

*Projet Metalau**Méthodes, Algorithmes et Logiciels pour
L'automatique**Rocquencourt*

THÈME 4A



*R*apport
*d'**A*ctivité

2002

Table des matières

1. Composition de l'équipe	1
2. Présentation et objectifs généraux	2
3. Fondements scientifiques	2
3.1. Systèmes à événements discrets et algèbre max-plus	2
3.1.1. L'algèbre max-plus	2
3.1.2. Systèmes dynamiques max-plus linéaires et graphes d'événements	3
3.1.3. Systèmes dynamiques (min, +, ×) implicites, réseaux de Petri, programmation dynamique stochastique	4
3.1.4. Systèmes dynamiques monotones homogènes	5
3.1.5. Ressources partagées, empilements de tâches et automates max-plus	5
3.1.6. Vers une approche géométrique des systèmes dynamiques linéaires sur le semianneau (max, +)	7
3.1.7. Dualité entre l'optimisation et le calcul des probabilités	7
3.1.8. Pages WEB	8
3.2. Systèmes implicites	9
3.2.1. Le cas linéaire.	9
3.2.2. Le cas non linéaire.	10
3.3. Détection de pannes dans les systèmes dynamiques	11
4. Domaines d'application	11
4.1. Transport et Télécommunication	11
5. Logiciels	12
5.1. Scilab	12
5.1.1. Diffusion	12
5.1.2. Scilab et la recherche	12
5.1.3. Scilab et le projet	12
5.1.4. Scilab et l'enseignement	13
5.2. Systèmes dynamiques hybrides - Scicos	13
5.3. Metanet	13
6. Résultats nouveaux	13
6.1. Les plantes	13
6.1.1. Architecture et modélisation des plantes	13
6.1.2. La Plant Tool Box	14
6.1.3. Activités avec le Cirad	15
6.1.4. Activités avec le Liama	15
6.2. CAO en Automatique	15
6.2.1. Liens Scilab - Calcul formel	15
6.2.2. Scicos	15
6.2.3. Amélioration de Scilab	17
6.2.4. Statistiques dans Scilab	17
6.2.5. Evolution de Scilab	17
6.2.5.1. Le consortium Scilab	17
6.2.5.2. Scilab Research Core Team	18
6.3. Commande et détection	18
6.3.1. Commande de systèmes à retard avec sortie tout-ou-rien	18
6.3.2. Conception des signaux auxiliaires pour la détection active de pannes	18
6.3.3. Conception simultanée de contrôleur et de détecteur de pannes	18
6.3.4. Inéquations variationnelles couplées	19

6.4.	Systèmes à événements discrets, algèbre max-plus et programmation dynamique	19
6.4.1.	Espace propre d'applications max-plus linéaires	19
6.4.2.	Unicité des points fixes ou vecteurs propres d'applications contractantes au sens large	19
6.4.3.	Asymptotique de systèmes dynamiques monotones homogènes	20
6.4.4.	Analyse convexe dans l'algèbre max-plus	20
6.4.5.	Théorème de séparation de type min-plus dans les groupes réticulés conditionnellement complets	20
6.4.6.	Géométrie des métriques de Hilbert et de Thompson	20
6.4.7.	Trafic pire des cas dans les réseaux de télécommunications	20
6.4.8.	Transformée de Fenchel généralisée	21
6.4.9.	Perturbation de valeurs propres et vecteurs propres et algèbre max-plus	21
6.4.10.	Approche géométrique des systèmes max-plus linéaires	21
6.5.	Transports	22
6.5.1.	Géodésique dans des réseaux	22
6.5.2.	Loi fondamentale du trafic dans une ville à géométrie régulière	22
6.5.3.	Boîte à outils trafic de Scilab	22
6.5.4.	Equilibres multiclassés	23
6.5.5.	Tarifification optimale de moyens de transport	23
6.5.6.	Tarifification optimale dans des problèmes de télécommunication	24
6.5.7.	RAPL : route automatisée poids lourds	24
6.5.8.	Identification aveugle, suivi des modes et tests	24
7.	Contrats industriels	25
7.1.	Identification aveugle, suivi des modes et tests	25
7.2.	Projet RNTL SIMPA	25
7.3.	Projet PREDIT : Tarifification transport	26
8.	Actions régionales, nationales et internationales	26
8.1.	Actions nationales	26
8.2.	Actions européennes	26
8.2.1.	Niconet	26
8.3.	Actions internationales	26
8.3.1.	Convention NSF-INRIA	26
8.4.	Accueils de chercheurs étrangers	26
9.	Diffusion des résultats	26
9.1.	Animation de la communauté scientifique	26
9.2.	Enseignement universitaire	27
9.3.	Autres enseignements	28
9.4.	Encadrement de thèse	28
9.5.	Membre de jury	28
9.6.	Prix, distinctions	28
9.7.	Participation à des colloques, séminaires, invitations	28
10.	Bibliographie	30

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 [DR]

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]

Anne-Laure Michel [Pulv/Saphir-control]

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

Edmundo Rofman

Chercheur Cirad

Philippe de Reffye

Chercheurs invités

Mohamed Lamine Gaye [Université Cheikh Anta Diop - Dakar]

Ababcar Sadikhe Ndao [Université Cheikh Anta Diop - Dakar]

Steve Campbell [Université de Caroline du Nord]

Roger Nussbaum [Rutgers University]

Chercheurs post-doctorants

Pablo Lotito [co-tutelle avec Numopt]

Elina Mancinelli [co-tutelle avec Numopt]

Cormac Walsh [Ercim et Inria]

Xing Xao [Liama - Pékin]

Zhigang Zhan [Liama - Pékin]

Ingénieurs experts

Rachid Djenidi [depuis septembre 2001]

Matthieu Philippe [depuis septembre 2001]

Doctorants

Azzedine Azil [Université d'Orsay]

Gaël Desiles [Ecole des Mines]

Ricardo Katz [Université de Rosario (co-tutelle)]

Mohamad Javad Khosrowjerdi [Université de Teheran]

Stagiaires

Hong Ping Yan [Liama - Pékin]

Meng Zhen Kang

Lin Wu

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.

Un nouvel objectif important du projet est l'introduction d'une nouvelle thématique sur l'application des mathématiques appliquées dans le domaine de la biologie végétale : Les modèles numériques de plantes et leurs applications en image de synthèse et en sciences de l'environnement (agronomie et paysagisme).

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.

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'analogue 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.

3.1.1. 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
$\mathbb{R}_{\max, \min}$	$(\mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}, \max, \min)$	algèbre goulot, ou floue	n'est pas un semicorps.
\mathbb{B}	$(\{\text{false}, \text{true}\}, \text{or}, \text{and})$	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 $(\mathbb{R}^+, +, \times)$ $\lim_{h \rightarrow 0^+} \mathbb{R}_h = \mathbb{R}_0 = \mathbb{R}_{\max}$

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

3.1.2. 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 semianneau max-plus. On peut l'écrire en termes matriciels

$$x(k) = \oplus_{\nu \in F} A_\nu x(k - \nu),$$

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 [7][4][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.

¹Elles sont caractérisées par leurs accroissements ultimement périodiques.

3.1.3. Systèmes dynamiques $(\min, +, \times)$ implicites, réseaux de Petri, programmation dynamique stochastique

La modélisation de réseaux de Pétri 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) :

$$Z_p(t) = m_p + \sum_{q \in p^{\text{in}}} M_{pq} Z_q(t) , \quad (2)$$

$$Z_p(t - \tau_p) \geq \sum_{q' \in p^{\text{out}}} M_{q'p} Z_{q'}(t) . \quad (3)$$

Par exemple, pour le réseau de Petri de la Figure 2, $Z_{q_3}(t) + 2Z_{q_2}(t) \leq Z_{p_2}(t - \tau_{p_2})$ 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 .

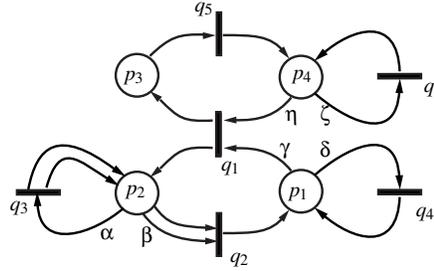


Figure 2. Un réseau de Petri temporisé

Dans un fonctionnement au plus tôt, au moins une inégalité de type 3 est saturée (i.e. au moins une place est indisponible) en amont de chaque transition. On a donc :

$$\forall q \in \mathcal{Q}, \min_{p \in q^{\text{in}}} \left\{ m_p + \sum_{q'' \in p^{\text{in}}} M_{pq''} Z_{q''}(t) - \sum_{q' \in p^{\text{out}}} Z_{q'}(t) M_{q'p} \right\} = 0 . \quad (4)$$

Ce problème posé dans [65] 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 :

$$Z_q(t) = \min_{p \in q} \text{in} \quad (5)$$

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 [58].

3.1.4. Systèmes dynamiques monotones homogènes

La modélisation de systèmes à événements discrets plus généraux peut se faire en remplaçant 1, 5 par des dynamiques $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ qui satisfont les trois axiomes :

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

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 [71] 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 [64].)

Pour fixer les idées, considérons le jeu à deux joueurs et somme nulle représenté sur la Figure 3. 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 cependant [63][61] pour des méthodes non-élémentaires coûteuses). Dans [57][62], 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).

3.1.5. 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

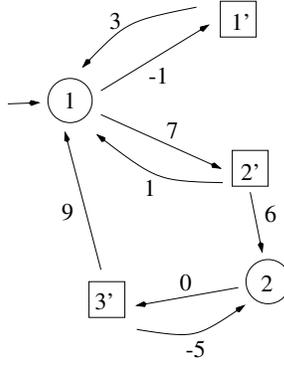
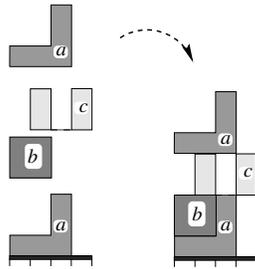


Figure 3. Un jeu déterministe répété à deux joueurs et somme nulle

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 $g : \mathcal{R} \rightarrow \mathbb{R}$. 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 tétris. Ce profil haut se calcule récursivement par la programmation dynamique.

$$\begin{aligned} x() &= g, \\ x(wa)_r &= \max_{s \in R(a)} [f(a)_r - d(a)_s + x(w)_s], \quad \forall r \in R(a), \\ x(wa)_r &= x(w)_r, \quad \forall r \notin R(a). \end{aligned} \quad (6)$$



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

Figure 4. 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 :

$$x(w) = gM(a_1) \dots M(a_k), \quad y(w) = x(w)e_{\mathcal{R}}, \quad (7)$$

où $e_{\mathbb{R}}$ 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 $\oplus_{w \in \mathcal{T}^*} y(w) w \in \mathbb{R}_{\max} \langle \langle \Sigma \rangle \rangle$ 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],[59], et appliqués dans [10] aux tas de pièces.

3.1.6. Vers une approche géométrique des systèmes dynamiques linéaires sur le semi-anneau $(\max, +)$

La solution du système

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

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

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

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 $Fu \leq v$, ou F est un opérateur linéaire. E.g., dans le deuxième cas, $Fu = \mathcal{C}_k u_k$, où $\mathcal{C}_k = [B, AB, \dots, A^k B]$ 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* [55], [4]). 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 $\mathcal{C}_k(\mathcal{C}_k \setminus \xi) = \xi$ est vraie.

La version la plus achevée de ces problèmes d'atteignabilité dans le cas classique a été donnée dans [73]. 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.

3.1.7. 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 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 [66][67][70][68][54]. On dispose maintenant d'une théorie très satisfaisante [53]. 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

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

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.

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 [52]. 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.

3.1.8. 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.

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

$$F(\dot{\xi}, \xi, z, t) = 0, \quad (8)$$

ou

$$F_k(\xi_{k+1}, \xi_k, z_k) = 0, \quad (9)$$

en temps discret. En fonction du domaine d'application, le modèle (8) 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 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.

3.2.1. Le cas linéaire.

Un système linéaire implicite

$$\mathcal{E}\dot{\xi} = \mathcal{F}\xi + \mathcal{G}z, \quad (10)$$

ou sa version discrète

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

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

$$\dot{x} = Ax + Bu. \quad (11)$$

Toutes les propriétés de commandabilité de ce système sont contenues dans le faisceau singulier $\{[I \ 0], [A \ B]\}$ qui correspond au système implicite (10) obtenu à partir de (11) 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 [14]. 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

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu + Mv, \\ y &= Cx + Du + Nv,\end{aligned}$$

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 10 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 10 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 [12], filtrage de Kalman [11][14], construction d'observateurs « tracking » [18], etc ...On a aussi étudié l'application de ces méthodes aux systèmes classiques par exemple pour la construction du filtre générateur de résidus [13] et les problèmes de découplage. On a aussi étudié la construction d'observateurs pour des systèmes linéaires non stationnaires [72]. Cette classe de systèmes a été beaucoup étudiée ces dernières années et une théorie générale se développe.

3.2.2. 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 [18].

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).

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'application

4.1. Transport et Télécommunication

Un domaine d'application privilégié se développe 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 : D. Abdemouche, 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 les systèmes de calcul formel, Maple, MuPad.

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 2002 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 (LMItol, 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 2002 ont été dans ce sens : préparation du lancement d'un consortium, organisation des workshops en Chine et au Cameroun, réunions avec de grands industriels français.

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 a été réalisé par l'Inria puis édité et diffusé par le CNDP.

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 abouti à un brevet : *Procédé de commande d'un moteur à combustion interne* [69]. 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.

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 est en cours d'extension pour permettre la modélisation et la simulation des systèmes dynamiques implicites, le lien entre Scicos et SynDEx sera développé dans le cadre d'un autre contrat RNTL « ECLIPSE ».

5.3. Metanet

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

Un nouveau programme de visualisation de graphes, edit-graph, écrit en Scilab a été réalisé. Aussi il fonctionne sur toutes les plates-formes (Unix, Windows), est facilement extensible et a des fonctionnalités supplémentaires comme le couper-coller de régions entre plusieurs fenêtres.

6. Résultats nouveaux

6.1. Les plantes

6.1.1. Architecture et modélisation des plantes

Participant : Ph. de Reffye.

Les modèles numériques de plantes développés au Cirad, sont apparentés à ceux de l'automatique. La croissance d'une plante dépend étroitement de son programme génétique pour la production d'organes. Chaque étape dépend de la précédente et une récurrence s'établit de proche en proche. Les bourgeons sont des automates stochastiques qui croissent, meurent et ramifient selon des lois de probabilités. Ces lois peuvent se déduire de l'architecture de la plante par son ajustement avec le modèle, par des méthodes heuristiques.

Parallèlement à chaque étape de croissance, la plante fabrique de la matière végétale par les feuilles et l'affecte à l'expansion de ses organes. La taille des feuilles conditionne la fabrication de la biomasse de l'étape courante, mais elle dépend de la biomasse fabriquée aux cycles précédents et de sa répartition dans les différents organes. On comprend qu'une rétroaction se produit entre la croissance et l'architecture, car l'offre sur la demande change continuellement. Cela conditionne le volume des différents organes selon leurs dates d'apparition sur la plante.

La difficulté de la mesure des paramètres du modèle provient de ce que la plus part des variables d'états sont cachées. Il faut donc optimiser les paramètres du modèle en ajustant les architectures observées et calculées d'une façon optimale. Les méthodes employées selon les cas concernent l'assimilation des données ou des méthodes purement informatiques (algorithmes génétiques).

Un aspect contrôle est développé afin d'optimiser la production dans un environnement donné. Il est ainsi théoriquement possible mathématiquement d'optimiser une ressource limitée (eau) ou bien de limiter les amendements (engrais) qui polluent l'environnement en les appliquant mieux. Ces modèles anticipent sur l'agriculture de demain.

6.1.2. La Plant Tool Box

Participant : Ph. de Reffye.

Le modèle GreenLab développé au Liama, doit être porté en Scilab, à moyen terme. L'objectif est de fournir une plate-forme ouverte « La Plant Tool Box » qui permette d'utiliser la méthode en agronomie (génétique, écophysiologie, optimisation des itinéraires culturaux).

Plusieurs modules seront fournis, permettant, le calcul des paramètres d'une plante, le contrôle et la visualisation 3D de la maquette simulée. Ce logiciel évoluera en fonction des perfectionnements attendus à la fois sur le modèle et sur les possibilités de Scilab dans ce nouveau domaine. Une beta version existe déjà.

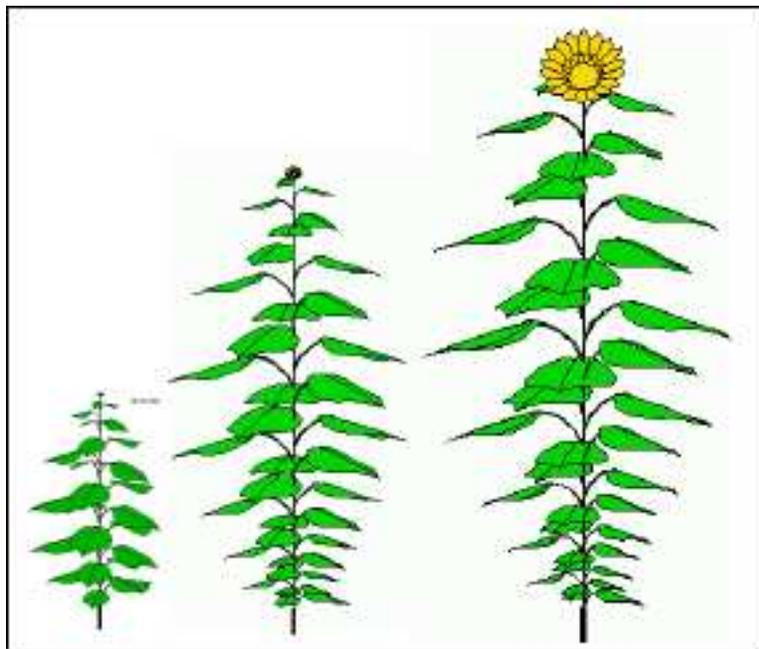


Figure 5. Simulation de la croissance et la production du tournesol selon le modèle mathématique GreenLab, simulé en Scilab

6.1.3. Activités avec le Cirad

Participant : Ph. de Reffye.

Ma présence au Cirad prévue pour une journée par semaine a été effective. Il s'agit d'une part de restituer à mon équipe AMAP, les travaux chinois et d'autre part d'introduire sous un angle mathématique des notions d'écophysiologie dans le modèle. La restitution du modèle est aussi prise en charge par Jean François Barczy actuellement au Liama et qui propose un modèle GreenLab opérationnel intégré dans le logiciel AMAPsim. Une première application pourrait se faire sur eucalyptus. Un travail important a été effectué avec Michael Ding Kuhn spécialiste en écophysiologie et les agronomes chinois Zhang Bao Gui et Guo Yan de la CAU qui sont en stage de longue durée au Cirad. Les résultats de ces travaux seront intégrés à terme à la Plant Tool Box, la rendant ainsi attractive pour les applications agronomiques.

6.1.4. Activités avec le Liama

Participants : Ph. de Reffye, Y. Hong Ping, J.F. Barczy.

Yan Hong Ping a soutenu sa thèse sur la première version de GreenLab qui utilise la décomposition des arbres en sous-structures similaires. Cette méthode permet d'accélérer le calcul de la plante en court-circuitant tous les inconvénients des méthodes de simulations parallèles à événements discrets. Le gain peut dépasser un facteur 1000, pour un résultat identique. On calcule l'architecture et la production végétale (organes et biomasse)

J'ai travaillé avec Jean François Barczy qui introduit le modèle GreenLab dans AMAPsim, ce qui permet d'accélérer considérablement les temps de calcul.

Par ailleurs un soutien actif de ma part est apporté à mes collègues de l'université d'agriculture de Chine (CAU), dont j'ai été nommé professeur invité. Ils testent avec succès le modèle GreenLab sur les plantes cultivées (blé, maïs, tournesol).

6.2. CAO en Automatique

6.2.1. Liens Scilab - Calcul formel

Participant : C. Gomez.

La liaison entre Scilab et le système de calcul formel MuPAD est aujourd'hui disponible dans la version 2.5 de MuPAD qui est sortie 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.

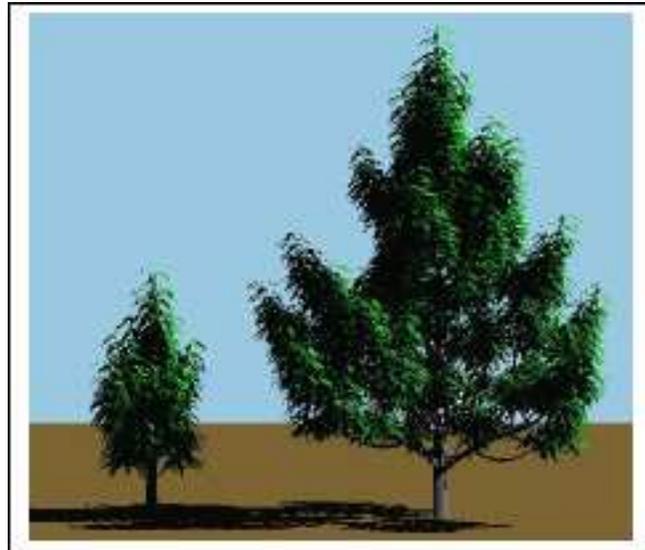
6.2.2. Scicos

Participants : S. Steer, R. Nikoukhah, R. Djenidi, A. Azil, M. Najafi.

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 composants électriques (self, résistance, capacités), hydraulique (injecteur, tuyau, valve), et donnerait des schémas plus lisibles dans ces domaines d'application. Ce développement s'effectue dans le cadre d'un contrat RNTL (Simpa) en collaboration avec des chercheurs de l'IFP, d'EDF et d'ingénieurs de TNI et Cril Technologies.

La contribution du projet Metalau à Scicos en 2002 a été

- de permettre à Scicos de prendre en compte des blocs décrits par des équations algèbro-différentielles mais communiquant par des entrées sorties de type « flot de donnée ». Cela a en particulier nécessité d'introduire le solveur d'équations algèbro-différentielles DASKR (M. Najafi) dans le simulateur.



Plant age (years)	Substructure- based $O(t*n^6)$	Internode by internode $O((t*n)^4)$
5	0.1	3.3
10	0.3	437.2
15	0.7	4743.0

Figure 6. Simulation de la croissance et la production du merisier selon le modèle mathématique GreenLab, simulé en Scilab

- de modifier l'éditeur graphique de Scicos pour permettre l'édition de systèmes implicites. Un nouveau type de bloc, dont les connections ne representent plus un flot de donnée mais des équations, a été introduit. La dynamique de ces blocs « implicites » est décrite en langage Modelica.
- de reprendre les structures de données internes de Scicos pour en améliorer l'adaptabilité. La compatibilité avec les anciens schémas est assurée par un traducteur automatique.
- de développer une batterie de tests unitaires et globaux concernant l'éditeur, le compilateur et le simulateur. (R. Djenidi)
- la réécriture du compilateur de Scicos en C (A. Azil) pour une meilleure efficacité.
- l'introduction d'un générateur de code de simulation associé à un « super bloc » discret de Scicos. Ce générateur peut soit générer une fonction de simulation pour Scicos soit un code autonome pouvant être implanté dans une architecture matériel.

6.2.3. Amélioration de Scilab

Participants : F. Delebecque, S. Steer, D. Abdemouche, C. Klimann.

L'essentiel des travaux ont portés sur la poursuite du développement du nouveau graphique de Scilab basé sur des entités hiérarchisées. Ce nouveau mode de gestion des graphiques, autorise la modification a posteriori des propriétés des objets affichés.

Il s'est agit cette année de gérer la coexistence de l'ancien et du nouveau graphique ainsi que la compatibilité ascendante. Ce nouveau graphique sera disponible dans la version 2.7 de Scilab qui devrait être mise sur le réseau début février 2003.

Par ailleurs, la boîte à outil en analyse statistique « Labostat » précédemment distribuée comme contribution a été complétée et incluse dans la future distribution de Scilab. Une sélection d'algorithmes de la bibliothèque d'automatique Slicot a été interfacée avec Scilab.

6.2.4. Statistiques dans Scilab

Participants : C. Klimann, Y. Lechevallier.

Labostat, la boîte à outils statistique a été intégrée à Scilab. . Les routines de traitement des tableaux statistiques sont en cours de développement.

6.2.5. Evolution de Scilab

6.2.5.1. Le consortium Scilab

Pour promouvoir Scilab, l'INRIA a décidé de créer un consortium pour que Scilab devienne un logiciel de calcul scientifique :

- qui soit une référence mondiale pour les industriels et les académiques ;
- qui soit un lien privilégié entre les industriels et les innovations scientifiques ;
- qui repose sur une grande communauté de contributeurs.

Le consortium doit réunir à la fois des académiques et des industriels du monde entier pour :

- assurer la pérenité de Scilab ;
- donner une forte visibilité ;
- donner les moyens pour atteindre les objectifs ;
- jouer le rôle d'architecte de Scilab ;
- animer et fédérer la communauté des contributeurs.

Les industriels et les académiques pourront adhérer en tant que membre au consortium et acquitteront une participation en fonction de leur taille. Les contributeurs, acceptés par le consortium, pourront adhérer gratuitement.

Le consortium aura une équipe de spécialistes, appelée l'équipe opérationnelle qui est en train de se mettre en place en fin d'année 2002 et sera opérationnelle début 2003. Elle prend la forme du projet de développement SCILAB de l'Unité de Recherche de Rocquencourt. Cette équipe s'occupera du développement de Scilab, de la hot line de premier niveau, de l'assurance qualité, de l'animation scientifique, de la valorisation et de la promotion de Scilab.

Le consortium devrait voir le jour début 2003.

6.2.5.2. *Scilab Research Core Team*

Le projet METALAU va mettre en place le *Scilab Research Core Team*, groupe de spécialistes et de chercheurs qui connaissent bien Scilab et ses algorithmes (automatique, traitement du signal, simulation...). Au début il sera composé des personnes qui ont développé Scilab, ensuite ses membres seront choisis par cooptation. Son rôle sera le suivant :

- répondre aux emails et posts forwardés par le Consortium pour des cas difficiles ;
- consulting sur l'utilisation poussée de Scilab, via le Consortium ou directement ;
- évolution future de Scilab au niveau recherche.

6.3. Commande et détection

6.3.1. *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 du type $\dot{x} = -\text{sgn}(x(t-1)) + f(x, x(t-1), x(t-2), \dots)$ où la fonction f est bornée strictement par 1, dans la suite des travaux [20][3][19].

6.3.2. *Conception des signaux auxiliaires pour la détection active de pannes*

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

On a étendu les méthodes de conception des signaux auxiliaires pour la détection active de pannes développées les années précédentes. On a en particulier considéré la situation où le critère de nuisance du signal peut être autre chose que son énergie. On a trouvé une solution constructive et efficace pour la conception des signaux auxiliaires dans ce cas.

On a aussi étudié la situation où un système continu est contrôlé par un système discret. Dans ce cas, on a montré que la conception des signaux auxiliaires se ramène à la résolution d'un système descripteur linéaire à deux bouts. Des algorithmes efficaces ont été développés.

Les résultats obtenus concernant le problème de la conception des signaux auxiliaires pour la détection active de pannes feront l'objet d'un livre qui est en cours de rédaction. Il est envisagé aussi de développer une boîte à outils Scilab/Scicos.

6.3.3. *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. 7) dans le cadre de la thèse de J. Khosrowdjerdj. On a développé une méthode dans laquelle on peut définir les critères de performance du contrôleur par la norme H_∞ d'une fonction de transfert d'un système augmenté et les critères de performance du détecteur par la norme H_2 . Ces choix sont très naturels dans la mesure où pour le control on cherche la robustesse et pour la détection, la performance. La solution de ce problème passe par un problème d'optimisation de type mixe H_2/H_∞ . On a trouvé une première solution utilisant des équations de Riccati couplées. Puis une solution basée sur les méthodes LMI est proposée.

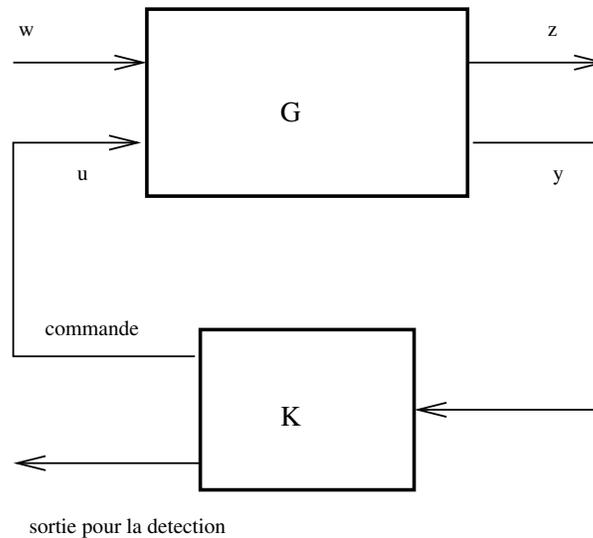


Figure 7.

6.3.4. 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 été étudié avec R. Verdes et F. Reyer. Dans l'étude du cas non symétrique et plus généralement pour le cas non linéaire des résultats ont été obtenus avec la collaboration de R. Verdes.

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

6.4.1. Espace propre d'applications max-plus linéaires

Participants : M. Akian, S. Gaubert, C. Walsh, R. Nussbaum (Rutgers University, USA).

On s'intéresse aux opérateurs max-plus linéaires à noyau, i.e. aux applications de la forme $A : u \in D(A) \subset \mathbb{R}_{\max}^S \mapsto Au \in \mathbb{R}_{\max}^S$ où S est un ensemble, $D(A)$ est le domaine de A et $Au(x) = \sup_{y \in S} a(x, y) + u(y)$ pour tout $x \in S$. Dans le cas où S est fini, le théorème spectral max-plus classique caractérise l'espace propre au moyen du graphe critique : la dimension est égale au nombre de classes critiques (qui sont par définition les composantes connexes du graphe critique).

D'une part, dans [43], nous avons étudié le cas où S est dénombrable. Les outils que nous introduisons s'inspirent de la théorie des chaînes de Markov dénombrables : les classes critiques sont remplacées par les classes de récurrence et la notion de frontière de Martin permet de caractériser complètement l'espace propre associé à une valeur propre donnée.

D'autre part, dans un travail commun entre M. Akian, S. Gaubert et R. Nussbaum, on s'intéresse au cas où S est compact et où le noyau $a : S \times S \rightarrow \mathbb{R}_{\max}$ est semi-continu supérieurement.

6.4.2. Unicité des points fixes ou vecteurs propres d'applications contractantes au sens large

Participants : M. Akian, S. Gaubert, R. Nussbaum (Rutgers University, USA).

Dans [42], nous étudions l'unicité du vecteur propre ou du point fixe d'applications f monotones homogènes ou plus généralement contractantes au sens large sur un cône, dans le cas où f est semidifférentiable. Les

résultats obtenus généralisent des résultats antérieurs de R. Nussbaum concernant le cas différentiable ainsi qu'un cas particulier des résultats de [21] concernant les applications f monotones additivement homogènes convexes sur \mathbb{R}^n .

6.4.3. Asymptotique de systèmes dynamiques monotones homogènes

Participants : S. Gaubert, J. Gunawardena (Harvard University, USA).

On poursuit le travail commun avec Jeremy Gunawardena, sur l'asymptotique des itérées de fonctions monotones additivement homogènes ou fonctions topicales (voir [60]) ainsi que le travail algorithmique sur les méthodes d'itération sur les politiques pour les jeux à deux joueurs avec critère ergodique, qui a fait l'objet de [57] et de la thèse de Jean Cochet-Terrasson [56].

6.4.4. Analyse convexe dans l'algèbre maxplus

Participants : G. Cohen, S. Gaubert, J.P. Quadrat, I. Singer (Institute of Mathematics, Bucharest).

Le travail réalisé les années précédentes sur le théorème de séparation d'un convexe maxplus et d'un point a été poursuivi cette année en étudiant les cas où les coefficients permettant la séparation restent finis. Dans le théorème obtenu l'année précédente les formes linéaires pouvaient avoir des coefficients infinis (que l'on sait gérer dans l'algèbre maxplus). Les discussions avec I. Singer sur ce sujet ont fait apparaître l'importance de cette distinction lorsqu'on veut montrer que les fonctions convexes maxplus sont des enveloppes supérieures de formes linéaires maxplus. Une publication est en préparation sur ce sujet.

Les résultats obtenus les années précédentes ont été présentés au colloque « ILAS » [40].

6.4.5. Théorème de séparation de type min-plus dans les groupes réticulés conditionnellement complets

Participants : M. Akian, I. Singer (Institute of Mathematics, Bucharest).

Les ensembles G décroissants de \mathbb{R}^n , i.e. vérifiant $y \in G$ et $x_i \leq y_i \forall i = 1, \dots, n \implies x \in G$, sont un cas particulier d'ensembles min-plus convexes de \mathbb{R}^n . Ce sont aussi les ensembles de sous-niveau $\{x \in \mathbb{R}^n \mid f(x) \leq a\}$ des fonctions croissantes au sens large. Un résultat de Martínez-Legaz, Rubinov et Singer caractérise les ensembles décroissants fermés de \mathbb{R}^n en termes de séparation par des formes min-plus linéaires. De même, un résultat récent de Singer caractérise les fonctions croissantes semi-continues inférieurement en termes de conjugaisons de type Lau ou de quasi-convexité. Dans [44], on généralise ces résultats dans le cas où \mathbb{R} est remplacé par un groupe réticulé conditionnellement complet ou de manière équivalente, dans le cas où le semi-corps min-plus est remplacé par un semi-corps conditionnellement complet. La topologie utilisée est celle de Scott ou celle de Lawson introduites dans la théorie des treillis continus, ou encore la topologie de l'ordre.

6.4.6. Géométrie des métriques de Hilbert et de Thompson

Participants : C. Walsh, J. Gunawardena (Harvard University, USA), R. Nussbaum (Rutgers University, USA).

Les applications max-plus linéaires, et, plus généralement, les applications monotones homogènes sur un cône sont contractantes au sens large pour deux métriques particulières, celle de Hilbert et celle de Thompson. Le comportement des applications monotones homogènes est donc profondément influencé par les propriétés géométriques de ces deux métriques, justifiant ainsi une étude approfondie de celles-ci. Dans [27], on s'est intéressé à une classe de cônes fortement « symétriques », auxquels on peut appliquer des techniques algébriques. On a établi de nouvelles propriétés des métriques de Hilbert et de Thompson, et déduit le comportement en temps long des itérées d'applications contractantes au sens large.

Dans [49], on s'intéresse à des cônes plus généraux. On a montré une inégalité, qui peut être interprétée de la façon suivante : regardés à grosse échelle, les espaces métriques considérés plus haut sont (en un certain sens) de courbure négative.

6.4.7. Trafic pire des cas dans les réseaux de télécommunications

Participant : C. Walsh.

Le problème suivant de réseaux de télécommunications conduit à un problème max-plus linéaire de dimension infinie intéressant. On considère un utilisateur dont le processus de demandes satisfait certaines contraintes et on voudrait connaître le pire des processus de demandes, c'est-à-dire celui qui maximise la charge pour le réseau. On mesure ici la charge par la « largeur de bande effective » de l'utilisateur, un concept qui se révèle utile quand on fait tendre le nombre de sources multiplexées vers l'infini. On a montré précédemment que ce problème était équivalent au calcul de la valeur propre max-plus d'un processus de décision Markovien déterministe en temps continu et d'espace d'état de dimension infinie [50]. Ce problème est partiellement résolu dans [31]. On a maintenant résolu le problème complètement, ce qui donnera lieu à une nouvelle publication.

6.4.8. Transformée de Fenchel généralisée

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

Dans ce travail, nous étudions l'image des opérateurs max-plus linéaires de dimension infinie et plus généralement (après changement de signe) les correspondances de Galois. On a d'abord montré un théorème de représentation pour les correspondances de Galois entre treillis de fonctions. Par exemple, toute correspondance de Galois B opérant sur l'espace des fonctions semi-continues inférieurement de Y dans \mathbb{R} , et à valeurs dans l'espace des fonctions de X dans \mathbb{R} , s'écrit $Bf(x) = \sup\{b(x, y, f(y)), y \in Y\}$ pour une fonction b telle que $b(x, y, \cdot)$ est décroissante et continue à droite (pour tous $x \in X$ et $y \in Y$). Si X est le dual de Y et $b(x, y, \lambda) = \langle x, y \rangle - \lambda$, B est exactement la transformée de Fenchel. Nous caractérisons l'image d'une correspondance de Galois B 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. Nous étudions aussi l'application de ces résultats à la caractérisation de taux de grandes déviations. Les travaux annoncés dans [22], feront l'objet d'une publication détaillée.

6.4.9. Perturbation de valeurs propres et vecteurs propres et algèbre max-plus

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

A la suite de [1] et de [2], on étudie, les asymptotiques du premier ordre de toutes les valeurs propres et des vecteurs propres d'une matrice \mathcal{A}_ϵ , étant données celles de ses coefficients. 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 $A_{ij} \in \mathbb{R}$, on a construit, dans [1], une suite $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ à partir des 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 . On montre que, sous certaines conditions (sur A), les nombres $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ sont génériquement égaux aux ordres de grandeurs (exposants) des différentes valeurs propres de \mathcal{A}_ϵ . On obtient aussi, dans le cas général, des inégalités de majorisation faible entre $\alpha_1, \dots, \alpha_n$, les racines du polynôme caractéristique min-plus de A et les exposants des valeurs propres de \mathcal{A}_ϵ . Ces résultats fournissent une interprétation en terme de graphe des pentes du polygone de Newton du polynôme caractéristique de \mathcal{A}_ϵ . Ils expliquent aussi les ordres de grandeurs des valeurs propres obtenus par la théorie des perturbations de Lidskiĭ, Višik et Ljusternik, et permettent de résoudre certains des cas qui étaient singuliers dans cette théorie.

6.4.10. Approche géométrique des systèmes max-plus linéaires

Participants : S. Gaubert, R. Katz.

La thèse de R. Katz s'intéresse à des problèmes d'accessibilité et de commande de systèmes dynamiques max-plus linéaires, et vise à développer une « approche géométrique », c'est-à-dire une approche en terme d'espaces invariants, dans l'esprit de la théorie de Wonham. Une difficulté est que même les espaces les plus simples (comme les semimodules accessibles, ou les congruences observables), ne sont en général pas finiment engendrés. On a développé pour cela dans [41] une théorie des semi-modules 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 la forme $(\mathbb{Z} \cup \{-\infty\})^n, +$. On montre que les semi-modules accessibles, ou que les congruences observables, sont rationnels. L'on montre aussi que les semi-modules rationnels sont fermés

pour les opérations algébriques naturelles (union, intersection, image inverse, etc.). On a travaillé également à l'étude des espaces (A, B) -invariants max-plus, qui sont utiles pour résoudre certains problèmes de commande de systèmes à événements discrets. On a montré comment calculer le sous-espace (A, B) -invariant maximal contenu dans un semi-module engendré par un ensemble fini de vecteur à coordonnées finies. L'on cherche actuellement à généraliser ce genre de résultats. Enfin, on a étudié des analogues non-commutatifs des problèmes d'accessibilité : ainsi, on a montré récemment que l'appartenance à un semi-groupe de matrices max-plus finiment engendré est indécidable. L'ensemble de ces nouveaux résultats est en cours de rédaction.

6.5. Transports

6.5.1. Géodésique dans des réseaux

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

Le but de ce travail est d'obtenir les analogues des réseaux de Jackson dans l'algèbre max-plus. Une publication [26] est parue cette année sur les travaux antérieurs réalisés dans le cadre de la thèse de O. Fall.

6.5.2. Loi fondamentale du trafic dans une ville à géométrie régulière

Mots clés : *transport, trafic.*

Participants : P. Ndong, J.P. Quadrat.

Dans le cadre du travail de DEA de P. Ndong. Une étude dont le but est de déterminer la relation existante entre le flot moyen et la densité moyenne des véhicules d'une ville à géométrie régulière a été entreprise. Une ville régulière est une ville constituée de voies à sens uniques alternées espacées régulièrement. Cette loi fondamentale du trafic a été très étudiée théoriquement et expérimentalement dans le cas d'une voie. On essaie dans ce travail de généraliser cette notion au cas 2D.

Une modélisation de la ville basée sur les réseaux de Pétri a été écrite. Elle ne peut pas être max-plus linéaire à cause des carrefours qui font sortir de la classe des graphes d'événements. La modélisation fixant les lois de routages aux carrefours et conduisant à des problèmes de commande stochastique que l'on sait bien résoudre n'est pas satisfaisante. La modélisation où le premier arrivé au carrefour est le premier servi conduit à des équations non linéaires min-plus qui ne sont pas comprises pour l'instant. Des simulations peuvent néanmoins être faites. La loi fondamentale obtenue expérimentalement dans le cas de deux routes circulaires et d'un seul carrefour fait apparaître des résultats qualitatifs intéressants. Des expérimentations numériques supplémentaires seront faites dans les semaines à venir. Les résultats préliminaires ont été présentés brièvement au cours de l'école d'automne CNRS-INRETS-INRIA sur la « Modélisation du trafic automobile » à Paris Novembre 2002.

6.5.3. 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 flots 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 flots 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 flot sur chaque arc. L'équilibre sera atteint si tous les chemins utilisés pour aller d'un point à un autre ont le même 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 origines et destinations, 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 flots sur les arcs peuvent être calculés. Si les temps de parcours sur

les arcs dépendent des flots 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 l'écriture 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 il y a deux ans s'est poursuivi cette année dans le cadre d'un contrat de la DTT (Direction des Transports Terrestres). A la fin de l'année on disposera de deux boîtes à outils. L'une dédiée au cas uniclasse et unimode. La première version est actuellement distribuée sous la forme d'une contribution Scilab. L'autre sera dédiée aux affectations multimodes multiclassés. Elle est en phase d'achèvement. Des interfaces avec le système d'information géographique (SIG) MAPINFO sera disponible.

Les efforts de cette année ont porté sur l'amélioration des performances des algorithmes Frank et Wolfe et DSD. Des gains de 1 à 50 ont été obtenus. Des réseaux de type Chicago (500 noeuds, 2000 arcs, 250000 demandes) peuvent être résolus en quelques dizaines de secondes sur de vieux Pentium à 500Mhz. Plusieurs variantes d'algorithmes pour la résolution des équilibres stochastiques ont été implémentés et feront l'objet de publications l'an prochain. Une refonte des structures de données a été faite pour pouvoir implémenter les réseaux multiclassés et multimodes. Enfin les interfaces avec MAPINFO ont été écrites.

Ces travaux ont été présentés dans plusieurs colloques conférences ou séminaires.

- 9th Meeting of the EURO Working Group on Transportation Intermodality, Polytechnic University of Bari, Italie.
- Les Journées de l'Optimisation – Optimization Days 2002, Montreal.
- Quatrièmes journées nationales de ROADEF, Paris.
- Scilab Workshop, Shanghai.

Deux exposés ont été fait également sur ce sujet dans l'école d'automne CNRS-INRETS-INRIA sur la « Modélisation du trafic automobile » à Paris Novembre 2002.

6.5.4. *Equilibres multiclassés*

Participant : L. Wynter.

Les équilibres dans le cas multiclassés s'expriment en général sous forme d'inéquations variationnelles non monotones et assymétriques. On montre que certains problèmes possèdent une structure de coût permettant d'obtenir une monotonie hiérarchique plus faible conduisant néanmoins à des algorithmes convergents. Une publication a été faite sur ce sujet dans [48].

6.5.5. *Tarifcation 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 tarifcation l'utilité pour un usager est mesurée 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 flots sur les arcs. Le problème de tarifcation 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 faibles. 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, ont montré que les points stationnaires,

voire même des points fortement stationnaires (ou minima locaux) ne donnent pas de solutions intéressantes. Nous avons donc développé, l'an dernier, une méthode heuristique globale, basée sur une décomposition cyclique, qui donne des solutions remarquables.

Cette année nous avons développé une application consistant à déterminer les prix d'une nouvelle ligne de bus basée sur cette approche, dans le cadre d'un contrat Predit avec la CGEA-Connex. L'étude n'est pas encore complète mais les résultats intermédiaires ont été présentés à plusieurs occasions.

- 9th Meeting of the EURO Working Group on Transportation Intermodality, Polytechnic University of Bari, Italie.
- Les Journées de l'Optimisation – Optimization Days 2002, Montreal.
- Quatrièmes journées nationales de ROADEF, Paris.

6.5.6. *Tarification optimale dans des problèmes de télécommunication*

Participants : A. Altman, L. Wynter.

Les méthodes de tarification dans les réseaux qui ont été développées pour les problèmes de transport peuvent aussi s'appliquer aux réseaux de télécommunications. Un travail dans ce sens est présenté dans [32].

Il semble souhaitable de rassembler d'unifier et d'analyser les résultats obtenus sur la modélisation et l'optimisation. Trois sources d'information, à savoir le transport, les télécoms, et la théorie des jeux traitent de modèles similaires, et parfois obtiennent des résultats différents. La théorie des jeux intervient en effet souvent pour faire les modèles puisqu'ils s'expriment souvent comme des équilibres entre plusieurs acteurs. Un travail de synthèse est présenté dans [51].

La compétition farouche entre les divers fournisseurs de service de télécoms conduit à l'élaboration de modèles pour déterminer les tarifs. Nous proposons ici des modélisations en terme d'équilibre statique de Nash dans lesquels les paramètres à déterminer sont les services proposés avec leurs tarifs. Plusieurs publications ont été faites sur ce sujet [47][51].

L'approche de la tarification des télécoms par des méthodes d'enchères a été traitée par [37] qui propose un modèle d'optimisation pour une allocation de ressources à l'enchères dite de « Smart Market ».

Une ARC a été proposée sur ces thèmes en 2002 par B. Tuffin de l'INRIA-IRISA, avec L. Wynter et E. Altman, ainsi que l'UVSQ.

6.5.7. *RAPL : route automatisée poids lourds*

Participants : C. Gomez, M. Goursat.

Il s'agit d'un travail en collaboration avec le LIVIC (Laboratoire sur les Interactions Véhicules-Infrastructure-Conducteurs, laboratoire commun INRETS-LCPC) dans le cadre d'une convention avec la DRAST (Direction de la Recherche et des Affaires techniques du Ministère de l'Équipement). Une première étude (2000-2001) avait été menée pour les véhicules légers. Il s'agissait essentiellement pour nous de résoudre les problèmes de dimensionnement et de faire les calculs moyens dans le cas d'un (ou plusieurs) scénario pour un tronçon de route automatisée (automatisation du couple véhicules-infrastructure et conduite automatique). Le problème que nous étudions maintenant est celui des poids lourds et plus particulièrement la partie simulation et contrôle-commande. Il faut donc définir des lois de commande adaptées au scénario choisis (mise en peloton ou non, localisation « par godets » ou non ...). Il faut ensuite faire la simulation complète d'une flotte de poids lourds. Un premier simulateur a été développé. Ce travail doit être complété par la résolution des problèmes d'estimation de paramètres on-line. Enfin il faudra résoudre en partie le problème du formattage du flot dans le cas où on maximise la sécurité c'est-à-dire avec des interdistances égales. Ce travail devrait conduire au développement d'une boîte à outils Scilab pour étudier les divers scénarios possibles et les sensibilités aux paramètres.

6.5.8. *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. Ce travail se fait dans le cadre du projet Eureka Flite. 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 : les raisons principales en sont la consommation de carburant qui modifie la masse et la rigidité de l'appareil (pour tous les types d'appareils) ou la modification brutale de la charge (cas des armes sur les avions militaires). Il y a également une évolution au cours de la vie de l'appareil par vieillissement. 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 (les équipements peuvent varier fortement, par exemple pour les appareils militaires et les appareils de petites dimensions) la définition des domaines de vol (le phénomène de flottement apparait dans certaines conditions de vol que l'on exclut du domaine de vol admissible)...

Une étude devrait reprendre dans le cas de la fusée Ariane 5 ou les variations sont brutales (la durée de vol est en minutes) : il s'agit également de suivre l'évolutions des fréquences propres et d'avoir une bonne approximation des amortissements (dans ce cas la connaissance des amortissements est importante pour la commande de la fusée et le traitement à apporter à la charge utile).

Les études continuent sur les tests modaux et physiques. Nous avons traité plusieurs exemples, dont un benchmark européen sur une structure civile de laboratoire, en collaboration avec le projet MACS de Rocquencourt.

7. Contrats industriels

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 RNTL SIMPA

Participants : R. Nikoukhah, S. Steer, R. Djenidi, A. Azil, M. Najafi.

La version actuelle de Scicos permet de modéliser, sous forme de schéma blocs, les systèmes dynamiques hybrides explicites c'est à dire régis par des équations différentielles et des événements. L'objectif de ce projet est d'étendre le formalisme de scicos aux systèmes régis par des équations alébro-différentielles. Le travail effectué cette année a été pour la modification de l'éditeur et du simulateur de Scicos. L'éditeur permettant de gérer des blocs ayant des ports non orientés et de décrire des schémas représentant des systèmes dynamiques hybrides implicites. Les équations régissant ces nouveaux blocs seront codées en Modelica. La compilation de l'ensemble des blocs implicites d'un schéma produit un programme Modelica qui sera utilisé par un parseur et un générateur de code (developpé par TNI) pour générer un programme qui sera ensuite utilisé par le simulateur Scicos. A cette fin le solveur d'équations algébro-différentielles DASKR a été interfacé dans Scicos.

7.3. Projet PREDIT : Tarification transport

Participantes : 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

- Ecole d'automne : MODELISATION MATHÉMATIQUE DU TRAFIC AUTOMOBILE. 28-30 Novembre 2002, à Paris, organisé avec le soutien du CNRS (Mathstic) par J.P. Lebacque (INRETS-GRETIA), JP Quadrat et M. Rasclé (Laboratoire JA Dieudonné, UMR6621, Nice).
- Participation de S. Gaubert à l'Arc FISC (formalisation et instrumentation des scénarios).

8.2. Actions européennes

8.2.1. *Niconet*

Participants : F. Delebecque, S. Steer.

Le contrat européen Niconet s'est terminé en Juin 2002. l'objectif de ce contrat était le développement de la bibliothèque numérique d'automatique. 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. Une sélection des fonctions Slicot ont été incorporées au noyau Scilab pour mettre à jour et pour en introduire de nouvelles 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

- Roger Nussbaum de Rutgers University, 1 semaine. dans le cadre de la convention NSF-INRIA.
- Yan Hong Ping 10 jours
- Kang Meng Zhen 2 mois.
- Zhang Zhi Gang et Zhao Xing sont en postdoc depuis mai et développent la Tool Box Plant.
- Wu Lin qui fait sa thèse sur le contrôle dans GreenLab avec le professeur Le Dimet vient régulièrement nous voir.

9. Diffusion des résultats

9.1. Animation de la communauté scientifique

- M . Akian : Co-responsable du séminaire « Probabilités, Optimisation, Contrôle » de l'INRIA Rocquencourt (anciennement appelé Fractales-Hypercom-Metalau-Meval).

- E. Altman et L. Wynter. Editeurs invités d'un numero spécial de « Networks and Spatial Economics : Special issue on crossovers between transportation and telecommunication modeling », Jan-Fev., 2003.
- F. Delebecque, C. Gomez, M. Goursat, J.P. Quadrat et S. Steer : Workshop Scilab à Shanghai en Avril 2002 : Il s'agissait d'un workshop organisé conjointement par le projet, le LIAMA et l'université de Shanghai (et le support des relations internationales de l'institut). Ce workshop était composé d'un tutoriel Scilab suivi d'exposés de recherches récentes menées avec Scilab.
- S. Gaubert a organisé un mini-symposium sur l'algèbre max-plus à la conférence ILAS (International Linear Algebra Society), Auburn, AL, Juin 2002.
- C. Gomez, M. Goursat et S. Steer : Euro-China en Avril 2002 : Nous avons participé à l'animation (présentations et démos de Scilab) du stand INRIA-LIAMA à Pékin.
- M. Goursat, C. Gomez, F. Delebecque, S. Steer : Concours Scilab Automne 2001 - Avril 2002 Avec le LIAMA nous avons organisé un concours Scilab en Chine. Ce concours était destiné aux étudiants et chercheurs et son sujet était le développement d'une « petite » boîte à outils en Scilab. La remise des prix s'est déroulée lors d'Euro-China (les principaux prix étaient 5 voyages en France offerts par l'ambassade de France à Pékin).
- M. Goursat, S. Steer, B. Pincon : Tutoriel Scilab à Yaoundé en octobre 2002 Nous avons animé un tutoriel Scilab dans le cadre du CARI. Ce tutoriel a été suivi par des doctorants et enseignants francophones qui assistaient au CARI (le nombre des auditeurs était limité à 25).
- R. Nikoukhah. Membre de « International Program Committee » pour « Mediterranean Control and Automation Conference » - Rhodes.

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
 - Cours de Mathématiques Financières à l'ESSI.
 - ENSTA, Automatique, 2^{ème} année.
- S. Gaubert
 - Cours (Optimisation Combinatoire) en troisième année à l'Ensta.
 - Cours (Systèmes à Événements Discrets) au DEA Automatique et Traitement du Signal, commun à l'Option Automatique de l'ENSMP.
 - Petites classes d'analyse numérique et d'optimisation en seconde année à l'École Polytechnique.
- 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.
 - Enseignant à l'école d'été Outils de Calcul Symbolique Numérique Collaboratif organisée par l'INRIA-Sophia Antipolis et le CNRS du 16 au 20 septembre 2002 à Giens.
- R. Nikoukhah
 - Ensta : Automatique 2^e année, Programmation dynamique 3^e année.
 - Pulv : Automatique 5^e année, Processus et commande stochastique 4^e année.
- J.P. Quadrat
 - DEA MMME Paris I, Introduction à la commande stochastique.

9.3. Autres enseignements

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

9.4. Encadrement de thèse

- Gaël Desilles. Encadrement assuré par R. Nikoukhah, F. Delebecque, J.P. Quadrat.
- Encadrement du DEA M. Ndong par J.P. Quadrat.
- Riccardo Katz. Encadrement assuré par S. Gaubert.

9.5. Membre de jury

- F. Delebecque
- Agrégation externe de mathématiques.
- S. Gaubert
- Membre du jury de thèse de R. Hoblos, Université de Paris-Dauphine, Fév. 2002.
- Membre du jury de thèse de P. Le Maigat, Université de Rennes 1, Septembre 2002.
- C. Gomez
- Membre du jury de l'agrégation externe de mathématiques marocaine (juin 2002). - Membre du jury de l'agrégation externe de mathématiques (juillet 2002).
- M. Goursat
- Rapporteur de l'HDR de Habib HAJ SAMEM.
- R. Nikoukhah
- Membre de jury de thèse d'habilitation de A. Zolghadri, Université de Bordeaux I.

9.6. Prix, distinctions

- E. Rofman élu membre de l'Académie Nationale des Sciences Exactes, Physiques et Naturelles - Argentine - Décembre 2001. Le 28 juin élu comme académicien lors de la cérémonie d'incorporation. Conférence sur « Récentes contributions de l'Inria en optimisation : Recherche, Applications, Tendances Actuelles. ».

9.7. Participation à des colloques, séminaires, invitations

- M. Akian
- Visite de Vassili Kolokoltsov à Nottingham Trent University du 20 au 27 janvier 2001, séminaire présentant les travaux de [1].
- Visite de Roger Nussbaum à Rutgers University, du 19 au 27 novembre 2002, dans le cadre de la convention NSF-INRIA.
- G. Cohen, P. Lotito, E. Mancinelli, J.P. Quadrat, L. Wynter
- Un algorithme global pour la résolution de problèmes biniveaux de tarification de réseaux de service. Quatrième journées nationales de la ROADEF : Association Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision.
Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, 20- 22 février 2002.

- S. Gaubert
 - Visite de Vassili Kolokoltsov à Nottingham Trent University du 20 au 27 janvier 2001, séminaire présentant les travaux de [21].
 - Exposé à la conférence ILAS, Auburn, AL, Juin 2002 : Perturbation of eigenvalues and max-plus algebra.
 - Mini-cours au workshop « Weighted automata : theory and applications », Dresden, Mars 2002.
 - Séminaire de groupe de travail « Méthodes stochastiques et finance », UMLV, « Théorie spectrale des applications monotones contractantes et contrôle ergodique », Février 2002.
 - Séjour de deux semaines à l'université de Rosario (Argentina), pour encadrement de la thèse de R. Katz.
- P. Lotito, E. Mancinelli, J.P. Quadrat
 - Traffic assignment algorithms : a Scilab tool-box, numerical comparisons. 9th Meeting of the EURO Working Group on Transportation Intermodality, Sustainability and Intelligent Transportation Systems. Polytechnic University of Bari, Faculty of Engineerign, Bari, Italy, June 10-13, 2002.
 - Algorithms for the Traffic Assignment Problem. Les Journées de l'Optimisation – Optimization Days 2002, Montreal, May 6-8, 2002.
 - Algorithmes d'affectation du trafic routier. Quatrièmes journées nationales de ROADEF : Association Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision. Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, 20- 22 février 2002.
 - The traffic Assignment toolbox of Scilab : CiudadSim. Scilab Workshop Shanghai Avril 2002.
- P. Lotito, E. Mancinelli, L. Wynter
 - Optimal pricing and design of new public transport service. 9th Meeting of the EURO Working Group on Transportation Intermodality, Sustainability and Intelligent Transportation Systems. Polytechnic University of Bari, Faculty of Engineerign, Bari, Italy, June 10-13, 2002.
- P. Lotito, E. Mancinelli, J.P. Quadrat, L. Wynter
 - Bilevel Programs on Traffic Networks. Les Journées de l'Optimisation – Optimization Days 2002, Montreal, May 6-8, 2002.
- L. Mevel, M. Goursat, M. Basseville, A. Benveniste Â« Steelquake modes and modeshapes identification from multiple sensor pools Â », in : 20th International Modal Analysis Conference (IMAC-XX), Los Angeles, SEM, Inc., février 2002.
- R. Nikoukhah
 - Early decision making when using proper auxiliary signals. Proc. of 41st IEEE, CDC, Las Vegas, Nevada, Dec. 2002 (avecc S.L. Campbell et K. Drake).
- E. Rofman
 - Conférencien invité au « IV Pan-American Workshop in Applied and Computational Mathematics » - San Diego State University and Famaf, Cordoba, July 1-5.
 - Conférencien invité au « First South American Congress on Computational Mechanics » - Santa Fe - panama, 28-31 October.
- C. Walsh
 - Conférence ILAS, Auburn, AL, juin 2002, présentation de [43].

10. Bibliographie

Bibliographie de référence

- [1] M. AKIAN, R. 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.
- [2] M. AKIAN, R. BAPAT, S. GAUBERT. *Asymptotics of the Perron Eigenvalue and Eigenvector Using Max-algebra*. in « C. R. Acad. Sci. Paris », volume t. 327, Série I, 1998, pages 927-932.
- [3] M. AKIAN, P.-A. BLIMAN. *On super-high-frequencies in discontinuous 1st-order delay-differential equations*. in « Journal of Differential Equations », volume 162, 2000, pages 326-358.
- [4] F. BACCELLI, G. COHEN, G. J. OLSDER, J.-P. QUADRAT. *Synchronisation and Linearity*. Wiley, 1992.
- [5] C. BUNKS, J.-P. CHANCELIER, F. DELEBECQUE, C. GOMEZ (ÉDITEUR), M. GOURSAT, R. NIKOUKHAH, S. STEER. *Engineering and scientific computing with Scilab*. Birkhauser, 1999.
- [6] J.-P. CHANCELIER, F. DELEBECQUE, C. GOMEZ (ÉDITEUR), M. GOURSAT, R. NIKOUKHAH, S. STEER. *Introduction à Scilab*. Springer, 2002.
- [7] G. COHEN, D. DUBOIS, J.-P. QUADRAT, M. VIOT. *A linear system-theoretic view of discrete event processes and its use for performance evaluation in manufacturing*. in « IEEE Transactions on Automatic Control », numéro 30, 1985, pages 210-220.
- [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*. in « IEEE Trans. Automat. Control », numéro 12, volume 40, Dec, 1995.
- [10] S. GAUBERT, J. MAIRESSE. *Modeling and analysis of timed Petri nets using heaps of pieces*. in « IEEE Trans. Automat. Control », numéro 4, volume 44, 1999, pages 683-697.
- [11] B. . LÉVY, A. BENVENISTE, R. NIKOUKHAH. *High level primitives for recursive maximum likelihood estimation*. in « IEEE Transactions on Automatic Control », numéro 8, 1996.
- [12] R. NIKOUKHAH, B. C. LEVY, A. S. WILLSKY. *Stability, stochastic stationarity and generalized Lyapunov equations for two-point boundary-value descriptor systems*. in « IEEE Transactions on Automatic Control », numéro 11, volume 34, 1989, pages 1141-1152.
- [13] R. NIKOUKHAH. *Innovations generation in the presence of unknown inputs*. in « Automatica », numéro 30, 1994.
- [14] R. NIKOUKHAH, A. S. WILLSKY, B. C. LEVY. *Kalman filtering and Riccati equations for descriptor systems*. in « IEEE Transactions on Automatic Control », numéro 9, volume 37, 1992, pages 1325-1342.

- [15] J.-P. QUADRAT, MAX-PLUS WORKING GROUP. *Min-Plus Linearity and Statistical Mechanics*. in « Markov Processes and Related Fields », numéro 4, volume 3, 1997, pages 565-587.
- [16] M. STERNAD, S. RÖNNBÄCK. *A frequency domain approach to Anti-windup compensator design*. rapport technique, numéro UPTEC 93024R, Uppsala University, April, 1993.
- [17] 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.
- [18] D. VON WISSEL, R. NIKOUKHAH, S. L. CAMPBELL, F. DELEBECQUE. *The effect of computational delay in descriptor based trajectory tracking control*. in « Int. J. Control », numéro 67, 1997, pages 251-273.

Articles et chapitres de livre

- [19] M. AKIAN, S. BISMUTH. *Instability of rapidly-oscillating periodic solutions for discontinuous differential delay equations*. in « Differential and Integral Equations », numéro 1, volume 15, 2002, pages 53-90.
- [20] M. AKIAN, P.-A. BLIMAN, M. SORINE. *Control of delay systems with relay*. in « IMA Journal on Mathematical Control and Information », volume 19, 2002, pages 133-155.
- [21] M. AKIAN, S. GAUBERT. *Spectral Theorem for Convex Monotone Homogeneous Maps, and ergodic Control*. in « Nonlinear Analysis. Theory, Methods & Applications », numéro 2, volume 52, 2003, pages 637-679.
- [22] M. AKIAN, S. GAUBERT, V. KOLOKOLTSOV. *Invertibility of functional Galois connections*. in « C. R. Acad. Sci. Paris », volume Ser. I 335, 2002, pages 1-6.
- [23] S. L. CAMPBELL, K. HORTON, R. NIKOUKHAH, F. DELEBECQUE. *Optimization formulations of auxiliary signal design for rapid multi-model identification*. in « Automatica », volume 38, 2002.
- [24] S. L. CAMPBELL, K. HORTON, R. NIKOUKHAH, F. DELEBECQUE. *Optimization formulations of auxiliary signal desing for rapid multi-model identification*. in « Automatica », accepted.
- [25] G. COHEN, J.-P. QUADRAT, L. WYNTER. *On the halfplane and cone algorithms for bilevel programming by Clegg and Smith*. in « Transportation Research B », à paraître.
- [26] O. FALL, J.-P. QUADRAT. éditeurs R. GLOWINSKI, H. KAWARADA, J. PERIAUX., *About Min-Plus Product Forms*. GAKKOTOSHO, 2002, pages 17-26.
- [27] J. GUNAWARDENA, C. WALSH. *Iterates of Maps which are Non-expansive in Hilberts's Metric*. in « Kybernetika », numéro 2, volume 38, avril, 2003, A paraître.
- [28] L. MEVEL, M. BASSEVILLE, A. BENVENISTE, M. GOURSAT. *Blind subspace-based eigenstructure identification under nonstationary excitation using moving sensors*. in « IEEE Transactions on Signal Processing SP-50 », numéro 1, Janvier, 2002, pages 41-48.
- [29] L. MEVEL, M. BASSEVILLE, A. BENVENISTE, M. GOURSAT. *Merging sensor data from multiple measure-*

ment setups for nonstationary subspace-based modal analysis. in « Journal of Sound and Vibration 249 », numéro 4, Janvier, 2002, pages 719-741.

- [30] R. NIKOUKHAH, S. L. CAMPBELL, K. HORTON, F. DELEBECQUE. *Auxiliary signal design for robust multi-model identification*. in « IEEE Trans. Aut. Cont. », volume 47, 2002.
- [31] C. WALSH. *Maximal Effective Bandwidth of Constrained Traffic*. in « Queueing Systems », 2002, Accepté.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [32] M. BOUHTOU, M. DIALLO, L. WYNTER. *Fair resource allocation and link pricing : a numerical study*. in « Optimization and Optimal Control », World Scientific Publishing, éditeurs P.M. PARDALOS, I. TSEVENDORJ, R. ENKHBAT., 2003, à paraître.
- [33] S. L. CAMPBELL, K. DRAKE, R. NIKOUKHAH. *Auxiliary signal design for multi-model identification in systems with multiple delays*. in « Proc. IEEE Med. Conf. Control and Automation », Lisbon - Portugal, 2002.
- [34] S. L. CAMPBELL, K. DRAKE, R. NIKOUKHAH. *Early decision making when using proper auxiliary signals*. in « Proc. IEEE Conf. Decision Control », 2002.
- [35] S. L. CAMPBELL, R. NIKOUKHAH. *The design of auxiliary signals for robust active failure detection in uncertain systems*. in « Proc. MTNS », Notre Dame, 2002.
- [36] C. GOMEZ. *Scilab, the Other Package for Numerical Computations*. in « Workshop on Open Source Computer Algebra, Lyon », 21 mai-23 mai, 2002.
- [37] F. JARRAY, L. WYNTER. *An Optimal Smart Market for Network Pricing and Resource Allocation*. in « INFORMSS Conference on telecommunications », Boca Raton, April, 2002.
- [38] B. C. LEVY, R. NIKOUKHAH. *Robust least-squares filtering with a relative entropy constraint*. in « Proc. MTNS », Notre Dame, 2002.
- [39] R. NIKOUKHAH, S. L. CAMPBELL. *Active failure detection : Auxiliary signal design and on-line detection*. in « Proc. IEEE Med. Conf. Control and Automation », 2002.

Rapports de recherche et publications internes

- [40] G. COHEN, S. GAUBERT, J.-P. QUADRAT. *Duality and Separation Theorems in Idempotent Semimodules*. Rapport de recherche, numéro 4668, INRIA, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4668.html>, eprint arXiv :math.FA/0212294.
- [41] S. GAUBERT, R. KATZ. *Rational semimodules over the max-plus semiring and geometric approach of discrete event systems*. Rapport de recherche, numéro 4519, INRIA, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4519.html>, eprint arXiv :math.OC/0208014.

Divers

- [42] M. AKIAN, S. GAUBERT, R. NUSSBAUM. *Uniqueness of fixed point of nonexpansive semidifferentiable maps*. 2002, En préparation.
- [43] M. AKIAN, S. GAUBERT, C. WALSH. *Denumerable Max-Plus Spectral Theory and Max-Plus Martin Boundaries*. 2002, En préparation.
- [44] M. AKIAN, I. SINGER. *Downward sets and conjugations in continuous conditionally complete lattice ordered groups*. 2002, En préparation.
- [45] S. L. CAMPBELL, R. NIKOUKHAH. *Auxiliary Signal Design for Failure Detection*. livre - en cours.
- [46] G. COHEN, S. GAUBERT, J.-P. QUADRAT. *L'algèbre dans tous ses états*. article en préparation Pour la Science.
- [47] Z. LIU, L. WYNTER, C. XIA. *Pricing information services in a competitive market : avoiding price wars*. submitted to ACM Conference on Electronic Commerce (EC'03).
- [48] P. MARCOTTE, L. WYNTER. *A new look at the multi-class network equilibrium problem*. à paraître dans Transportation Science.
- [49] R. D. NUSSBAUM, C. WALSH. *A Metric Inequality for the Thompson and Hilbert Geometries*. 2002, Preprint.
- [50] C. WALSH. *Worst Case Traffic from Regulated Traffic Sources*. 2002, Soumis. Version préliminaire : HP Labs Technical Report HPL-BRIMS-01-01.
- [51] R. EL AZOUZI, E. ALTMAN, L. WYNTER. *Telecommunications Network Equilibrium with Price and Quality -of-Service Characteristics*.

Bibliographie générale

- [52] M. AKIAN. *On the continuity of the Cramer transform*. Rapport de Recherche, numéro 2841, Inria, Rocquencourt, 1996, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-2841.html>.
- [53] M. AKIAN. *Densities of idempotent measures and large deviations*. in « Transactions of the American Mathematical Society », numéro 11, volume 351, 1999, pages 4515-4543.
- [54] M. AKIAN, J.P. QUADRAT, M. VIOT. *Bellman Processes*. in « LNC in Control and Information Sciences n. 199 : 11th International Conference on Analysis and Optimization of Systems », Springer-Verlag, éditeurs G. COHEN, J.P. QUADRAT., 1994.
- [55] T.S. BLYTH, M.F. JANOWITZ. *Residuation theory*. Pergamon Press, Oxford, 1972.
- [56] J. COCHET-TERRASSON. *Algorithmes d'itération sur les politiques pour les applications monotones contractantes*. Thèse, spécialité Mathématiques et Automatique, École des Mines, Dec., 2001.

- [57] J. COCHET-TERRASSON, S. GAUBERT, J. GUNAWARDENA. *A constructive fixed point theorem for min-max functions*. in « Dynamics and Stability of Systems », numéro 4, volume 14, 1999.
- [58] G. COHEN, S. GAUBERT, J.P. QUADRAT. *Asymptotic throughput of continuous timed petri nets*. in « CDC-AC », New Orléans, décembre, 1995.
- [59] S. GAUBERT. *On the Burnside Problem for Semigroups of Matrices in the $(max, +)$ Algebra*. in « Semigroup Forum », volume 52, 1996, pages 271-292.
- [60] S. GAUBERT, J. GUNAWARDENA. *The Perron-Frobenius Theorem for Homogeneous, Monotone Functions*. Hewlett-Packard Technical Report, numéro 2001-12, HPL-BRIMS, 2001, Also arXiv :math.FA/0105091.
- [61] 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.
- [62] S. GAUBERT, J. GUNAWARDENA. *The duality theorem for min-max functions*. in « C.R.A.S », volume 326, Jan., 1998, pages 43-48.
- [63] E. KOHLBERG. *Invariant half-lines of nonexpansive piecewise-linear transformations*. in « Math. Oper. Res. », numéro 3, volume 5, 1980, pages 366-372.
- [64] E. KOHLBERG, A. NEYMAN. *Asymptotic behavior of nonexpansive mappings in normed linear spaces*. in « Israel J. Math. », numéro 4, volume 38, 1981, pages 269-275.
- [65] L. LIBEAUT. *Sur l'utilisation des dioïdes pour les commandes des systèmes à événements discrets*. thèse de doctorat, Université, Nantes, 1997.
- [66] V.P. MASLOV. *Méthodes opératorielles*. Edition Mir, Moscou, 1987.
- [67] E. PAP. *Null-Additive Set Functions*. Kluwer, Dordrecht, 1995.
- [68] J.P. QUADRAT. *Théorèmes asymptotiques en programmation dynamique*. in « Note C.R.A.S. », numéro 311, 1990, pages 745-748.
- [69] V. RAUCH, M. SORINE, H. JREIJ. *Procédé de commande d'un moteur à combustion interne*. Brevet. Numéro d'enregistrement national : 99 02505.
- [70] P. DEL MORAL, T. THUILLET, G. RIGAL, G. SALUT. *Optimal versus random processes : the nonlinear cases*. Rapport de Recherche, 1990.
- [71] R.D. NUSSBAUM. *Hilbert's projective metric and iterated nonlinear maps*. in « Memoirs of the AMS », numéro 391, volume 95, 1990.
- [72] S.L. CAMPBELL, R. NIKOUKHAH, F. DELEBECQUE. *Nonlinear descriptor systems*. éditeurs P.M. FRANK., in « Advances in Control », Springer Verlag, 1999.

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