : Scilab est lié à MuPAD par l'intermédiaire du protocole UDX, réalisé par Fabrice Rouillier (projet Polka) et Jean-Charles Faugères (LIP6). Un domaine Scilab a été créé dans l'environnement MuPAD et il est alors possible à partir de MuPAD d'appeler toutes les fonctions Scilab : les types de données sont traduits au vol entre les deux systèmes.

A notre connaissance, c'est la première fois qu'une telle intégration d'un système de calcul numérique complet a été réalisée à l'intérieur d'un système de calcul formel.

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un contrat avec la société Sciface qui distribue MuPAD.

6.1.2 Scicos implicite

Participants : S. Steer, R. Nikoukhah, R. Djenidi.

Un axe important du développement de Scicos est l'extension de son formalisme pour permettre l'utilisation des blocs « implicites ». Cela permettra l'utilisation directe de blocs correspondants aux entités physiques comme des composant électriques (moteur, résistance, capacité, ...) hydraulique (injecteur, tuyau, valve),... et donnerait des schémas plus lisibles dans ces domaines d'application. Ce travail a débuté en septembre dans le cadre d'un contrat RNTL (Simpa) en collaboration avec des chercheurs de l'IFP, d'EDF et d'ingénieurs de TNI et Saphir-Control. L'année 2001 a été essentiellement consacrer a l'analyse de l'existant (formalisme Modelica pour les systèmes continus), de premières réflexions sur l'évolution de l'éditeur de Scicos et la mise en place du groupe de travail.

6.1.3 Amélioration des fonctionnalités existantes

Mise à jour de bibliothèques **Participants** : F. Delebecque, P. Petkov, S. Steer.

La plupart des primitives d'algèbre linéaires ont été réécrites pour utiliser les modules de la bibliothèque Lapack. Ces primitives ont été écrites en utilisant les nouvelles fonctions d'interface (API) de Scilab, ce qui permet une meilleure lisibilité du code. Les API Scilab ont aussi été améliorées, en particulier pour utiliser l'arithmétique complexe. La librairie Lapack possède des versions optimisées sur les principales stations de travail, ce qui améliore sensiblement l'efficacité de Scilab.

Génération de code associé à un schéma Scicos **Participants** : R. Djenidi, R.

Nikoukhah.

La génération automatique de code dans Scicos est une fonctionnalité qui existe sous la forme d'une boîte à outils bientôt disponible sur le site de Scilab.

Elle a été améliorée pour permettre l'utilisation du code généré à la fois en post-processing dans Scicos et sous forme d'une procédure C à implanter sur une architecture matérielle. Des applications et des adaptations sont envisagées dans le cadre du projet RNTL Simpa et de l'appel d'offre Sacso.

Traducteur Matlab Participants : S. Steer, J.P. Chancelier, X. Leroy, P. Weis.

L'objectif ici est de permettre de traduire, le plus automatiquement possible des ensembles de fonctions écrites en Matlab en fonction en code scilab. Ce besoin ressort très fortement de nos contacts avec les utilisateurs académiques et industriel. La grande proximité des langages peut laisser penser que la traduction est simple à réaliser. En fait du fait de choix différents réalisés pour chaque langage, le typage et le dimensionnement dynamique impose que le traducteur infère ces propriétés pour être en mesure de réaliser la traduction correcte.

Une première version de ce traducteur, adapté à Matlab version 4, et mettant en oeuvre une inférence « directe » a été réalisée en langage Scilab, l'adaptation de ce traducteur pour prendre en compte l'évolution syntaxique et les types de données hiérarchique de Matlab version 6 est débuté en 2000 n'a pu être terminé en 2001 faute de temps.

En parallèle une réflexion a débuté en collaboration avec l'ENPC et le projet Cristal pour utiliser les outils d'inférence de CAML. Il ressort de cette réflexion que l'absence de typage et de dimensionnement conjugué avec le polymorphisme des fonctions pose de réelles difficultés.

Interface Graphique Participants : M. Philippe (Saphir Control), S. Steer, D. Abdemouche.

Le but de cette activité est de faire fonctionner le graphique en utilisant une structure d'objets hiérarchisés en fonction des objets graphiques manipulés et de leurs propriétés (fenêtre, axes et changements de coordonnées, courbes, textes, surfaces, ...). La première phase de ce travail a consisté à étudier les systèmes graphiques (Matlab, GnuPlot, Xfig, ...) pour déterminer la hiérarchie des objets. Les structures de données ont ensuite été programmées en C ainsi que les fonctions d'accès aux paramètres. Un nouveau mode graphique a ensuite été créé dans Scilab qui permet l'usage de ces structures tout en conservant les autres modes pour la compatibilité ascendante. Ce nouveau mode de gestion des graphiques, autorise la modification a posteriori des propriétés des objets affichés et donc la réalisation d'éditeurs graphiques et de d'interface utilisateurs puissantes.

Une première version a été menée à bien par M. Philippe pour windows. Ces travaux sont poursuivis (intégration dans la version courante de Scilab et les adaptations pour Unix) par D. Abdemouche depuis septembre avec comme premier objectif d'assurer la compatibilité ascendante tout en permettant l'usage de ce nouveau mode.

Modularité-Portabilité **Participants** : J.P. Chancelier, S. Steer.

De plus en plus de développements autour de Scilab s'effectuent sous forme de boîtes à outils qui sont diffusées indépendamment du logiciel lui même (« contributions »). Ces boîtes à outils peuvent comprendre du code en C ou Fortran, des fonctions Scilab, des fichiers d'aide en ligne, de démonstration, de documentation et de test. Elles peuvent aussi, à l'exemple de la boîte à outil MaxPlus définir de nouveaux types de données. Le mécanisme de surcharge des opérateurs et fonctions a été étendu aux fonction des sauvegarde. Des fonctions Scilab ont été développées pour permettre de construire la version exécutable de ces boîtes à outils de façon simple et indépendante du système hôte (Unix/Windows). La gestion des aides en lignes et des fichiers de démonstration a été modifié pour permettre l'ajout de « contributions » sans avoir à modifier le code de Scilab. Enfin des fonctions Scilab ont été développées pour assurer la traduction des fichiers sources d'aide en ligne (troff) sous forme textuelle, LaTeX ou HTML en remplacement des outils Unix.

Help hypertexte **Participants** : M. Philippe (Saphir Control), C. Gomez, S. Steer.

6.1.4 Scilab parallèle

Participants : C. Gomez, M. Goursat, S. Steer.

Nous participons à l'Action de Recherche Coopérative Inria Ouragan (Outils de résolution Appliquée aux Grand Calculs Numériques) pour l'aspect parallélisation de Scilab.

Des adaptations du noyau de Scilab ont été réalisées pour permettre la surcharge de l'affectation.

6.1.5 Boîte à outils Labostat

Participants : C. Klimann, Y. Lechevallier.

La réalisation de la boîte à outils pour la statistique pour le système Scilab a continuée. Les fonctions de base pour des distributions avec des données manquantes ont été réalisées. On a installé une deuxième version sur le site des contributions à Scilab et on est sur le point d'installer la troisième version. Actuellement, on a déjà une version assez avancée des différentes méthodes multivariées. Les tableaux statistiques sont en cours de programmation.

6.2 Commande des Systèmes

6.2.1 Commande de systèmes à retard avec sortie tout-ou-rien

Participants : M. Akian, P.-A. Bliman (Projet Sosso), R. Nussbaum (Rutgers University).

Nous poursuivons l'étude des oscillations de systèmes simples à retard. Les travaux précédents [23, 2] portaient sur l'étude des systèmes $\dot{x} = -\text{sgn}(x(t-1)) + f(x)$ où la fonction f est bornée strictement par 1. Ces systèmes admettent une infinité dénombrable de solutions

périodiques, et tous les cycles rapides sont instables. De plus, le nombre de zéros est localement fini à partir d'un certain temps, ce qui permet de conclure que toute solution est ultimement périodique. Les preuves de ces résultats font intervenir des fonctions contractantes en dimension finie et infinie. L'instabilité des cycles rapides a été généralisée dans [22] au cas où la fonction sgn est remplacée par une nonlinéarité constante par morceaux, antisymétrique. Avec Roger Nussbaum, nous étudions maintenant le cas où la « perturbation » f dépend aussi des valeurs de x aux instants passés, par exemple de $x(t-1), x(t-2), \dots$.

6.2.2 Conception simultanée de contrôleur et de détecteur de pannes

Participants : R. Nikoukhah, J. Khosrowdjerdj.

En général, le problème de conception de détecteur de pannes est traité après la conception du contrôleur. Mais, le choix du contrôleur peut avoir un effet sur la performance du détecteur et donc souvent un compromis doit être recherché entre les deux critères et en particulier entre la robustesse classique du contrôleur et la robustesse vis-à-vis des pannes éventuelles.

On étudie ici le problème de conception simultanée de contrôleur et de détecteur de pannes (Fig. 4) dans le cadre de la thèse de J. Khosrowdjerdj.

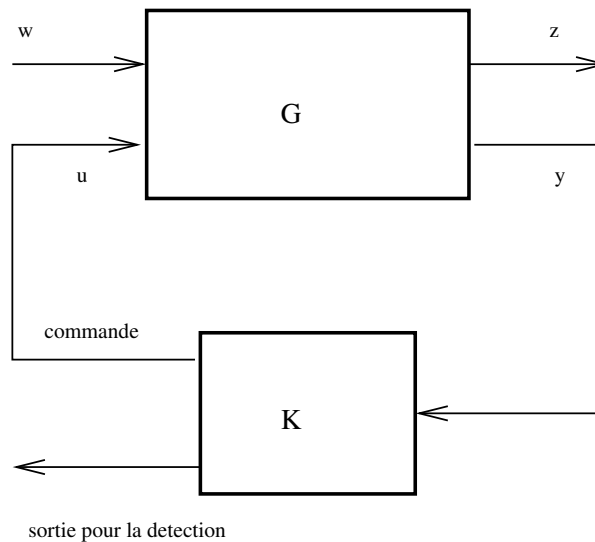


FIG. 4 –

6.2.3 Inéquations variationnelles couplées

Participant : E. Rofman.

En collaboration avec Roberto González nous avons proposé une méthode de décomposition pour la résolution des systèmes couplés d'inéquations variationnelles (VI).

Le cas où les VI sont asymétriques (liées à un problème de jonctions qui nous a été signalé par J.L. Lions) a donné lieu au papier [38]. Dans l'étude du cas non symétrique et plus gé-

néralement pour le cas non linéaire des résultats ont été obtenu avec la collaboration de R. Verdes.

6.3 Systèmes à événements discrets, algèbre max-plus et programmation dynamique

6.3.1 Asymptotique de systèmes dynamiques monotones homogènes

Participant : S. Gaubert.

Dans ce travail commun avec Jeremy Gunawardena (HP-BRIMS), on s'intéresse aux systèmes dynamiques gouvernés par des applications monotones homogènes, et notamment à l'existence de vecteurs propres. Dans [58], nous donnons des conditions générales d'existence, faisant intervenir une suite de graphes agrégés (le graphe qui intervient en théorie de Perron-Frobenius est le premier graphe de cette suite).

6.3.2 Algorithmes d'itérations sur les politiques et jeux stochastiques

Participants : S. Gaubert, J. Cochet-Terrasson.

On a étendu cette année, à l'aide des résultats de [24], l'algorithme d'itération sur les politiques de [GG98a,CTGG99] aux opérateurs de type

$$f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n, \quad f(x) = \min_{u \in U} \max_{v \in V} (c^{u,v} + P^{u,v}x),$$

où $c^{u,v} \in \mathbb{R}^n$, $P^{u,v}$ est une matrice stochastique, et où les indices u, v parcourent des ensembles finis U et V . On obtient ainsi un algorithme hiérarchique permettant de résoudre le problème spectral $f(x) = \lambda + x$, $x \in \mathbb{R}^n, \lambda \in \mathbb{R}$, et ses généralisations. Par exemple, dans le cas de jeux stochastiques répétés à deux joueurs et somme nulle, en information parfaite, λ s'interprète comme le gain moyen de l'un des joueurs, par unité de temps. Ce travail est présenté, avec d'autres, dans la thèse de Cochet-Terrasson [20], et fait également l'objet d'un article en préparation.

6.3.3 Réalisation minimale max-plus

Participant : S. Gaubert.

C'est un travail commun avec N. Portier (ENS-Lyon) et V. Blondel (Cesame).

La réalisation minimale max-plus est un vieux problème, qui consiste à déterminer les réalisations de dimension minimale d'une série rationnelle sur le semi-anneau max-plus. On montre dans [44] que l'ensemble des réalisations est une union finie effectivement calculable de polyèdres. Ce résultat est obtenu via la solution d'un problème plus général : on montre

[GG98a] S. GAUBERT, J. GUNAWARDENA, « The duality theorem for min-max functions », *C.R.A.S* 326, Jan. 1998, p. 43-48.

[CTGG99] J. COCHET-TERRASSON, S. GAUBERT, J. GUNAWARDENA, « A constructive fixed point theorem for min-max functions », *Dynamics and Stability of Systems* 14, 4, 1999.

en fait que si $S = S_0 \oplus S_1X \oplus S_2X^2 \oplus \dots$ est une série rationnelle en une lettre X , dont les coefficients S_0, S_1, \dots appartiennent à un semi-anneau de polynômes max-plus, et que si $T = T_0 \oplus T_1X \oplus T_2X^2 \oplus \dots$ est une série rationnelle en la lettre X , dont les coefficients sont des constantes max-plus, alors l'ensemble des valeurs des indéterminées apparaissant dans les polynômes S_i , qui envoient S sur T , est une union finie de polyèdres. En pratique, ce résultat signifie par exemple que l'ensemble des temporisations d'un graphe d'événements qui réalisent une certaine fonction de transfert est une union finie de polyèdres.

6.3.4 Semimodules Rationnels et Espaces Invariants Max-Plus

Participants : S. Gaubert, R. Katz.

Le but de la thèse de R. Katz, qui a débuté cette année, est de généraliser l'approche géométrique à la Wonham des systèmes linéaires au cas max-plus. Une difficulté essentielle est que même les espaces les plus simples (comme les semimodules commandables, ou les congruences observables), ne sont en général pas finiment engendrés, et que, de manière générale, les arguments artiniens ou noetheriens de la théorie classique ne marchent plus. On tente de remédier à cela en développant une théorie des semimodules rationnels sur le semi-anneau max-plus : ce sont des semi-modules ayant un ensemble de générateurs qui est une partie rationnelle d'un monoïde de type $((\mathbb{Z} \cup \{-\infty\})^n, +)$.

6.3.5 Dimension de l'espace propre d'opérateurs monotones homogènes convexes

Participants : M. Akian, S. Gaubert.

Dans ce travail, nous étudions l'espace propre d'applications monotones homogènes $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, convexes, c'est-à-dire dont toutes les coordonnées sont convexes. De telles applications apparaissent comme opérateurs de la programmation dynamique de problèmes de contrôle optimal ergodique avec nombre fini d'états. Le cas particulier où la dynamique est déterministe correspond aux applications f qui sont linéaires max-plus. Pour ce dernier cas on sait, par le théorème spectral max-plus, et sous une condition de forte connexité du graphe de f , que l'espace propre est un semi-module sur l'algèbre max-plus dont la dimension est égale au nombre de classes critiques (qui sont par définition les composantes connexes du graphe critique). De plus, si c est la cyclicité du graphe critique, c'est-à-dire le p.p.c.m. des p.g.c.d. des longueurs des circuits des classes critiques, alors $f^{kc}(x) - ck\lambda$ converge en temps fini k .

Dans [43, 24], nous étendons le théorème spectral max-plus au cas d'applications monotones homogènes convexes quelconques. Pour cela nous étendons la notion de graphe critique : c'est l'union des classes finales (noeuds et arcs) des matrices de probabilité P « critiques » (les éléments P du sous-différentiel $\partial f(v)$ de f au point v , où v est n'importe quel vecteur propre de f). Nous montrons alors que l'ensemble des vecteurs propres de f est isomorphe à un inf-sous-semi-treillis convexe de dimension au plus s , le nombre de classes critiques. La dimension de ce convexe est égale à s si f est affine par morceaux. Notre résultat étend donc ceux obtenus par Lanery, Romanovsky, et Schweitzer et Federgruen pour les problèmes de contrôle ergodique avec nombre fini de contrôles, qui correspondent justement au cas où f est affine par morceaux.

Nous montrons aussi que si c est la cyclicité du graphe critique, alors $f^{kc}(x) - ck\lambda$ a une limite quand k tend vers l'infini. Ceci implique, en particulier, que les longueurs possibles des orbites périodiques de f sont exactement les ordres des permutations à n éléments.

On étudie maintenant les généralisations en dimension infinie, d'une part dans le cas dénombrable, d'autre part dans le cas continu au moyen de la notion de solution de viscosité. Le cas particulier d'unicité ($s = 1$) a déjà inspiré un résultat d'unicité pour une inéquation variationnelle ergodique particulière dans [25].

6.3.6 Transformée de Fenchel généralisée

Participants : M. Akian, S. Gaubert, V. Kolokoltsov (Nottingham Trent University).

Nous poursuivons l'étude des opérateurs linéaires max-plus de dimension infinie. On sait qu'un opérateur linéaire max-plus B opérant sur l'espace des fonctions continues de Y dans \mathbb{R} , et à valeurs dans l'espace des fonctions de X dans \mathbb{R} , s'écrit $Bf(x) = \sup\{b(x, y) - f(y), y \in Y\}$. Si $b(x, y) = \langle x, y \rangle$ et X est le dual de Y , B est exactement la transformée de Fenchel. Les notions de correspondance de Galois ou de résiduation permettent alors de calculer facilement l'image de l'opérateur B . Dans [66], nous caractérisons cette image en termes de recouvrement de l'espace X . Nous caractérisons aussi l'injectivité en un point par la minimalité de ce recouvrement. Dans le cas de la transformée de Fenchel, l'injectivité est obtenue par exemple pour les fonctions convexes essentiellement régulières. Ces résultats généralisent ceux de K. Zimmerman sur les opérateurs de dimension finie. La suite de l'étude concernera l'extension à la dimension infinie de la caractérisation de Butkovič [But00] en termes de permanents ainsi que les liens avec le problème de Monge-Kantorovitch.

6.3.7 Analyse convexe dans l'algèbre maxplus

Participants : G. Cohen, S. Gaubert, J.P. Quadrat.

Le travail réalisé l'an dernier sur le théorème de séparation d'un convexe maxplus et d'un point a été généralisé cette année à la dimension infinie. Le travail a été présenté au « Workshop IFAC Workshop on MaxPlus Algebra August 2000 ». Ce travail a donné lieu à une coopération avec I. Singer de l'Institut de Mathématiques de l'académie de Roumanie qui nous a rendu visite pendant une semaine pour approfondir les liens de ce résultat avec ce qu'il appelle la convexité abstraite.

6.3.8 Géodésique dans des réseaux

Participants : O. Fall, J.P. Quadrat.

Dans le cadre de son travail de thèse O. Fall a réalisé un programme permettant de calculer les géodésiques d'un réseau dont les noeuds sont les points d'abscisses entiers d'un simplexe de R^n . Le but est d'obtenir les analogues des réseaux de Jackson dans l'algèbre maxplus.

[But00] P. BUTKOVIČ, « Simple image set of (max, +) linear mappings », *Discrete Appl. Math.* 105, 1-3, 2000, p. 73-86.

Ce programme permettra de tester des. Il permet également de résoudre des problèmes de programmation dynamique dans R^n lorsque le nombre d'états reste raisonnable. Il a été réalisé dans Scilab.

6.3.9 Perturbations de valeurs propres et vecteurs propres et algèbre max-plus

Participants : M. Akian, S. Gaubert, R. Bapat (Indian Statistical Institute, New Delhi).

Dans ce travail, on poursuit l'étude de l'asymptotique de valeurs propres et de vecteurs propres de matrices. Dans [1], on s'intéressait seulement aux valeurs propres de Perron de matrices à coefficients positifs ou nuls. Dans [42], on obtient, sous une condition de non dégénérescence, les asymptotiques du premier ordre de toutes les valeurs propres d'une matrice \mathcal{A}_ϵ , étant données celles de ses coefficients. En particulier, si les coefficients vérifient $(\mathcal{A}_\epsilon)_{ij} \sim a_{ij}\epsilon^{A_{ij}}$ quand ϵ tend vers 0, pour certains $a_{ij} \in \mathbb{C}$ et $A_{ij} \in \mathbb{R}$, les ordres de grandeurs (exposants) des différentes valeurs propres sont obtenues comme valeurs propres min-plus de compléments de Schur min-plus calculés à partir de la matrice $A = (A_{ij})$ des exposants de \mathcal{A}_ϵ . Ce résultat fournit une interprétation en terme de graphe des pentes du polygone de Newton du polynôme caractéristique de \mathcal{A}_ϵ . Il explique aussi les ordres de grandeurs des valeurs propres obtenus par la théorie des perturbations de Lidskiĭ, Višik et Ljusternik, et permet de résoudre certains des cas qui étaient singuliers dans cette théorie.

6.4 Transports

6.4.1 LaRA : la route automatisée

Participants : C. Gomez, M. Goursat.

L'an dernier, le travail qui a été réalisé en collaboration avec le Livic (Laboratoire sur les Interactions Véhicules-Infrastructure-Conducteurs, laboratoire commun Inrets-LCPC) dans le cadre d'un contrat avec la DSCR s'est terminé. Il consistait en la partie optimisation et commande de l'étude complète réalisée par le Livic (comprenant des études socio-économiques, l'architecture, ...) sur la route automatisée. Cette étude s'appliquait aux véhicules légers.

Cette étude redémarre cette fin d'année dans le cadre d'une convention avec la DRAST (Direction de la recherche et des affaires techniques du ministère de l'équipement). Elle s'applique maintenant aux poids lourds.

6.4.2 Calcul de plan de feux de circulation des villes à géométrie régulière

Participants : G. Cohen, S. Gaubert, E. Mancinelli, J.P. Quadrat, E. Rofman.

Le travail entrepris les années précédentes sur le calcul des plans de feux de circulation dans des villes régulières a fait l'objet d'un rapport Inria paru cette année [56]. Une coopération avec l'université de Bahia Blanca (Argentine) a été organisée par E. Rofman. Elle a pour but de faire un programme de simulation de la circulation dans cette ville et de voir l'intérêt du plan de circulation proposé.

6.4.3 Modélisation microscopique du trafic

Participants : P. Lotito, E. Mancinelli, J.P. Quadrat.

Mots clés : algèbre max-plus, système à événements discrets, transport, trafic.

Modélisation microscopique du transport a été entrepris l'an dernier.

Le trafic sur une voie unique (donc sans dépassement possible) peut être modélisé de façon linéaire dans l'algèbre max-plus. Le cas stochastique, proposé par V. Malyshev, dans lequel le conducteur tire sa vitesse désirée au hasard parmi 2 valeurs possibles a été résolu l'an dernier. Le calcul de la vitesse moyenne conduit au calcul d'un exposant de Lyapounov de matrices max-plus stochastiques. Cet exposant de Lyapounov peut être calculé comme solution d'un système récurrent assez simple. La loi fondamentale liant le flôt à la densité de véhicule peut ainsi être obtenue assez facilement dans ce cadre d'hypothèses.

Dans le cas déterministe le conducteur désire avancer à une vitesse donnée et n'avance que de la quantité possible (définie comme la distance séparant le véhicule de celui qui le précède aux moments discrets de prise de décision). Ce modèle n'est pas anticipatif (un conducteur ne prédit pas l'endroit où se trouvera le véhicule qui le précède à l'instant suivant). Ce modèle très simple relève de la théorie des processus d'exclusion et a été étudié par plusieurs auteurs. Ce modèle étant un cas particulier du cas stochastique précédent est linéaire max-plus et déterministe. Le calcul de la loi fondamentale du trafic se ramène donc au calcul de la valeur propre d'une matrice max-plus comme fonction du nombre de véhicule du système. L'évaluation de cette fonction fait apparaître deux phases possibles correspondant aux deux types de circuits critiques possibles des graphes d'incidences associés aux matrices max-plus décrivant la dynamique du système. Ce modèle déterministe donne les comportements qualitatifs observés. Le modèle stochastique au prix de calcul beaucoup plus compliqué ne fait que lisser la fonction densité flôt obtenu par le modèle déterministe.

Ces résultats ont été présentés par E. Mancinelli au séminaire Inrets « Modélisation du trafic » Avril 2001 et font l'objet d'un rapport Inria [62].

6.4.4 Equilibre de Wardrop et boîte à outils trafic de Scilab

Participants : G. Cohen, P. Lotito, E. Mancinelli, J.P. Quadrat, L. Wynter.

Mots clés : transport, trafic.

Un problème important dans l'étude du trafic routier est l'évaluation des flôts de voitures sur les routes d'un réseau donné. Les demandes de transport pour tous les couples origines-destinations étant supposées connues le calcul des flôts sur les arcs est souvent ramené au calcul d'un « équilibre de Wardrop » qui consiste à supposer que les usagers ont une information parfaite sur le réseau qui les conduit à n'utiliser que les routes de temps de parcours minimal. On se donne alors sur chaque route une relation liant le temps de parcours au flôt sur chaque arc. L'équilibre sera atteint si tous les chemins utilisés pour aller d'un point à un autre ont le même de temps de parcours.

On peut aussi utiliser des équilibres stochastiques. Dans les modèles « logit » on suppose que la probabilité de choisir un chemin plutôt qu'un autre parmi les chemins ayant mêmes

origine et destination, indexés par i , est proportionnelle à $e^{-\theta\tau_i}$ où τ_i désigne le temps de parcours du chemin i et θ un degré de stochasticité. Pour des temps de parcours donnés les flôts sur les arcs peuvent être calculés. Si les temps de parcours sur les arcs dépendent des flôts on définit ainsi un système implicite dont les solutions seront appelées équilibres stochastiques.

Le calcul de ces équilibres conduit à la résolution de problèmes d'optimisation de très grande taille. Si le nombre de noeuds du réseau est N le nombre d'arcs est de l'ordre de kN (avec k petit 3 ou 4), le nombre de couples origine-destination est N^2 , le nombre de variable à calculer est donc kN^3 . L'aspect algorithmique pour résoudre ce problème a fait l'objet de très nombreuses recherches et de plusieurs logiciels commerciaux.

Le but de ce travail est de réaliser une boîte à outils dans Scilab permettant de calculer ces équilibres. Ce travail a été commencé l'an dernier en utilisant les algorithmes les plus simples. Cette année l'algorithme DSD a été implémenté et une première version de la boîte à outils a été réalisée. Un contrat de la DTT (Direction des Transports Terrestres) du ministère des transports a été obtenue pour continuer ce travail. Un exposé sur le travail réalisé a été fait dans le séminaire « Modélisation du trafic » en avril 2001 par P. Lotito. Ce travail a été également présenté par P. Lotito à « 33rd Workshop on High Performance Algorithms and Software for Nonlinear Optimization » Erice Italy - juin 2001.

6.4.5 Tarification optimale de moyens de transport

Participants : G. Cohen, P. Lotito, E. Mancinelli, J.P. Quadrat, L. Wynter.

Dans les paragraphes précédents l'utilité d'un moyen de transport est mesuré en terme de temps de parcours uniquement. Un autre critère important est le coût du transport. Dans les problèmes de tarification l'utilité pour un usager est mesuré en terme d'un compromis entre le coût et le temps passé dans le transport. A tarif donné, l'optimisation de ce critère des usagers détermine les flôts sur les arcs. Le problème de tarification consiste à déterminer les tarifs optimaux de façon à optimiser un autre critère que l'on peut qualifier de collectif. Par exemple une compagnie de transport détermine ses tarifs de façon à maximiser ses profits. Si ses prix sont trop chers peu d'usagers utiliseront ses services et son profit sera faible. Si les tarifs sont très chers beaucoup d'usagers utiliseront ce service mais les gains resteront faible. Ce problème d'optimisation à deux niveaux (le deuxième niveau étant du type équilibre de Wardrop) même dans les cas les plus simples n'est pas convexe. Il est donc très difficile à résoudre en toute généralité.

Il existe dans la littérature de quelques méthodes locales (calcul d'un sous-gradient, ou d'une dérivée directionnelle) pour résoudre le problème bi-niveaux. Nos recherches, présentées lors d'une session sur les problèmes bi-niveaux à Informs, Miami Beach, novembre, 2001, ont montré que les points stationnaires, voire même des points fortement stationnaires (ou minima locaux) ne donneraient pas de solutions intéressantes. Nous avons donc développé une méthode heuristique globale, basé sur une décomposition cyclique, qui donne des solutions remarquables.

On a également montré qu'un algorithme proposé dans la littérature ne converge pas vers l'optimum souhaité dans un article à paraître [28].

Enfin le problème d'équilibre au deuxième niveau peut admettre une formulation variationnelle sans que l'on puisse les interpréter comme les conditions d'optimalité d'un problème

d'optimisation. Il faut alors résoudre ce système d'inégalités. Un nouveau cadre d'hypothèses permettant le calcul de ces équilibres a été donné dans [63].

6.4.6 Tarification optimale des réseaux de télécommunication et optimisation bi-niveaux

Participante : L. Wynter.

Contrairement au problème de tarification optimale des réseaux de transports, le problème de tarification des services de télécommunications et Internet ne se définit pas en général pas en terme d'équilibres de Wardrop. Cependant, on y retrouve la même structure d'optimisation bi-niveaux, avec les mêmes difficultés liées à la non-convexité et la grande taille du système. L'application d'une version restreinte de l'optimisation bi-niveaux qui se définit comme un problème de point col a été proposé comme extension à un modèle courant d'allocation et tarification d'Internet, celui appelé « Proportional Fairness ». Ce travail a été présenté au congrès *Informatics* à Miami Beach en novembre et un article a été soumis.

Une étude expérimentale, sur la version restreinte du problème biniveau, basée sur le modèle d'équilibre du transport, et utilisant la boîte à outils transport, a été faite par un étudiant de l'UVSQ de Laura Wynter. Cette étude sera étendue au modèle de « Proportional Fairness » des télécommunications.

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 Identification aveugle, suivi des modes et tests

Participant : M. Goursat.

C'est un travail mené de longue date avec le projet Sigma2 de Rennes (voir le site web de Sigma2 pour une présentation complète). Il s'agit de compléter et enrichir les méthodes de type « sous-espaces » que nous utilisons régulièrement. Le premier projet Eureka (baptisé *Synopsis*) s'étant déroulé dans d'excellentes conditions, il est suivi par un second appelé *Flite* dont les travaux de recherche sont dans le prolongement du précédent. Les principaux partenaires industriels sont Airbus France et Dassault Aviation : ce sont eux qui fournissent le problème clef de ce projet. En cours de vol les caractéristiques modales d'un avion évoluent et il s'agit de surveiller les valeurs des amortissements pour certains modes critiques : ceux qui, dans certaines conditions de vol peuvent provoquer le phénomène de flottement qui détruit l'appareil. Les applications de cette technique ne se limitent pas au flottement. Cette méthode pourra également être utilisée pour les études préliminaires pour la certification des appareils, la définition des domaines de vol . . .

7.2 Projet Sacso

Participants : R. Nikoukhah, S. Steer.

Nous avons participé à l'élaboration d'une réponse à l'appel d'offre Sacso (CNES) sur la réalisation d'un atelier de simulation SCAO basé sur l'utilisation de Scilab/Scicos.

7.3 RNTL2

Participants : R. Nikoukhah, H. Jreij (Saphir Control), S. Steer.

Nous avons retravaillé la proposition de projet MOSIM2 (génération de code temps réel à partir de Scicos/Syndex). Ce projet sera soumis avec nos partenaires (Projet Inria Sosso, Y.Sorel, Alcatel, Peugeot, CS, Saphir-Control) fin janvier 2002.

7.4 Projet RNTL SIMPA

Participants : R. Nikoukhah, S. Steer, H. Jreij (Saphir Control), R. Djenidi.

La version actuelle de Scicos permet de modéliser, sous forme de schéma blocs, les systèmes dynamiques hybrides c'est à dire régis par des équations différentielles et des événements. L'objectif de ce projet labellisé est d'étendre le formalisme de scicos aux systèmes régis par des équations algèbro-différentielles. Le travail effectué cette année a été pour l'essentiel l'analyse des problèmes vsous-jacents et le montage de ce projet. Le langage de description des systèmes algèbro-différentiels Modelica pourrait servir de base à ce projet.

Actuellement Rachid travaille sur le projet Simpa en tant qu'ingénieur-expert depuis le 01 septembre 2001. Ce projet, sous l'égide du Réseaux National des Technologies Logicielles, vise à produire un environnement permettant de modéliser et co-simuler un processus physique et son système de régulation-contrôle, grâce à une extension de Scilab/Scicos. Pour cela, on devra pouvoir définir dans *Scicos* des modèles hybrides (discrets et continus) implicites et obtenir une simulation conjointe, grâce à un nouveau composant et à une évolution du compilateur et du simulateur de *Scicos*. Par la suite, il s'agira d'étendre notre contribution d'analyse et de génération de code pour tenir compte des aspects hybrides implicites.

7.5 Projet PREDIT : Tarification transport

Participant : E. Mancinelli, L. Wynter.

Le but de ce contrat est de résoudre les problèmes de tarification des systèmes de transport. En particulier de déterminer les tarifs d'un réseau de ligne de bus. Le problème est posé comme un problème biniveau. Une mise en œuvre de l'algorithme indiqué dans la section 6.4.5. est en cours.

8 Actions régionales, nationales et internationales

8.1 Actions nationales

- Stéphane Gaubert co-anime, avec Jean-Jacques Loiseau, le groupe de travail Algèbres Tropicales (GdR-PRC Automatique et ALP).
- Le groupe Scilab a participé à l'élaboration d'un projet de consortium autour du logiciel libre Scilab.

8.2 Actions européennes

8.2.1 Alapedes

Participants : G. Cohen, M. Akian, S. Gaubert, J.P. Quadrat.

Metalau participe au projet Européen TMR Alapedes sur les méthodes algébriques pour l'évaluation des systèmes à événements discrets, projet sur 5 ans d'octobre 97 à octobre 2001.

La dernière réunion Alapedes a eu lieu à Prague, les 25 et 26 août.

8.2.2 Niconet

Participants : F. Delebecque, S. Steer.

Le travail de développement de la bibliothèque Slicot s'est poursuivi cette année. Le projet a en particulier travaillé sur les algorithmes de calcul de μ , suite au séjour des professeurs P. Petkov et M. Konstantinov, accueillis dans le cadre de Niconet. De très nombreux modules de la bibliothèque Slicot ont été interfacés avec Scilab et une contribution Slicot est disponible sur le site ftp de Scilab. Cette contribution repose en partie sur une librairie de fonctions qui émulent les API Matlab. D'autres fonctions Slicot de base ont été incorporées au noyau Scilab. Ces fonctions, qui utilisent intensivement les modules de la bibliothèque Lapack, sont soit des mises à jour d'anciennes fonctionnalités, soit de nouvelles fonctionnalités telles que l'identification.

8.3 Actions internationales

8.3.1 Convention NSF-INRIA

Participants : M. Akian, P-A. Bliman (projet Sosso).

Cette convention (octobre 2000–octobre 2002) finance une collaboration avec Roger Nussbaum de Rutgers University, sur les oscillations de systèmes à retards.

8.4 Accueils de chercheurs étrangers

- Steve Campbell, Université de Caroline du Nord (1 semaine).
- Kimberly Drake, Université de Caroline du Nord (2 semaines).
- Ivan Singer, Institut de Mathématiques, Académie des Sciences, Bucarest (1 semaine).
- Hong Ping : thésarde du Liama (avec Ph. de Reffye) venue pour 1 mois pour débiter une boîte à outils sur la croissance des plantes.
- Fang Yu : thésarde chinoise (de l'université de JangSu) 3 mois pour son travail sur le co-design à partir de Scicos. Elle bénéficie du support de l'ambassade de France à Pékin
- Ababcar Ndao et Mohamed Gaye - professeur sénégalais, Université Cheikh Anta DIOP : 1 mois formation à Scilab.
- Petko Petkov : professeur invité, Université de Sofia pendant 4 mois.
- Philippe de Reffye, Liama à Pékin.
- Ravindra Bapat, Indian Statistical Institute (2 semaines).

9 Diffusion de résultats

9.1 Animation de la communauté scientifique

- M. Akian. Co-responsable du séminaire Fractales-Hipercom-Metalau-Meval.
- F. Delebecque. membre de la Société Internationale Niconet.
- S. Gaubert. Co-chairman et éditeur des actes du « Workshop on Max-Plus Algebras », Prague, 27–29 Août 2001, un événement satellite de l'IFAC SSSC'01.
- M. Goursat.
 - Workshop à Bhubaneswar. Ce workshop a été organisé par Gérard Huet (projet Cristal), S.C. Phatak (IOP Bhubaneswar) et Maurice Goursat. Il s'est tenu du 4 au 9 décembre 2000 à l'Institute of Physics, Bhubaneswar. Ce workshop avait le soutien financier complet du Cefipra.
 - Les encadrants et conférenciers français étaient J.P. Chancelier F. Delebecque C. Gomez M. Goursat R. Nikoukhah S.Steer. Il y avait environ 25 participants indiens (doctorants, post-doctorants et professeurs).
 - Workshop à Pékin
 - Ce workshop était similaire à celui de Bhubanewar ; il a été organisé par Baogang HU (Liama), Philippe de Reffye (Liama), Stéphane Grumbach (Inria relations internationales) et Maurice Goursat. Il s'est tenu dans la banlieue de Pékin du 9 au 11 avril. Ce workshop avait le soutien du Programme National Chinois 863 (support aux logiciels libres).
 - La première partie du workshop était consacrée à l'utilisation avancée de Scilab ; la seconde partie était constituée d'exposés sur des applications de Scilab (ou équivalent) par des orateurs chinois et français. Les orateurs français étaient J.P. Chancelier , F. Delebecque, C. Gomez, M. Goursat, J.P. Quadrat, et S. Steer.
- R. Nikoukhah. Membre de « International Program Committee » pour « Meditteranean Control and Automation Conference » qui aura lieu a Lisbon en 2002.
- E. Rofman
 - Responsable scientifique, avec J.L. Menaldi et A. Sulem de la Conférence « Optimal Control and Partial Differential Equations », tenue le 4 décembre 2000 à Paris, en l'honneur du professeur A. Bensoussan, à l'occasion de son 60ème anniversaire.
 - Membre du Conseil Scientifique de l'Inst. de Math. « Beppo Levi » de l'Université Nationale de Rosario.

9.2 Enseignement universitaire

- M. Akian
 - Petites Classes du cours de Mathématiques 1 (calcul différentiel) et 2 (intégration) en première année à l'École des Mines de Paris.
- F. Delebecque
 - Enseignement d'approfondissement, École Polytechnique.
 - Cours au DESS Imafa (Informatique et Mathématiques appliquées à la Finance et à l'Assurance) de l'ESSI (Sophia Antipolis).
 - Petites classes à l'ENPC (Scilab) et à l'ENSTA (Automatique).

- R. Djenidi
 - Cours d'*outil logiciel pour mathématiciens* basé sur Scilab, en deuxième année de DEUG MIAS à l'université Paris 8.
- S. Gaubert
 - Cours (Optimisation Combinatoire) en troisième année à l'Ensta.
 - Cours (Systèmes à Evénements Discrets) au DEA Automatique et Traitement du Signal, commun à l'Option Automatique de l'ENSMP.
 - Demi-Cours dans la filière réseaux du DEA Algo (Algèbre max-plus et systèmes dynamiques monotones homogènes).
- C. Gomez
 - Cours de systèmes dynamiques dans l'option Mathématiques Appliquées de troisième année de l'École Centrale de Paris
 - Cours de calcul formel au Pôle Universitaire Léonard de Vinci dans la formation de post-gradués de calcul scientifique.
 - Présentation de Scilab à la formation « contrôle avancé » organisée par les sections TS CIRA, le 31 août 2001 à Besançon.
- C. Klimann
 - Exercices dirigés (1ère année) de Mathématiques pour l'Informatique (A1), Conservatoire National des Arts et Métiers.
- R. Nikoukhah
 - Ensta : Automatique 2e année, Programmation dynamique 3e année.
 - Pulv : Automatique 5e année, Processus et commande stochastique 4e année.
 - ENPC : Cours Scilab.
- J.P. Quadrat
 - Cours d'introduction à la commande stochastique. 22 h, DEA MMME Paris I.
- S. Steer
 - Cours « Introduction aux outils de calcul numérique », DEA « Optimisation, jeux et modélisation en économie », Universités Paris VI, Paris X et Ecole Polytechnique.

9.3 Autres enseignements

- F. Delebecque, C. Gomez, M. Goursat, R. Nikoukhah, S. Steer
 - Formation Scilab Saphir-Control

9.4 Encadrement de thèse

- R. Nikoukhah
 - Thèses de : R. Djenidi, A. Azzedine, M.J. Khosrowjerdi.
- J.P. Quadrat
 - Thèse de : Desilles

9.5 Membre de jury

- F. Delebecque
 - Membre du jury de l'agrégation externe de mathématiques.

- R. Djenidi
 - Juin 2001 : jury de projet de fin d'étude d'ingénieur de Vincent Foucart, à l'ENSTA (Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées, Paris). Ce jury était présidé par Stéphane Gaubert.
- S. Gaubert
 - Membre de jury de thèse de C. Lenté, Université de Tours, Nov. 2001.
 - Rapporteur sur la thèse de S. Lombardy, Télécom Paris, Dec. 2001.
- C. Gomez
 - Membre du jury de l'agrégation externe de mathématiques.
- R. Nikoukhah, S. Steer
 - Membre du jury de thèse de R. Djenidi, Université Paris 12, Juillet 2001.
- R. Nikoukhah
 - Membre de jury de thèse d'habilitation de A. Zolghadri, Université de Bordeaux I.
- J.P. Quadrat
 - Rapporteur des thèses de J.J. Loiseau, M. Alamir, F. Lamole et L. Magne.

9.6 Participation à des colloques, séminaires, invitations

- M. Akian
 - Séminaire Fractales-Hypercom-Metalau-Meval, 14 Juin. « Théorème spectral pour les fonctions monotones homogènes convexes ».
 - SIAM conference on control and its applications, San Diego, 11-14 Juillet 2001. « Structure of the Set of Solutions of a Discrete Ergodic Dynamic Programming Equation ».
 - Satellite Workshop on Max-Plus Algebras, IFAC SSSC'01, Prague, 29-31 Août 2001. Présentation de [42]
- D. Delebecque, S. Steer
 - Participation aux 7eme, 8eme et 9eme Niconet meetings (Louvain-la-Neuve, Leuven et Bremen University).
 - Présentation de la librairie Slicot-Scilab au Third Niconet workshop, Louvain la Neuve 19 Janvier 2001.
 - Participation au Workshop «Advanced Computer Tools for Computer Aided Control System Design» Bremen University, Dept of Math. 27-29 Septembre 2001 (Poster session Scilab).
- R. Djenidi
 - « A propos du formalisme Scicos », MOSIM'01, Troyes - France, Avril 2001.
- S. Gaubert
 - Présentation du groupe de travail Algèbres Tropicales aux journées du GdR Automatique, Autrans, Jan-Fev. 2001.
 - Invitation d'une semaine à BRIMS, HP-Labs, Bristol, Avril 2001.
 - The set of minimal realizations of max-plus linear systems is semipolyedral (travail commun avec V. Blondel et N. Portier), COMCON'8, Rehtymno, Creete, Jul. 2001.
 - Spectral theorem for convex monotone homogeneous maps and ergodic control (travail commun avec M. Akian), Workshop on max-plus algebras, Prague, Aug. 2001.
- M. Goursat :

- Hong Kong University
F. Delebecque et M. Goursat ont participé aux 2 journées HKU-Inria avec un exposé sur le logiciel libre (avec M. Mauny projet Cristal) et un double exposé sur Scilab.
- P. Lotito :
 - Algèbre Max-Plus et Modèles de Trafic, Colloquium Junior Inria, Rocquencourt, France, February 27 2001. (Travail commun E. Mancinelli, J-P. Quadrat).
 - Problèmes de modélisation de trafic, Séminaire Inria : Fractales - Hipercom - Meta2 - Meval March 15 2001. (Travail commun E. Mancinelli, J-P. Quadrat).
 - Vers une boîte à outils Scilab dédiée aux problèmes de transport , Séminaire Inrets «Modélisation du trafic» Avril 2001. (Travail commun avec E. Mancinelli, J.-P. Quadrat).
 - Issues in the implementation of the DSD algorithm, 33rd Workshop on High Performance Algorithms and Software for Nonlinear Optimization, Erice Italie juin 2001.
 - Implementation Issues for a Feedback Stabilization of a Beam, Siam Conference on Linear Algebra, Systems and Control, Boston, USA, August 13-15 2001. (Joint work with González R.L.V.)
 - A Max-Plus Model of Traffic in a Circular Road, Siam Conference on Linear Algebra, Systems and Control, Boston, USA, August 13-15 2001. (Travail commun E. Mancinelli, J-P. Quadrat).
 - A Survey of Algorithms for Traffic Modélisation, Alapedes Meeting August 2001. (Travail commun E. Mancinelli, J-P. Quadrat).
- E. Mancinelli :
 - Algèbres Max-Plus et modèles de trafic, Séminaire Inrets « Modélisation du trafic », Avril 2001. (Travail commun avec P. Lotito, J.-P. Quadrat).
- R. Nikoukhah
 - Auxiliary signal design for failure detection in uncertain systems, MEDO1 - Dubrovnik
 - Coratie - Juin.
- J.P. Quadrat
 - Duality of Idempotent semimodules , IFAC Workshop on MaxPlus Algebra Aout 2001. (Travail commun avec G. Cohen, S. Gaubert).
 - Maxplus Algebra in Scilab and Applications, Scilab Workshop, Liama Pekin, April 2001. (Travail commun avec G. Cohen, S. Gaubert).
- S. Steer - R. Nikoukhah
 - « Code generation in Scicos », ESM'2001, Prague - Csech Republic, June 2001.
- L. Wynter :
 - Developments and extensions of proportional fairness pricing of telecommunications and the Internet Versailles Workshop on Telecommunications Pricing, Université de Versailles, France, March, 2001.
 - A Convergent Algorithm for the Multimodal Traffic Equilibrium Problem, TRISTAN, Tri-Annual Conference of Transportation Science, Azores Islands, Portugal, June 2001, Also Presented at Optimization Days : The annual conference of the Canadian O.R. Society, Quebec, May, 2001.
 - Optimal Location of Intermodal Freight Hubs, Tristan, Tri-Annual Conference of Transportation Science, Azores Islands, Portugal, June 2001, also presented at Francoro, la conférence internationale de recherche opérationnelle de langue française, Quebec, Mai,

2001.

- Optimizing Proportionally Fair Prices, Informs, Miami Beach, November, 2001.
- Globally solving bilevel programs : a search for structure, Informs, Miami Beach, November, 2001. (joint work with G.Cohen, E. Mancinelli, and J.-P. Quadrat).

10 Bibliographie

Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [1] M. AKIAN, R. BAPAT, S. GAUBERT, « Asymptotics of the Perron Eigenvalue and Eigenvector Using Max-algebra », *C. R. Acad. Sci. Paris t. 327, Série I*, 1998, p. 927–932.
- [2] M. AKIAN, P.-A. BLIMAN, « On super-high-frequencies in discontinuous 1st-order delay-differential equations », *Journal of Differential Equations 162*, 2000, p. 326–358.
- [3] F. BACCELLI, G. COHEN, G.J. OLSDER, J.P. QUADRAT, *Synchronisation and Linearity*, Wiley, 1992.
- [4] C. BUNKS, J.P. CHANCELIER, F. DELEBECQUE, C. GOMEZ (ÉDITEUR), M. GOURSAT, R. NIKOUKHAH, S. STEER, *Engineering and scientific computing with Scilab*, Birkhauser, 1999.
- [5] G. COHEN, D. DUBOIS, J. QUADRAT, M. VIOT, « A linear system-theoretic view of discrete event processes and its use for performance evaluation in manufacturing », *IEEE Transactions on Automatic Control*, 30, 1985, p. 210–220.
- [6] B. DEVAUCHELLE-GACH, *Diagnostic mécanique des fatigues sur les structures soumises à des vibrations en ambiance de travail*, thèse de doctorat, Paris 9 Dauphine, Paris, 1991.
- [7] S. GAUBERT, J. MAIRESSE, « Modeling and analysis of timed Petri nets using heaps of pieces », *IEEE Trans. Automat. Control 44*, 4, 1999, p. 683–697.
- [8] S. GAUBERT, *Théorie linéaire des systèmes dans les dioïdes*, thèse de doctorat, Ecole des Mines, Paris, 1992.
- [9] S. GAUBERT, « Performance Evaluation of (max,+) Automata », *IEEE Trans. Automat. Control 40*, 12, Dec 1995.
- [10] J.P. QUADRAT, MAX-PLUS WORKING GROUP, « Min-Plus Linearity and Statistical Mechanics », *Markov Processes and Related Fields 3*, 4, 1997, p. 565–587.
- [11] B. LÉVY, A. BENVENISTE, R. NIKOUKHAH, « High level primitives for recursive maximum likelihood estimation », *IEEE Transactions on Automatic Control*, 8, 1996.
- [12] R. NIKOUKHAH, A.S. WILLSKY, B.C. LEVY, « Kalman filtering and Riccati equations for descriptor systems », *IEEE Transactions on Automatic Control 37*, 9, 1992, p. 1325–1342.
- [13] R. NIKOUKHAH, B. LEVY, A. WILLSKY, « Stability, stochastic stationarity and generalized Lyapunov equations for two-point boundary-value descriptor systems », *IEEE Transactions on Automatic Control 34*, 11, 1989, p. 1141–1152.
- [14] R. NIKOUKHAH, « Innovations generation in the presence of unknown inputs », *Automatica*, 30, 1994.
- [15] M. STERNAD, S. RÖNNBÄCK, « "A frequency domain approach to Anti-windup compensator design" », *rapport de recherche n° UPTEC 93024R*, "Uppsala University", April "1993".
- [16] D. VON WISSEL, R. NIKOUKHAH, S. CAMPBELL, F. DELEBECQUE, « The effect of computational delay in descriptor based trajectory tracking control », *Int. J. Control*, 67, 1997, p. 251–273.

Livres et monographies

- [17] G. COHEN, *Analysis y control de sistemas de eventos discretos de redes de Petri temporizadas al algebra*, 29, Cuadernos, Rosario, Argentina, 2001.
- [18] J.L. MENALDI, E. ROFMAN, A. SULEM, *Optimal control and partial differential equations*, IOS Press, Amsterdam, 2001, in honour of Professor A. Bensoussan's 60th birthday.
- [19] J.P. CHANCELIER, F. DELEBECQUE, C. GOMEZ, M. GOURSAT, R. NIKOUKHAH, S. STEER, *Introduction à Scilab*, Collection Iris, Springer Verlag, 2001.

Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [20] J. COCHET-TERRASSON, *Algorithmes d'itération sur les politiques pour les applications monotones contractantes*, Thèse, spécialité mathématiques et automatique, École des Mines, Dec. 2001.
- [21] R. DJENIDI, *Formalisme de modélisation des systèmes dynamiques hybrides*, thèse de doctorat, Université Paris 12, Juillet 2001.

Articles et chapitres de livre

- [22] M. AKIAN, S. BISMUTH, « Instability of rapidly-oscillating periodic solutions for discontinuous differential delay equations », *Differential and Integral Equations* 15, 1, 2002, p. 53–90.
- [23] M. AKIAN, P.-A. BLIMAN, M. SORINE, « Control of delay systems with relay », *IMA Journal on Mathematical Control and Information*, À paraître en 2002, version préliminaire dans le Rapport de Recherche 3422, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3422.html>.
- [24] M. AKIAN, S. GAUBERT, « Spectral Theorem for Convex Monotone Homogeneous Maps, and ergodic Control », *Nonlinear Analysis. Theory, Methods & Applications*, Accepté. Version préliminaire dans le rapport de recherche INRIA 4273 et dans arXiv : math.SP/0110108, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4273.html>.
- [25] M. AKIAN, A. SULEM, M. TAKSAR, « Dynamic optimisation of long term growth rate for a portfolio with transaction costs and logarithmic utility », *Mathematical Finance* 11, 2, 2001, p. 153–188.
- [26] M. BASSEVILLE, A. BENVENISTE, M. GOURSAT, L. HERMANS, L. M. AND H. VAN DER AUWERKER, « Output-only subspace-based structural identification : from theory to industrial testing practice », *ASME Jnl Dynamic Systems Measurement and Control, Special Issue on Identification of Mechanical Systems* 123, 4, décembre 2001.
- [27] N. BIEHN, S.L. CAMPBELL, R. NIKOUKHAH AND F. DELEBECQUE, « Numerically Constructible Observers for Linear Time Varying Descriptor Systems », *Automatica*, 2001, p. 445–452.
- [28] G. COHEN, J.P. QUADRAT, L. WYNTER, « On the halfplane and cone algorithms for bilevel programming by Clegg and Smith », *Transportation Research B*, à paraître.
- [29] R. DJENIDI, « L'éditeur graphique de Scicos », *Linux Magazine France*, Décembre 2001.
- [30] C. GOMEZ, M. GOURSAT, « Graphes et réseaux avec Scilab, la boîte à outils Metanet, Première partie », *Linux Magazine France*, 23, décembre 2000.
- [31] C. GOMEZ, M. GOURSAT, « Graphes et réseaux avec Scilab, la boîte à outils Metanet, Deuxième partie », *Linux Magazine France*, 26, mars 2001.
- [32] J-B HIRIART-URRUTY, J-P QUADRAT, J.B. LASSERE, « Pythagoras' Theorem for Areas », *The American Mathematical Monthly*, June-July 2001.

- [33] A. LICHNEWSKY (éditeur), *Modélisation mathématique : un autre regard*, Collection SCOPOS, Springer Verlag, 2002.
- [34] L. MEVEL, A. BENVENISTE, M. BASSEVILLE, M. GOURSAT, « Blind subspace-based eigenstructure identification under nonstationary excitation using moving sensors », *IEEE Trans. on Signal Processing SP-50*, 1, janvier 2002.
- [35] R. NIKOUKHAH, S. L. CAMPBELL, K. HORTON, F. DELEBECQUE, « Auxiliary signal design for robust multi-model identification », *IEEE Tran. Aut. Cont.*, à paraître.
- [36] R. NIKOUKHAH, « Scilab : l'environnement graphique (1/2) », *Linux Magazine France*, 20327, 2001.
- [37] R. NIKOUKHAH, « Scilab : l'environnement graphique (2/2) », *Linux Magazine France*, 20328, 2001.
- [38] R. ROFMAN, R. GONZALEZ, G. REYRERO, *Optimal Control Problems and Partial Differential Equations*, IOS Press, Amsterdam, 2001, ch. On coupled systems and decomposition techniques related to junctions problems. Study the symmetric case, p. 466–474.
- [39] S. L. CAMPBELL, K. HORTON, R. NIKOUKHAH, F. DELEBECQUE, « Optimization formulations of auxiliary signal desing for rapid multi-model identification », *Automatica*, accepted.
- [40] S. STEER, « Scilab : courbes et surfaces », *Linux Magazine France*, Juillet-Août 2001.
- [41] S. STEER, « Scilab : programmer les entrées sorties », *Linux Magazine France*, 2001.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [42] M. AKIAN, R. B. BAPAT, S. GAUBERT, « Generic Asymptotics of Eigenvalues using Min-Plus Algebra », in : *Proceedings of the Satellite Workshop on Max-Plus Algebras, IFAC SSSC'01*, Elsevier, Praha, 2001.
- [43] M. AKIAN, S. GAUBERT, « A Spectral Theorem for Convex Monotone Homogeneous Maps », in : *Proceedings of the Satellite Workshop on Max-Plus Algebras, IFAC SSSC'01*, Elsevier, Praha, 2001.
- [44] V. BLONDEL, S. GAUBERT, N. PORTIER, « The set of realizations of a max-plus linear sequence is semi-polyhedral », in : *CONCOM'8*, Rethymno, Creete, Jul. 2001.
- [45] G. COHEN, S. GAUBERT, J.P. QUADRAT, « Duality of Idempotent semimodules », in : *Proceedings of the IFAC Workshop on MaxPlus Algebra*, Wiley, August 2001.
- [46] R. DJENIDI, R. NIKOUKHAH, S. STEER, « Code generation in Scicos », in : *ESM'2001*, Prague - Csech Republic, June 2001.
- [47] R. DJENIDI, R. NIKOUKHAH, S. STEER, « A propos du formalisme Scicos », in : *MOSIM'01*, Troyes - France, Avril 2001.
- [48] C. GOMEZ, « Scilab, l'autre environnement pour le calcul scientifique », in : *congrès SMAI, Pompadour*, 27 mai–1 juin 2001.
- [49] M. GOURSAT, M. BASSEVILLE, A. BENVENISTE, L. MEVEL, « Output-only modal analysis of Ariane V launcher », in : *IMAC-XIX, International Modal Analysis Conference*, p. 5–8, Kissimmee, FL, février 2001.
- [50] L. MEVEL, M. BASSEVILLE, M. GOURSAT, A. BENVENISTE, « In-operation subspace-based covariance-driven structural identification - Application to the steelquake and Z24 bridge benchmarks », in : *International Conference on Structural System Identification*, p. 5–7, Kassel, FRG, septembre 2001.

- [51] L. MEVEL, A. BENVENISTE, M. BASSEVILLE, M. GOURSAT, « Polyreference subspace-based modal identification of a concrete three span bridge », *in : IMAC-XIX, International Modal Analysis Conference*, p. 5–8, Kissimmee, FL, février 2001.
- [52] L. MEVEL, M. GOURSAT, M. BASSEVILLE, A. BENVENISTE, « In-operation damage detection and localization - Application to the steelquake and Z24 bridge benchmarks », *in : International Conference on Structural System Identification*, p. 5–7, Kassel, FRG, septembre 2001.
- [53] R. NIKOUKHAH, S. L. CAMPBELL, F. DELEBECQUE, « Auxiliary signal design for failure detection in uncertain systems », *in : Proc. IEEE Med. Conf. Control and Automation*, 2001.
- [54] P.A. LOTITO, « Issues in the implementation of the DSD algorithm », *in : High Performance Algorithms and Software for Nonlinear Optimization*, International School of Mathematics “G. Stampacchia”, Erice, Sicile, Italy, June 30 - July 8 2001.
- [55] S. L. CAMPBELL, K. DRAKE, R. NIKOUKHAH, F. DELEBECQUE, « Rapid multimodel identification in systems with delays », *in : 3d IFAC Workshop on Time Delay Systems (TDS 2001)*, p. 296–301, Sante Fe - Mexico, 8-10 december 2001.

Rapports de recherche et publications internes

- [56] G. COHEN, S. GAUBERT, E. MANCINELLI, J.P. QUADRAT, E. ROFMAN, « On the traffic light control of regular towns », *Rapport de Recherche n°4276*, Inria-Rocquencourt, septembre 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4276.html>.
- [57] R. DJENIDI, R. NIKOUKHAH, Y. SOREL, S. STEER, « Interface Scicos-SynDEx », *Rapport de Recherche n°4250*, Inria-Rocquencourt, septembre 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4250.html>.
- [58] S. GAUBERT, J. GUNAWARDENA, « The Perron-Frobenius Theorem for Homogeneous, Monotone Functions », *Hewlett-Packard Technical Report n°2001-12*, HPL-BRIMS, 2001, Also arXiv :math.FA/0105091, submitted.
- [59] S. GAUBERT, D. HONG, « Series expansions of Lyapunov exponents and Forgetful Monoids », *Rapport de Recherche n°3971*, Inria, July 2000, Submitted to IJAC, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3971.html>.
- [60] F. JARRAY, L. WYNTER, « An Optimal Smart Market Auction for the Pricing of Telecommunications Services », *Rapport de Recherche n°4310*, Inria-Rocquencourt, 2001, submitted to INFOCOM, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4310.html>.
- [61] P.A. LOTITO, E.M. MANCINELLI, V. MALYSHEV, MAXPLUS, « Explicit computation of a max-plus Lyapounov exponent giving the average speed on a circular traffic line without overtaking », *Internal report*, July and September 2000, présenté au workshop Alapedes - Hambourg et au workshop on stochastic matrices - Bristol.
- [62] P.A. LOTITO, E. MANCINELLI, J.P. QUADRAT, « Obtention de la loi fondamentale du trafic routier dans le cadre de l'algèbre minplus », *Rapport de recherche*, Inria-Rocquencourt, 2001, à paraître.
- [63] L. WYNTER, « A Convergent Algorithm for the Multimodal Traffic Equilibrium Problem », *Rapport de Recherche n°4125*, Inria-Rocquencourt, 2001, Accepted for publication in Transportation Science, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4125.html>.
- [64] L. WYNTER, « Optimal Location of Intermodal Freight Hubs », *Rapport de Recherche n°4088*, Inria-Rocquencourt, 2001, Accepted for publication in Transportation Science, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4088.html>.
- [65] L. WYNTER, « Optimizing Proportionally Fair Prices », *Rapport de Recherche n°4311*, Inria-Rocquencourt, 2001, submitted to SIGCOMM, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4311.html>.

Divers

- [66] M. AKIAN, S. GAUBERT, V. KOLOKOLTSOV, « Invertibility of Max-plus linear functionals », En préparation.
- [67] J. COCHET-TERRASSON, S. GAUBERT, « Policy Iteration Algorithm for Shortest Path Problems », Submitted to Theoretical Informatics, October 2000.
- [68] G. COHEN, S. GAUBERT, J.P. QUADRAT, « L'algèbre dans tous ses états », article en préparation Pour la Science.