



INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE

*Project-Team Maxplus*

*Algèbres max-plus et mathématiques de la  
décision/Max-plus algebras and  
mathematics of decision*

*Rocquencourt*

THEME NUM

*Activity*  
*R*  
*Report*

2005



## Table of contents

<b>1. Team</b>	<b>1</b>
<b>2. Overall Objectives</b>	<b>1</b>
2.1. Mots-clés/Keywords	1
2.2. Présentation et objectifs généraux/Overall objectives	2
<b>3. Scientific Foundations</b>	<b>3</b>
3.1. L'algèbre max-plus/Max-plus algebra	3
3.2. Algèbre max-plus, programmation dynamique, et commande optimale/Max-plus algebra, dynamic programming, and optimal control	5
3.3. Applications monotones et théorie de Perron-Frobenius non-linéaire, ou l'approche opératorielle du contrôle optimal et des jeux/Monotone maps and non-linear Perron-Frobenius theory, or the operator approach to optimal control and games	6
3.4. Processus de Bellman/Bellman processes	7
3.5. Systèmes à événements discrets/Discrete event systems	8
3.6. Algèbre linéaire max-plus/Basic max-plus algebra	9
3.7. Algèbre max-plus et asymptotiques/Using max-plus algebra in asymptotic analysis	9
<b>4. Application Domains</b>	<b>10</b>
4.1. Systèmes à événements discrets (productique, réseaux)/Discrete event systems (manufacturing systems, networks)	10
4.2. Commande optimale et jeux/Optimal control and games	10
4.3. Recherche opérationnelle/Operations research	11
4.4. Analyse statique de programmes/Static analysis of computer programs	11
4.5. Autres applications/Other applications	12
<b>5. Software</b>	<b>12</b>
5.1. Boîte à outil Maxplus de SCILAB/Maxplus toolbox of Scilab	12
5.2. Solveurs numériques d'équations de Hamilton-Jacobi/Numerical solution of Hamilton-Jacobi equations	12
<b>6. New Results</b>	<b>12</b>
6.1. Théorie spectrale max-plus/Max-plus spectral theory	12
6.1.1. Introduction	12
6.1.2. Théorie spectrale max-plus dénombrable/Denumerable max-plus spectral theory	13
6.1.3. La frontière de Martin max-plus/The max-plus Martin boundary	13
6.1.4. Mesure représentative minimale/Minimum representing measure	14
6.1.5. La frontière d'espaces normés/The boundary of normed spaces	14
6.2. L'approche opératorielle du contrôle optimal et des jeux/Operator approach to optimal control and games	15
6.2.1. Introduction	15
6.2.2. Applications semi-différentiables contractantes au sens large/Semidifferentiable nonexpansive maps	15
6.2.3. Applications monotones convexes contractantes au sens large/Monotone convex nonexpansive maps	16
6.2.4. Algorithmes d'itération sur les politiques pour les jeux répétés avec gain moyen/Policy iteration algorithm for repeated games with mean payoff	16
6.2.5. Un modèle de parcours auto-validant du web/A model of self-validating effects of web surfing	16
6.3. Algèbre linéaire max-plus et convexité abstraite/Max-plus linear algebra and abstract convex analysis	17
6.3.1. Fonctions convexes max-plus/Max-plus convex functions	17

6.3.2.	Semi-modules projectifs max-plus/Projective max-plus semimodules	17
6.3.3.	L'équation $Bf = g$ , quand B est une conjugaison de Moreau/The equation $Bf = g$ , where B is a Moreau conjugacy	17
6.4.	Théorie des perturbations /Perturbation theory	18
6.4.1.	Introduction	18
6.4.2.	Problèmes d'optimisation en théorie des perturbations / Optimisation problems in perturbation theory	19
6.4.3.	Calcul numérique robuste de valeurs propres de matrices/Robust numerical computation of matrix eigenvalues	19
6.5.	Systèmes à événements discrets/Discrete event systems	19
6.5.1.	Le problème de l' $(A, B)$ -invariance max-plus/The max-plus $(A, B)$ -invariance problem	19
6.6.	Méthode des éléments finis max-plus pour la résolution de problèmes de commande optimale déterministe/The max-plus finite element method for deterministic optimal control problem	20
6.7.	Analyse statique de programmes et itération sur les politiques/Static analysis of computer programs and policy iteration	21
<b>7.</b>	<b>Other Grants and Activities</b>	<b>22</b>
7.1.	Actions internationales	22
7.2.	Accueils de chercheurs étrangers	22
<b>8.</b>	<b>Dissemination</b>	<b>22</b>
8.1.	Animation de la communauté scientifique	22
8.2.	Enseignement universitaire	23
8.3.	Encadrement de thèse	23
8.4.	Participation à des colloques, séminaires, invitations	23
<b>9.</b>	<b>Bibliography</b>	<b>24</b>

# 1. Team

## Responsable scientifique/Head of team

Stéphane Gaubert [DR, Inria]

## Responsable permanent/Co-head of the team

Marianne Akian [CR, Inria]

## Assistante de projet/Administrative assistant

Martine Verneuille [AI, Inria]

## Personnel Inria/Inria staff

Jean-Pierre Quadrat [DR, projet Metalau, à temps partiel dans Maxplus/*Metalau project, part time member of Maxplus project*]

Cormac Walsh [CR]

## Collaborateurs extérieurs/External collaborators

Guy Cohen [Professeur ENPC]

Michel Gondran

## Chercheurs invités/Visiting scientists

Ravindra Bapat [Indian Statistical Institute (New Delhi), 1 semaine/*1 week*]

Henda El Fekih [ENIT (Tunis), 2×1 semaine/*2×1 week*]

Bas Lemmens [Warwick University, 1 semaine/*1 week*]

## Doctorants/Ph.D. Students

Asma Lakhoua [Cotutelle Paris 6 - École Nationale d'Ingénieurs de Tunis]

Laure Ninove [UCL (Belgique), Doctorante en visite depuis octobre 2005/*Visiting PhD student since October 2005*]

## Post-Doctorants/Post-Docs

Ricardo Katz [jusqu'à Septembre 2005/*until September 2005*]

## Stagiaires/Interns

Sylvain Corlay [DEA OJME, Paris 6]

Vishesh Dhingra [INRIA intern, IIT Delhi]

## Personnel imaginaire/Imaginary research scientist

Max Plus [Nom collectif pour le groupe de travail de Rocquencourt<sup>1</sup>/*Collective name for the Rocquencourt team<sup>2</sup>*]

# 2. Overall Objectives

## 2.1. Mots-clés/Keywords

**Mots-clés :** Algèbre max-plus, algèbre tropicale, systèmes à événements discrets, programmation dynamique, décision markovienne, contrôle optimal déterministe et stochastique, théorie des jeux, théorie des perturbations, théorie de Perron-Frobenius non linéaire, applications contractantes, analyse numérique, mathématiques discrètes, recherche opérationnelle.

**Keywords:** *Max-plus algebra, Tropical algebra, Discrete event dynamic systems, Dynamic programming, Markov decision, Deterministic and Stochastic optimal control, Game theory, Perturbation theory, Nonlinear Perron-Frobenius theory, Nonexpansive maps, Numerical analysis, Discrete mathematics, Operations Research.*

---

<sup>1</sup>Réunissant, ou ayant réuni, Guy Cohen, Jean-Pierre Quadrat, Michel Viot, Didier Dubois, Pierre Moller, Ramine Nikoukhah, Stéphane Gaubert, Marianne Akian, Michael Mc Gettrick, Elina Mancinelli, et Pablo Lotito. Le lecteur veillera à ne pas confondre max-plus, Max Plus, et Maxplus: Monsieur Max Plus travaille sur l'algèbre max-plus et fait partie du projet Maxplus.

<sup>2</sup>Comprising or having comprised Guy Cohen, Jean-Pierre Quadrat, Michel Viot, Didier Dubois, Pierre Moller, Ramine Nikoukhah, Stéphane Gaubert, Marianne Akian, Michael Mc Gettrick, Elina Mancinelli, and Pablo Lotito. Note the difference between max-plus, Max Plus, and Maxplus: Mr Max Plus works on max-plus algebras and is a member of the Maxplus team.

## 2.2. Présentation et objectifs généraux/Overall objectives

Le projet MAXPLUS développe la théorie, l'algorithmique, et les applications des algèbres de type max-plus ou tropicale, en relation avec les domaines où celles-ci interviennent: théorie de la décision (commande optimale déterministe et stochastique et théorie des jeux), analyse asymptotique et théorie des probabilités, modélisation et évaluation de performance de systèmes à événements discrets (réseaux de transport ou de télécom, systèmes de production), et plus généralement, recherche opérationnelle. On peut distinguer les axes de recherche suivants.

**Commande optimale et théorie des jeux** On s'intéresse aux problèmes de décision dans le temps. Nous étudions les propriétés théoriques des équations de la programmation dynamique et nous développons des algorithmes pour les résoudre. Les opérateurs de la programmation dynamique à temps discret peuvent être vus comme des cas particuliers de systèmes dynamiques monotones ou contractants, ou d'opérateurs de Perron-Frobenius non-linéaires. Nous étudions les points fixes (qui donnent la valeur de problèmes de décision en horizon infini), les vecteurs propres non linéaires (qui apparaissent dans les problèmes de décision avec critère ergodique), et le comportement asymptotique des orbites de tels opérateurs. Nous étudions aussi les équations aux dérivées partielles d'Hamilton-Jacobi-Bellman, lesquelles sont des équations de la programmation dynamique à temps continu. Notre but est de développer de nouveaux algorithmes et méthodes de discrétisation, à partir des résultats max-plus et de leurs généralisations. On s'intéresse plus particulièrement aux problèmes de grande taille, qui nécessitent le développement d'algorithmes rapides (algorithmes de graphe) ou de nouvelles approximations.

**Systèmes à événements discrets** On s'intéresse à l'analyse (évaluation de performance), à l'optimisation, et à la commande, de systèmes dynamiques à événements discrets, qui apparaissent dans la modélisation de réseaux (routiers, ferroviaires, télécom) et en productique. On développe des modèles basés sur les systèmes dynamiques max-plus linéaires et leurs généralisations (automates, systèmes monotones ou contractants), permettant de représenter des phénomènes de synchronisation ou de concurrence (partage de ressources). On s'intéresse en particulier : au calcul ou à la maximisation de certaines mesures de performances; à la fabrication de contrôleurs (ou même de "feedbacks") vérifiant certaines contraintes de sécurité ou de service.

**Théorie des perturbations** On étudie les problèmes asymptotiques dont les équations limites ont une structure de type max-plus, tels les perturbations singulières de valeurs propres ou les grandes déviations. On s'intéresse en particulier aux problèmes singuliers pour lesquels les résultats analytiques ou les méthodes numériques ont besoin d'être améliorés.

**Recherche opérationnelle** Le rôle de l'algèbre max-plus dans certains problèmes de recherche opérationnelle est maintenant bien connu (programmation dynamique, problèmes de chemins, d'affectation ou de transport, certains problèmes d'ordonnancement, problèmes avec des contraintes disjunctives). Notre but est de développer plus avant les méthodes algébriques en recherche opérationnelle.

**Algèbre max-plus et domaines reliés** Le groupe Maxplus travaille depuis de nombreuses années sur l'algèbre max-plus de base : analogues max-plus des modules et des polyèdres convexes, des déterminants, des notions de rang, des systèmes d'équations linéaires, des vecteurs propres, des équations polynomiales, mesures idempotentes, etc., qui ont souvent joué un rôle décisif dans nos applications précédentes de l'approche max-plus. L'intérêt pour certains problèmes de base max-plus est récemment apparu dans plusieurs autres domaines des mathématiques. Un de nos objectifs est de poursuivre l'étude de problèmes de base max-plus.

**Logiciel** La boîte à outils max-plus de Scilab implémente le calcul de base max-plus ainsi que quelques algorithmes rapides de résolution de problèmes particuliers. On s'intéresse à développer de tels outils.

### *English version*

The Maxplus project develops theory, algorithms, and applications of algebras of max-plus or tropical type, in relation with the fields where these algebras arise: decision theory (deterministic and stochastic optimal

control and game theory), asymptotic analysis and probability theory, modelling and performance analysis of discrete event dynamic systems (transportation or telecommunication networks, manufacturing systems), and Operations Research. The following research topics are particularly developed.

**Optimal control and game theory** We are interested in decision problems over time. We study the theoretical properties of dynamic programming equations and develop algorithms to solve them. We view discrete time dynamic programming operators as particular cases of monotone or non-expansive dynamical systems, or non-linear Perron-Frobenius operators. We study fixed points (arising in decision problems in infinite horizon), non-linear eigenvectors (arising in problems with ergodic reward), and the asymptotic behaviour of orbits (asymptotics of the value function as the horizon tends to infinity). We also study Hamilton-Jacobi-Bellman partial differential equations, which are continuous time versions of dynamic programming equations. Our aim is to develop new algorithms and discretisations methods, exploiting the max-plus results and their generalisations. We are particularly interested in large size problems, which require to develop fast (graph-type) algorithms or new approximation methods.

**Discrete event systems** We are interested in analysis (performance evaluation) and control problems for dynamic discrete event systems, which arise in the transportation or telecommunication networks or in manufacturing systems. We develop models based on max-plus linear dynamical systems and their generalisations (automata models, nonexpansive or monotone systems), which represent both synchronisation and concurrency (resource sharing) phenomena. Problems of interest include: computing or maximising some performance measures, like the throughput; designing controls (if possible, feedbacks) that ensure given security or service specifications.

**Perturbation theory** We study asymptotic problems, like problems of singular perturbations of eigenvalues or large deviation type problems, which are governed by limiting equations having a max-plus type structure. We are particularly interested in singular problems, for which analytical results or numerical methods must be precised or improved.

**Operations Research** The role of max-plus algebra in some special problems of Operations Research is now well known (dynamic programming, path problems, assignment or transportation problems, certain special scheduling problems, problems with disjunctive constraints). Our goal is to develop further algebraic tools in Operations Research.

**Max-plus algebra and related fields** The Maxplus team has worked for several years on basic max-plus algebraic objects and constructions, like max-plus analogues of modules and convex polyhedra, max-plus determinants, rank notions, systems of linear equations, max-plus eigenvectors, max-plus polynomial equations, idempotent measures, etc., which often played a decisive role in our earlier applications of the max-plus approach. There is now a growing interest in certain basic max-plus problems which have recently appeared in several other fields. One objective is to pursue the study of basic max-plus problems.

**Software** The max-plus toolbox of Scilab implements the basic numerical calculus in max-plus algebra, as well as some fast algorithms for specific problems. The extension of this toolbox is one of our goals.

## 3. Scientific Foundations

### 3.1. L'algèbre max-plus/Max-plus algebra

Le semi-corps *max-plus* est l'ensemble  $\mathbb{R} \cup \{-\infty\}$ , muni de l'addition  $(a, b) \mapsto a \oplus b = \max(a, b)$  et de la multiplication  $(a, b) \mapsto a \otimes b = a + b$ . Cette structure algébrique diffère des structures de corps classiques par le fait que l'addition n'est pas une loi de groupe, mais est idempotente:  $a \oplus a = a$ . On rencontre parfois des variantes de cette structure: par exemple, le semi-corps *min-plus* est l'ensemble  $\mathbb{R} \cup \{+\infty\}$  muni des lois  $a \oplus b = \min(a, b)$  et  $a \otimes b = a + b$ , et le semi-anneau *tropical* est l'ensemble  $\mathbb{N} \cup \{+\infty\}$  munis des mêmes lois. L'on peut se poser la question de généraliser les constructions de l'algèbre et de l'analyse classique, qui

repose pour une bonne part sur des anneaux ou des corps tels que  $\mathbb{Z}$  ou  $\mathbb{R}$ , au cas de semi-anneaux de type max-plus: tel est l'objet de ce qu'on appelle un peu familièrement "l'algèbre max-plus".

Il est impossible ici de donner une vue complète du domaine. Nous nous bornerons à indiquer quelques références bibliographiques. L'intérêt pour les structures de type max-plus est contemporain de la naissance de la théorie des treillis [64]. Depuis, les structures de type max-plus ont été développées indépendamment par plusieurs écoles, en relation avec plusieurs domaines. Les motivations venant de la Recherche Opérationnelle (programmation dynamique, problèmes de plus court chemin, problèmes d'ordonnement, optimisation discrète) ont été centrales dans le développement du domaine [61], [73], [110], [112], [113]. Les semi-anneaux de type max-plus sont bien sûr reliés aux algèbres de Boole [52]. L'algèbre max-plus apparaît de manière naturelle en contrôle optimal et dans la théorie des équations aux dérivées partielles d'Hamilton-Jacobi [101], [100], [91], [79], [70], [104], [86], [71], [65],[4]. Elle apparaît aussi en analyse asymptotique (asymptotiques de type WKB [90], [91], [79], grandes déviations [99], asymptotiques à température nulle en physique statistique [54]), puisque l'algèbre max-plus apparaît comme limite de l'algèbre usuelle. La théorie des opérateurs linéaires max-plus peut être vue comme faisant partie de la théorie des opérateurs de Perron-Frobenius non-linéaires, ou de la théorie des applications contractantes ou monotones sur les cônes [80], [95], [88], [44], laquelle a de nombreuses motivations, telles l'économie mathématique [94], et la théorie des jeux [102], [37]. Dans la communauté des systèmes à événements discrets, l'algèbre max-plus a été beaucoup étudiée parce qu'elle permet de représenter de manière linéaire les phénomènes de synchronisation, lesquels déterminent le comportement temporel de systèmes de production ou de réseaux, voir [6]. Parmi les développements récents du domaine, on peut citer le calcul des réseaux [53], [48], qui permet de calculer des bornes pire des cas de certaines mesures de qualité de service. En informatique théorique, l'algèbre max-plus (ou plutôt le semi-anneau tropical) a joué un rôle décisif dans la résolution de problèmes de décision en théorie des automates [105], [76], [106], [81], [97]. Notons finalement, pour information, que l'algèbre max-plus est apparue récemment en géométrie algébrique [69], [109], [92], [108] et en théorie des représentations [67], [46], sous les noms de géométrie et combinatoire tropicales.

Nous décrivons maintenant de manière plus détaillée les sujets qui relèvent directement des intérêts du projet, comme la commande optimale, les asymptotiques, et les systèmes à événements discrets.

### *English version*

The *max-plus* semifield is the set  $\mathbb{R} \cup \{-\infty\}$ , equipped with the addition  $(a, b) \mapsto a \oplus b = \max(a, b)$  and the multiplication  $(a, b) \mapsto a \otimes b = a + b$ . This algebraic structure differs from classical structures, like fields, in that addition is idempotent:  $a \oplus a = a$ . Several variants have appeared in the literature: for instance, the *min-plus* semifield is the set  $\mathbb{R} \cup \{+\infty\}$  equipped with the laws  $a \oplus b = \min(a, b)$  and  $a \otimes b = a + b$ , and the *tropical* semiring is the set  $\mathbb{N} \cup \{+\infty\}$  equipped with the same laws. One can ask the question of extending to max-plus type structures the classical constructions and results of algebra and analysis: this is what is often called in a wide sense "max-plus algebra" or "tropical algebra".

It is impossible to give in this short space a fair view of the field. Let us, however, give a few references. The interest in max-plus type structures is contemporaneous with the early developments of lattice theory [64]. Since that time, max-plus structures have been developed independently by several schools, in relation with several fields. Motivations from Operations Research (dynamic programming, shortest path problems, scheduling problems, discrete optimisation) were central in the development of the field [61], [73], [110], [112], [113]. Of course, max-plus type semirings are related to Boolean algebras [52]. Max-plus algebras arises naturally in optimal control and in the theory of Hamilton-Jacobi partial differential equations [101], [100], [91], [79], [70], [104], [86], [71], [65],[4]. It arises in asymptotic analysis (WKB asymptotics [90], [91], [79], large deviation asymptotics [99], or zero temperature asymptotics in statistical physics [54]), since max-plus algebra appears as a limit of the usual algebra. The theory of max-plus linear operators may be thought of as a part of the non-linear Perron-Frobenius theory, or of the theory of nonexpansive or monotone operators on cones [80], [95], [88], [44], a theory with numerous motivations, including mathematical economy [94] and game theory [102], [37]. In the discrete event systems community, max-plus algebra has been much studied



since it allows one to represent linearly the synchronisation phenomena which determine the time behaviour of manufacturing systems and networks, see [6]. Recent developments include the network calculus of [53], [48] which allows one to compute worst case bounds for certain measures of quality of service. In theoretical computer science, max-plus algebra (or rather, the tropical semiring) played a key role in the solution of decision problems in automata theory [105], [76], [106], [81], [97]. We finally note for information that max-plus algebra has recently arisen in algebraic geometry [69], [109], [92], [108] and in representation theory [67], [46], under the names of tropical geometry and combinatorics.

We now describe in more details some parts of the subject directly related to our interests, like optimal control, asymptotics, and discrete event systems.

### 3.2. Algèbre max-plus, programmation dynamique, et commande optimale/Max-plus algebra, dynamic programming, and optimal control

L'exemple le plus simple d'un problème conduisant à une équation min-plus linéaire est le problème classique du plus court chemin. Considérons un graphe dont les nœuds sont numérotés de 1 à  $n$  et dont le coût de l'arc allant du nœud  $i$  au nœud  $j$  est noté  $M_{ij} \in \mathbb{R} \cup \{+\infty\}$ . Le coût minimal d'un chemin de longueur  $k$ , allant de  $i$  à  $j$ , est donné par la quantité:

$$v_{ij}(k) = \min_{\ell: \ell_0=i, \ell_k=j} \sum_{r=0}^{k-1} M_{\ell_r, \ell_{r+1}}, \quad (1)$$

où le minimum est pris sur tous les chemins  $\ell = (\ell_0, \dots, \ell_k)$  de longueur  $k$ , de nœud initial  $\ell_0 = i$  et de nœud final  $\ell_k = j$ . L'équation classique de la programmation dynamique s'écrit:

$$v_{ij}(k) = \min_{1 \leq s \leq n} (M_{is} + v_{sj}(k-1)). \quad (2)$$

On reconnaît ainsi une équation linéaire min-plus :

$$v(k) = Mv(k-1), \quad (3)$$

où on note par la concaténation le produit matriciel induit par la structure de l'algèbre min-plus. Le classique *problème de Lagrange* du calcul des variations,

$$v(x, T) = \inf_{X(\cdot), X(0)=x} \int_0^T L(X(t), \dot{X}(t)) dt + \varphi(X(T)), \quad (4)$$

où  $X(t) \in \mathbb{R}^n$ , pour  $0 \leq t \leq T$ , et  $L: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  est le Lagrangien, peut être vu comme une version continue de (1), ce qui permet de voir l'équation d'Hamilton-Jacobi que vérifie  $v$ ,

$$v(\cdot, 0) = \varphi, \quad \frac{\partial v}{\partial T} + H(x, \frac{\partial v}{\partial x}) = 0, \quad H(x, p) = \sup_{y \in \mathbb{R}^n} (-p \cdot y - L(x, y)), \quad (5)$$

comme une équation min-plus linéaire. En particulier, les solutions de (5) vérifient un principe de superposition min-plus: si  $v$  et  $w$  sont deux solutions, et si  $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$ ,  $\inf(\lambda + v, \mu + w)$  est encore solution de (5). Ce point de vue, inauguré par Maslov, a conduit au développement de l'école d'Analyse Idempotente (voir [91], [79], [86]).

La présence d'une structure algébrique sous-jacente permet de voir les solutions stationnaires de (2) et (5) comme des vecteurs propres de la matrice  $M$  ou du semi-groupe d'évolution de l'équation d'Hamilton-Jacobi. La valeur propre associée fournit le coût moyen par unité de temps (coût ergodique). La représentation des vecteurs propres (voir [101], [110], [61], [72], [58], [43], [6] pour la dimension finie, et [91], [79] pour la dimension infinie) est intimement liée au théorème de l'autoroute qui décrit les trajectoires optimales quand

la durée ou la longueur des chemins tend vers l'infini. Pour l'équation d'Hamilton-Jacobi, des résultats reliés sont apparus récemment en théorie d'"Aubry-Mather" [65].

### English version

The most elementary example of a problem leading to a min-plus linear equation is the classical shortest path problem. Consider a graph with nodes  $1, \dots, n$ , and let  $M_{ij} \in \mathbb{R} \cup \{+\infty\}$  denote the cost of the arc from node  $i$  to node  $j$ . The minimal cost of a path of a given length,  $k$ , from  $i$  to  $j$ , is given by (1), where the minimum is taken over all paths  $\ell = (\ell_0, \dots, \ell_k)$  of length  $k$ , with initial node  $\ell_0 = i$  and final node  $\ell_k = j$ . The classical dynamic programming equation can be written as in (2). We recognise the min-plus linear equation (3), where concatenation denotes the matrix product induced by the min-plus algebraic structure. The classical *Lagrange problem* of calculus of variations, given by (4) where  $X(t) \in \mathbb{R}^n$ , for  $0 \leq t \leq T$ , and  $L : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  is the Lagrangian, may be thought of as a continuous version of (1), which allows us to see the Hamilton-Jacobi equation (5) satisfied by  $v$ , as a min-plus linear equation. In particular, the solutions of (5) satisfy a min-plus superposition principle: if  $v$  and  $w$  are two solutions, and if  $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$ , then  $\inf(\lambda + v, \mu + w)$  is also a solution of (5). This point of view, due to Maslov, led to the development of the school of Idempotent Analysis (see [91], [79], [86]).

The underlying algebraic structure allows one to see stationary solutions of (2) and (5) as eigenvectors of the matrix  $M$  or of the evolution semigroup of the Hamilton-Jacobi equation. The associated eigenvalue gives the average cost per time unit (ergodic cost). The representation of eigenvectors (see [101], [110], [72], [58], [61], [43], [6] for the finite dimension case, and [91], [79] for the infinite dimension case) is intimately related to turnpike theorems, which describe optimal trajectories as the horizon, or path length, tends to infinity. For the Hamilton-Jacobi equation, related results have appeared recently in the "Aubry-Mather" theory [65].

### 3.3. Applications monotones et théorie de Perron-Frobenius non-linéaire, ou l'approche opératorielle du contrôle optimal et des jeux/Monotone maps and non-linear Perron-Frobenius theory, or the operator approach to optimal control and games

On sait depuis le tout début des travaux en décision markovienne que les opérateurs de la programmation dynamique  $f$  de problèmes de contrôle optimal ou de jeux (à somme nulle et deux joueurs), avec critère additif, ont les propriétés suivantes :

$$\begin{array}{ll} \text{monotonie/monotonicity} & x \leq y \Rightarrow f(x) \leq f(y), \\ \text{contraction/nonexpansiveness} & \|f(x) - f(y)\|_\infty \leq \|x - y\|_\infty. \end{array} \quad (6)$$

Ici, l'opérateur  $f$  est une application d'un certain espace de fonctions à valeurs réelles dans lui-même,  $\leq$  désigne l'ordre partiel usuel, et  $\|\cdot\|_\infty$  désigne la norme sup. Dans le cas le plus simple, l'ensemble des états est  $\{1, \dots, n\}$  et  $f$  est une application de  $\mathbb{R}^n$  dans lui-même. Les applications monotones qui sont contractantes pour la norme du sup peuvent être vues comme des généralisations non-linéaires des matrices sous-stochastiques. Une sous-classe utile, généralisant les matrices stochastiques, est formée des applications qui sont monotones et commutent avec l'addition d'une constante [60] (celles ci sont parfois appelées fonctions topicales). Les problèmes de programmation dynamique peuvent être traduits en termes d'opérateurs : l'équation de la programmation dynamique d'un problème de commande optimale à horizon fini s'écrit en effet  $x(k) = f(x(k-1))$ , où  $x(k)$  est la fonction valeur en horizon  $k$  et  $x(0)$  est donné; la fonction valeur  $y$  d'un problème à horizon infini (y compris le cas d'un problème d'arrêt optimal) vérifie  $y = f(y)$ ; la fonction valeur  $z$  d'un problème avec facteur d'actualisation  $0 < \alpha < 1$  vérifie  $z = f(\alpha z)$ , etc. Ce point de vue abstrait a été très fructueux, voir par exemple [37]. Il permet d'inclure la programmation dynamique dans la perspective plus large de la théorie de Perron-Frobenius non-linéaire, qui, depuis l'extension du théorème de Perron-Frobenius par Krein et Rutman, traite des applications non linéaires sur des cônes vérifiant

des conditions de monotonie, de contraction ou d'homogénéité. Les problèmes auxquels on s'intéresse typiquement sont la structure de l'ensemble des points fixes de  $f$ , le comportement asymptotique de  $f^k$ , en particulier l'existence de la limite de  $f^k(x)/k$  lorsque  $k$  tends vers l'infini (afin d'obtenir le coût ergodique d'un problème de contrôle optimal ou de jeux), l'asymptotique plus précise de  $f^k$ , à une normalisation près (afin d'obtenir le comportement précis de l'itération sur les valeurs), etc. Nous renvoyons le lecteur à [95] pour un panorama. Signalons que dans [68],[7], des algorithmes inspirés de l'algorithme classique d'itérations sur les politiques du contrôle stochastique ont pu être introduits dans le cas des opérateurs monotones contractants généraux, en utilisant des résultats de structure de l'ensemble des points fixes de ces opérateurs. Les applications de la théorie des applications monotones contractantes ne se limitent pas au contrôle optimal et aux jeux. En particulier, on utilise la même classe d'applications dans la modélisation des systèmes à événements discrets, voir le §3.5 ci-dessous, et une classe semblable d'applications en analyse statique de programmes, voir le §6.7 ci-dessous.

### English version

Since the very beginning of Markov decision theory, it has been observed that dynamic programming operators  $f$  arising in optimal control or (zero-sum, two players) game problems have Properties (6). Here, the operator  $f$  is a self-map of a certain space of real valued functions, equipped with the standard ordering  $\leq$  and with the sup-norm  $\|\cdot\|_\infty$ . In the simplest case, the set of states is  $\{1, \dots, n\}$ , and  $f$  is a self-map of  $\mathbb{R}^n$ . Monotone maps that are nonexpansive in the sup norm may be thought of as nonlinear generalisations of substochastic matrices. A useful subclass, which generalises stochastic matrices, consists of those maps which are monotone and commute with the addition of a constant [60] (these maps are sometimes called topical functions). Dynamic programming problems can be translated in operator terms: the dynamic programming equation for a finite horizon problem can be written as  $x(k) = f(x(k-1))$ , where  $x(k)$  is the value function in horizon  $k$  and  $x(0)$  is given; the value function  $y$  of a problem with an infinite horizon (including the case of optimal stopping) satisfies  $y = f(y)$ ; the value function  $z$  of a problem with discount factor  $0 < \alpha < 1$  satisfies  $z = f(\alpha z)$ , etc. This abstract point of view has been very fruitful, see for instance [37]. It allows one to put dynamic programming in the wider perspective of nonlinear Perron-Frobenius theory, which, after the extension of the Perron-Frobenius theorem by Krein and Rutman, studies non-linear self-maps of cones, satisfying various monotonicity, nonexpansiveness, and homogeneity conditions. Typical problems of interests are the structure of the fixed point set of  $f$ , the asymptotic behaviour of  $f^k$ , including the existence of the limit of  $f^k(x)/k$  as  $k$  tends to infinity (which yields the ergodic cost in control or games problems), the finer asymptotic behaviour of  $f^k$ , possibly up to a normalisation (which yields precise results on value iteration), etc. We shall not attempt to survey this theory here, and will only refer the reader to [95] for more background. In [68],[7], algorithms inspired from the classical policy iterations algorithm of stochastic control have been introduced for general monotone nonexpansive operators, using structural results for the fixed point set of these operators. Applications of monotone or nonexpansive maps are not limited to optimal control and game theory. In particular, we also use the same class of maps as models of discrete event dynamics systems, see §3.5 below, and we shall see in §6.7 that related classes of maps are useful in the static analysis of computer programs.

## 3.4. Processus de Bellman/Bellman processes

Un autre point de vue sur la commande optimale est la théorie des *processus de Bellman* [100], [93], [62], [4], [1], qui fournit un analogue max-plus de la théorie des probabilités. Cette théorie a été développée à partir de la notion de *mesure idempotente* introduite par Maslov [90]. Elle établit une correspondance entre probabilités et optimisation, dans laquelle les variables aléatoires deviennent des variables de coût (qui permettent de paramétrer les problèmes d'optimisation), la notion d'espérance conditionnelle est remplacée par celle de coût conditionnel (pris sur un ensemble de solutions faisables), la propriété de Markov correspond au principe de la programmation dynamique de Bellman, et la convergence faible à une convergence de type épigraphe. Les théorèmes limites pour les processus de Bellman (loi des grands nombres, théorème de la

limite centrale, lois stables) fournissent des résultats asymptotiques en commande optimale. Ces résultats généraux permettent en particulier de comprendre qualitativement les difficultés d'approximation des solutions d'équations d'Hamilton-Jacobi, voir le §6.6 ci-dessous.

#### *English version*

Another point of view on optimal control is the theory of *Bellman processes* [100], [93], [62],[4], [1] which provides a max-plus analogue of probability theory, relying on the theory of *idempotent measures* due to Maslov [90]. This establishes a correspondence between probability and optimisation, in which random variables become cost variables (which allow to parametrise optimisation problems), the notion of conditional expectation is replaced by a notion of conditional cost (taken over a subset of feasible solutions), the Markov property corresponds to the Bellman's dynamic programming principle, and weak convergence corresponds to an epigraph-type convergence. Limit theorems for Bellman processes (law of large numbers, central limit theorems, stable laws) yield asymptotic results in optimal control. Such general results help in particular to understand qualitatively the difficulty of approximation of Hamilton-Jacobi equations, see §6.6 below.

### 3.5. Systèmes à événements discrets/Discrete event systems

Des systèmes dynamiques max-plus linéaires, de type (2), interviennent aussi, avec une interprétation toute différente, dans la modélisation des systèmes à événements discrets. Dans ce contexte, on associe à chaque tâche répétitive,  $i$ , une fonction *compteur*,  $v_i : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{N}$ , telle que  $v_i(t)$  compte le nombre cumulé d'occurrences de la tâche  $i$  jusqu'à l'instant  $t$ . Par exemple, dans un système de production,  $v_i(t)$  compte le nombre de pièces d'un certain type produites jusqu'à l'instant  $t$ . Dans le cas le plus simple, qui dans le langage des réseaux de Petri, correspond à la sous-classe très étudiée des graphes d'événements temporisés [55], on obtient des équations min-plus linéaires analogues à (2). Cette observation, ou plutôt, l'observation duale faisant intervenir des fonctions dateurs, a été le point de départ [58] de l'approche max-plus des systèmes à événements discrets [6], qui fournit un analogue max-plus de la théorie des systèmes linéaires classiques, incluant les notions de représentation d'état, de stabilité, de séries de transfert, etc. En particulier, les valeurs propres fournissent des mesures de performance telles que le taux de production. Des généralisations non-linéaires, telles que les systèmes dynamiques min-max [96], [75], ont aussi été étudiées. Les systèmes dynamiques max-plus linéaires aléatoires sont particulièrement utiles dans la modélisation des réseaux [42]. Les modèles d'automates à multiplicités max-plus [10], incluant certaines versions temporisées des modèles de traces ou de tas de pièces [13], permettent de représenter des phénomènes de concurrence ou de partage de ressources. Les automates à multiplicités max-plus ont été très étudiés par ailleurs en informatique théorique [105], [76], [85], [106], [81], [97]. Ils fournissent des modèles particulièrement adaptés à l'analyse de problèmes d'ordonnancement [84].

#### *English version*

Dynamical systems of type (2) also arise, with a different interpretation, in the modelling of discrete event systems. In this context, one associates to every repetitive task,  $i$ , a counter function,  $v_i : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{N}$ , such that  $v_i(t)$  gives the total number of occurrences of task  $i$  up to time  $t$ . For instance, in a manufacturing system,  $v_i(t)$  will count the number of parts of a given type produced up to time  $t$ . In the simplest case, which, in the vocabulary of Petri nets, corresponds to the much studied subclass of timed event graphs [55], we get min-plus linear equations similar to (2). This observation, or rather, the dual observation concerning dater functions, was the starting point [58] of the max-plus approach of discrete event systems [6], which provides some analogue of the classical linear control theory, including notions of state space representations, stability, transfer series, etc. In particular, eigenvalues yield performance measures like the throughput. Nonlinear generalisations, like min-max dynamical systems [96], [75], have been particularly studied. Random max-plus linear dynamical systems are particularly useful in the modelling of networks [42]. Max-plus automata models [10], which include some timed version of trace or heaps of pieces models [13], allow to represent phenomena of concurrency or resource

sharing. Note that max-plus automata have been much studied in theoretical computer science [105], [76], [85], [106], [81], [97]. Such automata models are particularly adapted to the analysis of scheduling problems [84].

### 3.6. Algèbre linéaire max-plus/Basic max-plus algebra

Une bonne partie des résultats de l'algèbre max-plus concerne l'étude des systèmes d'équations linéaires. On peut distinguer trois familles d'équations, qui sont traitées par des techniques différentes : 1) Nous avons déjà évoqué dans les sections 3.2 et 3.3 le problème spectral max-plus  $Ax = \lambda x$  et ses généralisations. Celui-ci apparaît en contrôle optimal déterministe et dans l'analyse des systèmes à événements discrets. 2) Le problème  $Ax = b$  intervient en commande juste-à-temps (dans ce contexte, le vecteur  $x$  représente les dates de démarrage des tâches initiales,  $b$  représente certaines dates limites, et on se contente souvent de l'inégalité  $Ax \leq b$ ). Le problème  $Ax = b$  est intimement lié au problème d'affectation optimale, et plus généralement au problème de transport optimal. Il se traite via la théorie des correspondances de Galois abstraites, ou théorie de la résiduation [64], [47], [110], [112],[6]. Les versions dimension infinie du problème  $Ax = b$  sont reliées aux questions d'analyse convexe abstraite [107], [103],[17] et de dualité non convexe. 3) Le problème linéaire général  $Ax = Bx$  conduit à des développements combinatoires intéressants (polyèdres max-plus, déterminants max-plus, symétrisation [74], [98],[6]). Le sujet fait l'objet d'un intérêt récemment renouvelé [63].

#### *English version*

An important class of results in max-plus algebra concerns the study of max-plus linear equations. One can distinguish three families of equations, which are handled using different techniques: 1) We already mentioned in sections 3.2 and 3.3 the max-plus spectral problem  $Ax = \lambda x$  and its generalisations, which appears in deterministic optimal control and in performance analysis of discrete event systems. 2) The  $Ax = b$  problem arises naturally in just in time problems (in this context, the vector  $x$  represents the starting times of initial tasks,  $b$  represents some deadlines, and one is often content with the inequality  $Ax \leq b$ ). The  $Ax = b$  problem is intimately related with optimal assignment, and more generally, with optimal transportation problems. Its theory relies on abstract Galois correspondences, or residuation theory [64], [47], [110], [112],[6]. Infinite dimensional versions of the  $Ax = b$  problem are related to questions of abstract convex analysis [107], [103],[17] and nonconvex duality. 3) The general linear system  $Ax = Bx$  leads to interesting combinatorial developments (max-plus polyhedra, determinants, symmetrisation [74], [98],[6]). The subject has attracted recently a new attention [63].

### 3.7. Algèbre max-plus et asymptotiques/Using max-plus algebra in asymptotic analysis

Le rôle de l'algèbre min-plus dans les problèmes asymptotiques est évident si l'on écrit

$$\epsilon^a + \epsilon^b \approx \epsilon^{\min(a,b)}, \quad \epsilon^a \times \epsilon^b = \epsilon^{a+b}, \quad (7)$$

lorsque  $\epsilon \rightarrow 0^+$ . L'algèbre min-plus peut être vue comme la limite d'une déformation de l'algèbre classique, en introduisant le semi-anneau  $\mathbb{R}_\epsilon$ , qui est l'ensemble  $\mathbb{R} \cup \{+\infty\}$ , muni de l'addition  $(a, b) \mapsto -\epsilon \log(e^{-a/\epsilon} + e^{-b/\epsilon})$  et de la multiplication  $(a, b) \mapsto a + b$ . Pour tout  $\epsilon > 0$ ,  $\mathbb{R}_\epsilon$  est isomorphe au semi-corps usuel des réels positifs,  $(\mathbb{R}_+, +, \times)$ , mais pour  $\epsilon = 0^+$ ,  $\mathbb{R}_\epsilon$  n'est autre que le semi-anneau min-plus. Cette idée a été introduite par Maslov [90], motivé par l'étude des asymptotiques de type WKB d'équations de Schrödinger. Ce point de vue permet d'utiliser des résultats algébriques pour résoudre des problèmes d'asymptotiques, puisque les équations limites ont souvent un caractère min-plus linéaire.

La même déformation apparaît classiquement en théorie des grandes déviations à la loi des grands nombres : dans ce contexte, les objets limites sont des mesures idempotentes au sens de Maslov. Voir [1], [99] pour les relations entre l'algèbre max-plus et les grandes déviations. Voir aussi [2], [38] pour des applications de ces idées aux perturbations singulières de valeurs propres.

*English version*

The role of min-plus algebra in asymptotic problems becomes obvious when writing Equations (7) when  $\epsilon \rightarrow 0^+$ . Formally, min-plus algebra may be thought of as the limit of a deformation of classical algebra, by introducing the semi-field  $\mathbb{R}_\epsilon$ , which is the set  $\mathbb{R} \cup \{+\infty\}$ , equipped with the addition  $(a, b) \mapsto -\epsilon \log(e^{-a/\epsilon} + e^{-b/\epsilon})$  and the multiplication  $(a, b) \mapsto a + b$ . For all  $\epsilon > 0$ ,  $\mathbb{R}_\epsilon$  is isomorphic to the semi-field of usual real positive numbers,  $(\mathbb{R}_+, +, \times)$ , but for  $\epsilon = 0^+$ ,  $\mathbb{R}_\epsilon$  coincides with the min-plus semiring. This idea was introduced by Maslov [90], motivated by the study of WKB-type asymptotics of Schrödinger equations. This point of view allows one to use algebraic results in asymptotics problems, since the limit equations have often some kind of min-plus linear structure.

The same deformation appears classically in large deviation theory: in this context, the limiting objects are idempotent measures, in the sense of Maslov. See [1], [99] for the relation between max-plus algebra and large deviations. See also [2], [38] for the application of such ideas to singular perturbation problems for matrix eigenvalues.

## 4. Application Domains

### 4.1. Systèmes à événements discrets (productique, réseaux)/Discrete event systems (manufacturing systems, networks)

Une partie importante des applications de l'algèbre max-plus provient des systèmes dynamiques à événements discrets [6]. Les systèmes linéaires max-plus, et plus généralement les systèmes dynamiques monotones contractants, fournissent des modèles naturels dont les résultats analytiques peuvent être appliqués aux problèmes d'évaluation de performance. Relèvent de l'approche max-plus, tout au moins sous forme simplifiée : des problèmes de calcul de temps de cycle pour des circuits digitaux [50], des problèmes de calcul de débit pour des ateliers [77], pour des réseaux ferroviaires [49] ou routiers, et l'évaluation de performance des réseaux de communication [42]. L'approche max-plus a été appliquée à l'analyse du comportement temporel de systèmes concurrents, et en particulier à l'analyse de "high level sequence message charts" [45], [83]. Le projet Maxplus collabore avec le projet Metalau, qui étudie particulièrement les applications des modèles max-plus à la modélisation microscopique du trafic routier [89], [87],[26].

*English version*

One important part of applications of max-plus algebra comes from discrete event dynamical systems [6]. Max-plus linear systems, and more generally, monotone nonexpansive dynamical systems, provide natural models for which many analytical results can be applied to performance evaluation problems. For instance, problems like computing the cycle time of asynchronous digital circuits [50], or computing the throughput of a workshop [77] or of a transportation network, and performance evaluation problems for communication networks, are often amenable to max-plus algebra, at least in some simplified form, see in particular [49] and [42]. The max-plus approach has been applied to the analysis of the time behaviour of concurrent systems, and in particular, to the analysis of high level sequence message charts [45], [83]. The Maxplus team collaborates with the Metalau team, working particularly on the applications of max-plus models to the microscopic modelling of road traffic [89], [87],[26].

### 4.2. Commande optimale et jeux/Optimal control and games

La commande optimale et la théorie des jeux ont de nombreuses applications bien répertoriées: économie, finance, gestion de stock, optimisation des réseaux, aide à la décision, etc. En particulier, le projet Mathfi travaille sur les applications à des problèmes de mathématiques financières. Il existe une tradition de collaborations entre les chercheurs des projets Mathfi et Maxplus sur ces questions, voir par exemple [5] qui comprend un résultat exploitant des idées de théorie spectrale non-linéaire, présentées dans [3].

*English version*

Optimal control and game theory have numerous well established applications fields: mathematical economy and finance, stock optimization, optimization of networks, decision making, etc. In particular, the Mathfi team works on applications in mathematical finance. There is a tradition of collaboration between researchers of the Maxplus team and of the Mathfi team on these questions, see as an illustration [5] where ideas from the spectral theory of monotone homogeneous maps [3] are applied.

**4.3. Recherche opérationnelle/Operations research**

L'algèbre max-plus intervient de plusieurs manières en Recherche opérationnelle. Premièrement, il existe des liens profonds entre l'algèbre max-plus et les problèmes d'optimisation discrète, voir [51]. Ces liens conduisent parfois à de nouveaux algorithmes pour les problèmes de recherche opérationnelle classiques, comme le problème de circuit de poids moyen maximum [57]. Certains problèmes combinatoires, comme des problèmes de programmation disjonctive, peuvent être décomposés par des méthodes de type max-plus [111]. Ensuite, le rôle de l'algèbre max-plus dans les problèmes d'ordonnement est bien connu depuis les années 60, les dates de complétion pouvant souvent être calculées à partir d'équations linéaires max-plus. Plus récemment, des représentations de problèmes d'ordonnement ont pu être obtenues à partir de semi-groupes de matrices max-plus : une première représentation a été obtenue dans [13] pour le cas du "jobshop", une représentation plus simple a été obtenue dans [84] dans le cas du "flowshop". Ce point de vue algébrique a été très utile dans le cas du "flowshop" : il permet de retrouver des résultats anciens de dominance et d'obtenir ainsi de nouvelles bornes [84]. Finalement, en regardant l'algèbre max-plus comme une limite de l'algèbre classique, on peut utiliser des outils algébriques en optimisation combinatoire [82].

*English version*

Max-plus algebra arise in several ways in Operations Research. First, there are intimate relations between max-plus algebra and discrete optimisation problems, see [51]. Sometimes, these relations lead to new algorithms for classical Operations Research problems, like the maximal circuit mean [57]. There are also special combinatorial problems, like certain problems of disjunctive programming, which can be decomposed by max-plus type methods [111]. Next, the role of max-plus algebra in scheduling problems has been known since the sixties: completion dates can often be computed by max-plus linear equations. Recently, representations of certain scheduling problems using max-plus matrix semigroups have appeared, a first representation was given in [13] for the jobshop case, a simpler representation was given in [84] in the flowshop case. This algebraic point of view turned out to be particularly fruitful in the flowshop case: it allows one to recover old dominance results and to obtain new bounds [84]. Finally, viewing max-plus algebra as a limit of classical algebra allows to use algebraic tools in combinatorial optimisation [82].

**4.4. Analyse statique de programmes/Static analysis of computer programs**

Les techniques d'analyse statique de programme par interprétation abstraite permettent de déterminer automatiquement des invariants en résolvant de "gros" problèmes de points fixes dans des treillis, comme par exemple des treillis d'intervalles. Ces problèmes sont justiciables de la théorie des opérateurs monotones et des algorithmes déjà évoqués dans la section 3.3. Voir la section 6.7 ci-dessous.

*English version*

Static analysis techniques via abstract interpretation allow to compute invariants of programs by solving large fixed points problems for monotone self-maps of lattices. The theory of monotone operators already reviewed in § 3.3, and the related algorithms, can be applied to such problems, see § 6.7 below.

## 4.5. Autres applications/Other applications

L'algèbre max-plus apparaît de manière naturelle dans le calcul de scores de similitudes dans la comparaison de séquences génétiques. Voir par exemple [59].

### *English version*

Max-plus algebra arises naturally in the computation of similarity scores, in biological sequence comparison. See for instance [59].

## 5. Software

### 5.1. Boîte à outil Maxplus de SCILAB/Maxplus toolbox of Scilab

Trois chercheurs du groupe (S. Gaubert, J.-P. Quadrat, et G. Cohen) ont développé (à partir d'une première version réalisée par M. Mc Gettrick) la *boîte à outils Maxplus* de Scilab, qui est **téléchargeable librement** parmi les contributions du site **Scilab**. Cette boîte à outils implémente l'ensemble du calcul numérique linéaire max-plus, elle comprend en particulier le stockage creux des matrices, et des algorithmes efficaces pour le calcul de la valeur propre basées sur les itérations sur les politiques. Elle a été utilisée par plusieurs chercheurs extérieurs au groupe, en particulier dans [41], [83]. Il faut aussi noter que le groupe de L. Hardouin, du LISA/Istia, a complété la boîte à outils Maxplus en interfaçant leur propre **librairie** C++, qui permet le calcul des séries de transfert de graphes d'événements temporisés.

### *English version*

Three researchers of the team (S. Gaubert, J.-P. Quadrat, and G. Cohen, building on a preliminary version of M. McGettrick) have developed and released the *Maxplus toolbox* of Scilab, which is freely **available** among the contributions on the **Scilab** web site. It implements all basic linear algebra functionalities, with a special attention to large sparse matrices, including efficient algorithms for eigenvalue computation based on policy iteration. The software has been used by several researchers in their work, including [41], [83]. It should be noted that the team of L. Hardouin, from LISA/Istia, has completed the toolbox by interfacing their own C++ **library** allowing to compute transfer series of timed event graphs.

### 5.2. Solveurs numériques d'équations de Hamilton-Jacobi/Numerical solution of Hamilton-Jacobi equations

Dans son travail de thèse, Asma Lakhoua développe des programmes en Scilab et C, exploitant la boîte à outils Maxplus de Scilab, implémentant de nouvelles discrétisations des équations d'Hamilton-Jacobi correspondant aux problèmes de contrôle optimal déterministe, voir le §6.6 ci-dessous.

### *English version*

Asma Lakhoua is developing, as part of her PhD thesis work, programs in Scilab and C, exploiting the Max-plus toolbox, allowing to test max-plus discretisation schemes for Hamilton-Jacobi equations corresponding to deterministic optimal control problems, see §6.6 below.

## 6. New Results

### 6.1. Théorie spectrale max-plus/Max-plus spectral theory

#### 6.1.1. Introduction

On s'intéresse au problème spectral max-plus



$$\sup_{y \in S} a(x, y) + u(y) = \lambda + u(x), \quad \forall x \in S, \quad (8)$$

dans lequel le noyau  $a : S \times S \rightarrow \mathbb{R} \cup \{-\infty\}$  est donné. On cherche le vecteur propre  $u : S \rightarrow \mathbb{R} \cup \{-\infty\}$  et la valeur propre correspondante  $\lambda \in \mathbb{R} \cup \{-\infty\}$ . En programmation dynamique, l'ensemble  $S$  est l'espace des états, et l'application  $a(x, y)$  fournit le gain associé à la transition  $x \rightarrow y$ . Comme nous l'avons rappelé dans le §3.2 et le §3.3, le problème spectral (8) intervient en contrôle ergodique. Le cas où  $S$  est fini est classique, l'on a alors un résultat précis de représentation de l'espace propre, à l'aide d'un certain graphe, dit graphe critique. Des résultats existent également lorsque  $S$  est compact et que le noyau vérifie certaines propriétés de régularité ou certaines conditions géométriques. Le cas d'un ensemble  $S$  non compact n'a pas été beaucoup étudié jusqu'ici.

#### *English version*

We study the max-plus spectral equation (8), where the kernel  $a : S \times S \rightarrow \mathbb{R} \cup \{-\infty\}$  is given, and the eigenvector  $u : S \rightarrow \mathbb{R} \cup \{-\infty\}$  and the eigenvalue  $\lambda \in \mathbb{R} \cup \{-\infty\}$  are unknown. In dynamic programming applications, the set  $S$  is the *state space*, and the map  $a(x, y)$  is the *transition reward*. As we recalled in §3.2 and §3.3, this spectral problem arises in ergodic optimal control. The case where  $S$  is non-compact has not been much studied.

### 6.1.2. *Théorie spectrale max-plus dénombrable/Denumerable max-plus spectral theory*

**Participants:** M. Akian, S. Gaubert, C. Walsh.

Dans [18], nous avons obtenu des résultats généraux de théorie spectrale dans le cas où  $S$  est dénombrable. Nous montrons aussi un résultat de représentation de l'espace propre et un résultat de cyclicité semblables au cas où  $S$  est fini, sous une hypothèse de tension, qui traduit le fait que les trajectoires optimales ne partent pas à l'infini.

#### *English version*

We develop in [18] general results of spectral theory when  $S$  is denumerable. We show that under a tightness condition, many of the results of the finite dimensional theory (representation of the eigenspace, ultimate periodicity of orbits) carry over.

### 6.1.3. *La frontière de Martin max-plus/The max-plus Martin boundary*

**Participants:** M. Akian, S. Gaubert, C. Walsh.

Lorsque  $\lambda = 0$ , l'équation (8) a une analogie évidente avec l'équation définissant les fonctions harmoniques en théorie (classique ou probabiliste) du potentiel. Dans [18], [33], nous avons introduit l'analogie max-plus de la frontière de Martin, et obtenu un analogue de la formule de représentation de Poisson des fonctions harmoniques : toute solution  $u$  de (8) peut être représentée sous la forme :

$$u = \sup_{w \in \mathcal{M}_m} w + \mu_u(w), \quad (9)$$

où  $\mathcal{M}_m \subset (\mathbb{R} \cup \{-\infty\})^S$  est l'analogie max-plus de la frontière de Martin minimale (l'ensemble des fonctions harmoniques extrémales normalisées), et où  $\mu_u$  est une fonction semi-continue supérieurement à valeurs dans  $\mathbb{R} \cup \{-\infty\}$ , jouant le rôle de la mesure spectrale. Nous avons montré que les éléments de l'espace de Martin minimal peuvent être caractérisés comme les limites de certaines (quasi) géodésiques. La frontière de Martin max-plus généralise dans une certaine mesure la frontière d'un espace métrique construite à partir des horofonctions (fonctions de Busemann généralisées).

Nous appliquons aussi nos résultats à la résolution de certains problèmes de contrôle à temps continu, qui sont reliés aux équations d'Hamilton-Jacobi invariantes en espace. Nous étudions maintenant le cas de semi-groupes à temps continu d'opérateurs max-plus linéaires non invariantes en espace, le but étant en particulier d'obtenir des résultats de représentation des solutions pour des problèmes avec Lagrangien non régulier.

#### *English version*

When  $\lambda = 0$ , the equation (8) has an obvious analogy with the equation defining harmonic functions in classical or probabilistic potential theory. We have introduced in [18], [33] a max-plus analogue of the classical Martin boundary, and obtained an analogue of the Poisson representation of harmonic functions, showing that any solution  $u$  of (8) may be represented as in (9) where  $\mathcal{M}_m \subset (\mathbb{R} \cup \{-\infty\})^S$  is a max-plus analogue of the minimal Martin boundary (the set of normalised extremal harmonic functions), and  $\mu_u$  is an upper semi-continuous map with values in  $\mathbb{R} \cup \{-\infty\}$  playing the role of the spectral measure. We shown that the elements of the minimal Martin boundary can be characterised as limits of certain (quasi) geodesics. We noted that the max-plus Martin boundary generalizes to some extent the boundary of metric spaces defined in terms of horofunctions (generalised Busemann functions).

We also apply our results to solve some continuous-time optimal control problems, which are themselves related to space-invariant Hamilton-Jacobi equations. We are now studying the case of continuous time semigroups of max-plus linear operators that are not space-invariant, with the aim in particular of representing solutions in the case of nonsmooth Lagrangians.

#### **6.1.4. Mesure représentative minimale/Minimum representing measure**

**Participant:** C. Walsh.

Dans [35], nous montrons que, pour toute fonction harmonique max-plus  $u$ , l'ensemble des fonctions semi-continues supérieurement  $\mu_u$  satisfaisant (9) a un plus petit élément. On peut voir cela comme un analogue de l'unicité de la représentation intégrale des fonctions harmoniques en théorie du potentiel. Comme cas particulier, nous obtenons que les fonctions "distance-like" d'un espace métrique s'expriment en terme de points de Busemann de la frontière définie par les horofonctions.

#### *English version*

In [35], we show that the set of upper semi-continuous maps  $\mu_u$  satisfying (9) for a given max-plus harmonic vector  $u$  has a least element. This may be viewed as an analogue of the uniqueness of the integral representation of harmonic functions in Potential Theory. As an application, it was shown how the distance-like functions of a metric space can be expressed in terms of the Busemann points of the horofunction boundary.

#### **6.1.5. La frontière d'espaces normés/The boundary of normed spaces**

**Participant:** C. Walsh.

Dans le contexte plus restrictif des espaces métriques, on trouve une notion similaire à la frontière de Martin max-plus : la frontière définie par les horofonctions. Récemment, cette frontière s'est avérée utile dans l'étude des fonctions contractantes au sens large. L'idée est que les points de la frontière peuvent être vus comme des "points à l'infini" et qu'en gros, les itérées d'une fonction contractante sans point fixe convergent vers un des points de la frontière. Il reste à calculer la frontière de Martin max-plus d'espaces métriques intéressants, afin d'en déduire des résultats sur les fonctions contractantes définies sur ces espaces.

Dans [36], on étudie la frontière de Martin max-plus d'espace vectoriels normés de dimension finie. En particulier, on détermine les points de la frontière de Martin minimale max-plus (points de Busemann). Comme cela a été montré dans [33], ces calculs sont utiles pour trouver les vecteurs propres des semi-groupes de Lax-Oleinik pour des lagrangiens de la forme  $\|x\|^p/p$ , où  $\|\cdot\|$  est une norme arbitraire et  $p > 1$ .

#### *English version*

A boundary similar to the max-plus Martin boundary has already been constructed for entirely different reasons in the more restrictive setting of metric spaces (the horofunction boundary). Recently, this boundary has been shown to be useful for studying the dynamics of non-expansive maps. The idea is that the points of the boundary are somehow “points at infinity” and that, roughly speaking, if the non-expansive map has no fixed point then its iterates must converge to one of these points. It remains to calculate the max-plus Martin boundary for interesting spaces and to fully work out the consequences for non-expansive maps acting on these spaces.

In [36] the max-plus Martin boundary was investigated for finite-dimensional normed spaces. In particular, the points of the minimal max-plus Martin boundary (Busemann points) were determined. As was shown in [33], these are relevant to finding the eigenvectors of Lax-Oleinik semigroups with Lagrangians such as  $\|x\|^p/p$ , with  $\|\cdot\|$  an arbitrary norm and  $p > 1$ .

## 6.2. L’approche opératorielle du contrôle optimal et des jeux/Operator approach to optimal control and games

### 6.2.1. Introduction

Comme indiqué dans le §3.3, les applications qui sont contractantes pour certaines métriques, ou qui vérifient certaines propriétés de monotonie ou d’homogénéité, jouent un rôle central en programmation dynamique. Nous étudions plusieurs problèmes concernant la description de l’ensemble des points fixes et le comportement itératif de ces applications.

#### *English version*

As detailed in §3.3, nonlinear maps that are nonexpansive in some metrics, or that satisfy monotonicity or homogeneity conditions, play a central role in dynamic programming. We have studied several problems concerning the description of the fixed points and of the dynamical behaviour of these maps.

### 6.2.2. Applications semi-différentiables contractantes au sens large/Semidifferentiable nonexpansive maps

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

Dans [32], 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 : une application  $f$ , d’un espace normé  $E$  dans un autre, est *semidifférentiable* si l’on peut écrire  $f(x+h) = f(x) + f'_x(h) + o(\|h\|)$ , où  $f'_x(h)$  est une application continue multiplicativement homogène. Cette notion est bien adaptée aux opérateurs de programmation dynamique associés à des problèmes de contrôle optimal ou de jeux, au moins lorsque l’espace d’état est lui même fini. Dans le cas différentiable, des résultats antérieurs de R. Nussbaum montrent que l’unicité du vecteur propre de  $f$ , à une normalisation près, peut être contrôlée à l’aide de résultats d’unicité pour la dérivée  $f'_v$ , évaluée en un vecteur propre quelconque  $v$ . Nous montrons qu’il en est de même lorsque  $f$  est semi-différentiable, et obtenons par exemple comme application des résultats d’unicité pour la solution d’équations de programmation dynamique stationnaires, ou ergodiques, associées à certains problèmes de jeux répétés. Nous établissons également des résultats généraux sur les rayons spectraux d’applications non linéaires monotones, conduisant à des résultats de convergence géométrique pour l’itération sur les valeurs, avec un contrôle explicite du taux de convergence.

#### *English version*

A natural idea to study the uniqueness of a fixed point  $u$  of a map  $f$  is to use the derivative of  $f$  at point  $u$ , but if  $f$  is the dynamic programming operator of a game or of a control problem, this derivative need not exist since  $f$  may be piecewise affine. However,  $f$  turns out, at least in the finite dimension case, to be semidifferentiable, meaning that  $f$  has one-sided directional derivatives and that the limits defining these derivatives are uniform

in the direction. We show in [32] that, under rather general circumstances, the uniqueness of the fixed point of the semiderivative of a nonexpansive map, taken at any fixed point  $u$ , implies that the map itself has a unique fixed point. We obtain similar results for nonlinear eigenproblems. We also establish general properties of spectral radii of monotone non linear maps from which we derive geometric convergence results for value iterations with an explicit estimate of the convergence rate.

### 6.2.3. *Applications monotones convexes contractantes au sens large/Monotone convex nonexpansive maps*

**Participants:** M. Akian, S. Gaubert, B. Lemmens (Warwick University, UK).

Dans [3] nous avons caractérisé l'espace propre d'applications monotones additivement homogènes convexes de  $\mathbb{R}^n$  dans lui-même. Dans [30], nous généralisons ces résultats au cas d'applications qui ne sont pas nécessairement homogènes. Nous étudions en particulier la géométrie de l'ensemble des points fixes stables du système dynamique associé à de telles applications et donnons des conditions sous lesquelles ce système dynamique a un unique point fixe stable. Nous étudions aussi les points périodiques stables et leur période.

#### *English version*

In [3], we characterised the eigenspace of monotone, additively homogeneous and convex maps from  $\mathbb{R}^n$  to itself. In [30], we generalize these results to the case of those maps that are not additively homogeneous. In particular, we study the geometry of the stable fixed point set of the underlying dynamical system and provide conditions under which this system has a unique stable fixed point. We also analyse the stable periodic points and their period.

### 6.2.4. *Algorithmes d'itération sur les politiques pour les jeux répétés avec gain moyen/Policy iteration algorithm for repeated games with mean payoff*

**Participants:** J. Cochet-Terrasson, V. Dhingra (IIT Delhi), S. Gaubert, J. Gunawardena (Harvard Medical School, USA).

Pendant son stage (dans le cadre du programme "INRIA international internships"), V. Dhingra a développé une implémentation de l'algorithme d'itération sur les politiques donné dans [68] adaptée aux problèmes de grandes taille. Celle ci permet de calculer la valeur d'un jeu déterministe à somme nulle, dans lequel le paiement de l'un des joueurs est son gain moyen asymptotique par unité de temps. Des expériences systématiques ont confirmé l'efficacité de l'algorithme, en montrant que le nombre d'itération moyen croît lentement avec la dimension.

Par ailleurs, on a poursuivi le travail plus général sur les problèmes d'existence et de calcul du vecteur de temps de cycle  $\chi(f) = \lim_k f^k(x)/k$ , où  $f$  est une application monotone contractante de  $\mathbb{R}^n$ .

#### *English version*

During his internship (done in the framework of the "INRIA international internships" programme), V. Dhingra has developed an implementation of the policy iteration algorithm of [68] adapted to large scale problem. It allows one to compute the value of a deterministic zero-sum repeated game with mean payoff. Systematic experiments have confirmed the efficiency of the algorithm, by showing that the average number of iteration grows slowly with the dimension.

Moreover, the work on the more general existence and computation problem for the cycle time vector  $\chi(f) = \lim_k f^k(x)/k$  of a monotone nonexpansive map of  $\mathbb{R}^n$  has been pursued.

### 6.2.5. *Un modèle de parcours auto-validant du web/A model of self-validating effects of web surfing*

**Participants:** M. Akian, S. Gaubert, L. Ninove.

Le “PageRank” le plus couramment utilisé est un ordre des pages web calculé à partir du graphe du web, lequel a pour noeuds les pages web et pour arcs les hyperliens : on suppose qu’un visiteur d’une page web choisit la page suivante qu’il va visiter de manière uniforme parmi les pages pointées par la page qu’il est en train de visiter. Ainsi, le parcours d’un visiteur du web est une marche aléatoire sur le graphe du web et on ordonne les pages web par la valeur de la mesure invariante de cette marche aléatoire. On a proposé un modèle tenant compte du fait qu’un visiteur du web peut avoir une idée a priori de la valeur des pages, et ainsi favoriser, dans ses choix de page suivante, les pages “réputées”. On montre dans [31] que si la réputation tient compte du PageRank des effets autovalidants peuvent apparaître. Cette étude fait appel à la théorie de Perron-Frobenius non-linéaire.

*English version*

The “PageRank” is a well known ranking of the webpages which uses the graph of the web, which nodes are the webpages and which arcs are hyperlinks: one assumes that a websurfer choose randomly the next webpage he will visit, among the pages pointed from the page he is visiting, with uniform distribution. Hence the trajectory of the websurfer is a random walk on the web graph, and one ranks webpages by the value of the invariant measure of this random walk. We have proposed a model taking into account the fact that a websurfer may have an a priori idea of the value of pages, favouring, in his choice of next pages, pages from “reputed” sites. We show in [31] that if the reputation is determined by the PageRank, self-validating effects may appear. This study uses nonlinear Perron-Frobenius theory.

### 6.3. Algèbre linéaire max-plus et convexité abstraite/Max-plus linear algebra and abstract convex analysis

#### 6.3.1. Fonctions convexes max-plus/Max-plus convex functions

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

On montre dans [21] qu’une fonction convexe max-plus définie sur un espace de dimension finie est enveloppe supérieure des fonctions “affines” qui la minorent. Nous obtenons ce résultat comme conséquence d’un théorème de séparation, qui raffine le résultat général de [8].

*English version*

We show in [21] that a lower-semicontinuous max-plus convex function is the supremum of its “affine” minorants, by refining some results of [8].

#### 6.3.2. Semi-modules projectifs max-plus/Projective max-plus semimodules

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

On étudie dans [20] les analogues max-plus des modules injectifs et projectifs. Nous obtenons notamment des résultats de dualité. Dans un travail plus récent, nous montrons que ces semi-modules “projectifs” sont caractérisés par la distributivité de leur structure de treillis [34].

*English version*

We study in [20] the max-plus analogues of projective and injective modules, and obtain duality results based on residuation. In a more recent work, we show that these “projective” semi-module can be characterized by the distributivity of their lattice structure [34].

#### 6.3.3. L’équation $Bf = g$ , quand $B$ est une conjugaison de Moreau/The equation $Bf = g$ , where $B$ is a Moreau conjugacy

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

Les conjugaisons de Moreau sont les transformations  $f \mapsto Bf$  de la forme

$$Bf(x) = \sup_{y \in Y} b(x, y) - f(y), \forall x \in X, \quad (10)$$

pour lesquelles le noyau  $b(x, y) \in \mathbb{R} \cup \{-\infty\}$  est donné. Lorsque  $b(x, y) = \langle x, y \rangle$ , on retrouve la transformée de Legendre-Fenchel. Les conjugaisons de Moreau sont des cas particuliers de correspondances de Galois. Nous étudions le problème de l'existence et de l'unicité de la solution  $f$  à l'équation  $Bf = g$ . Dans [17], nous traitons ce problème à partir de la notion de sous-différentiel généralisé, relativement au noyau  $b$ . Les résultats obtenus généralisent d'anciens résultats de N. Vorobyev et K. Zimmerman sur les opérateurs de dimension finie. Dans le cas de la transformée de Legendre-Fenchel, l'unicité est obtenue par exemple pour les fonctions  $g$  convexes essentiellement régulières. Dans [23], [29], nous étudions l'application des résultats de [17] à la caractérisation de taux de grandes déviations et au calcul du taux de croissance en temps long de certains problèmes de contrôle stochastique.

### *English version*

Moreau conjugacies are transformations  $f \mapsto Bf$  of the form (10) where  $b(x, y) \in \mathbb{R} \cup \{-\infty\}$  is given. When  $b(x, y) = \langle x, y \rangle$ , we recover the Legendre-Fenchel transform. We study the problem of the existence and uniqueness of the solution  $f$  of the equation  $Bf = g$ . We characterise in [17] the solvability in terms of generalised subdifferentials, with respect to the kernel  $b$ . In the case of the Legendre-Fenchel transform, the uniqueness result applies for instance to an essentially smooth convex function  $g$ . In [23], [29], we apply these results to the characterisation of large deviation rates and to the computation of the long term growth rate of some stochastic control problems.

## 6.4. Théorie des perturbations /Perturbation theory

### 6.4.1. Introduction

L'étude des valeurs propres d'une matrice perturbée de la forme  $a + \epsilon b$ , où  $a$  et  $b$  sont des matrices complexes et  $\epsilon$  est un paramètre, est un problème classique de théorie des perturbations. Une théorie initiée par Višik et Ljusternik, et complétée par Lidskiĭ, permet de déterminer, pour des valeurs génériques de la perturbation  $b$ , les asymptotiques au premier ordre  $\mathcal{L}_\epsilon \sim \lambda \epsilon^\Lambda$  de toutes les valeurs propres  $\mathcal{L}_\epsilon$  de la matrice perturbée. Certaines situations non génériques donnent lieu à des cas singuliers, qui ont motivé beaucoup de travaux, notamment de Najman, Ma et Edelman, Moro, Burke et Overton. Afin de résoudre ces cas singuliers, nous considérons le problème plus général d'une matrice  $\mathcal{A}_\epsilon$  dont les coordonnées ont des asymptotiques au premier ordre de la forme

$$(\mathcal{A}_\epsilon)_{ij} = a_{ij} \epsilon^{A_{ij}} + o(\epsilon^{A_{ij}}) \quad (11)$$

lorsque  $\epsilon$  tend vers 0, pour certains  $a_{ij} \in \mathbb{C}$  et  $A_{ij} \in \mathbb{R} \cup \{+\infty\}$ .

### *English version*

A basic problem in perturbation theory consists in studying the eigenvalues of a perturbed matrix of the form  $a + \epsilon b$ , where  $a$  and  $b$  are given complex matrices, and  $\epsilon$  is a parameter. A theory initiated by Višik and Ljusternik, and completed by Lidskiĭ, allows one to determine, for generic values of the perturbation  $b$ , the first order asymptotics  $\mathcal{L}_\epsilon \sim \lambda \epsilon^\Lambda$  of all the eigenvalues  $\mathcal{L}_\epsilon$  of the perturbed matrix. Some nongeneric situations lead to singular cases, which have attracted much attention (see in particular works by Najman; Ma and Edelman; Moro, Burke and Overton). To solve such singular cases, we considered the more general problem of a matrix  $\mathcal{A}_\epsilon$  whose entries have first order asymptotics of the form (11) as  $\epsilon$  tends to 0, for some  $a_{ij} \in \mathbb{C}$  and  $A_{ij} \in \mathbb{R} \cup \{+\infty\}$ .

### 6.4.2. Problèmes d'optimisation en théorie des perturbations / Optimisation problems in perturbation theory

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

Dans [28] et [39], on montre que la suite des exposants dominants des valeurs propres de  $\mathcal{A}_\epsilon$  peut, pour des valeurs génériques des paramètres  $a_{ij}$ , être calculée au moyen de problèmes d'optimisation discrète, qui sont des variations autour du problème d'affectation optimale ([39]) et du problème du plus court chemin ([28]). Ceci permet de généraliser un résultat classique de théorie des perturbations, dû à Višik, Ljusternik, et Lidskiĭ, et de résoudre des cas qui sont singuliers pour les approches classiques.

#### *English version*

In [28] and [39], we show that, for generic values of the parameters  $a_{ij}$ , the sequence of leading exponents of the eigenvalues of the matrix  $\mathcal{A}_\epsilon$  can be determined from discrete optimization problems, which are variations on the optimal assignment problem ([39]) and shortest path problem ([28]). This allows us to generalize a classical result in perturbation theory, due to Višik, Ljusternik, and Lidskiĭ, and to solve cases which are singular in previous approaches.

### 6.4.3. Calcul numérique robuste de valeurs propres de matrices/Robust numerical computation of matrix eigenvalues

**Participants:** M. Akian, S. Corlay, S. Gaubert, P. M. Ndiaye (Raise Partner Sas, Grenoble).

Dans ce travail, nous exploitons les problèmes d'optimisation discrète sous-jacents aux problèmes de détermination de valeur propre (cf. section précédente), afin de développer des algorithmes de calcul numérique robuste de valeurs propres et vecteurs propres de matrices. On rencontre en effet de nombreuses situations pratiques dans lesquelles les coefficients d'une matrice sont d'ordre de grandeur variables, rendant peu efficaces les méthodes existantes. La preuve des résultats de [28] et [39] suggère des renormalisations, permettant de rendre plus précis les calculs de valeurs propres. Le stage de M2 de Sylvain Corlay a permis de commencer à explorer ce sujet, en considérant particulièrement des matrices issues d'un problème d'allocation optimale de portefeuille.

#### *English version*

We exploit the relations between optimisation problems and matrix eigenvalues, described in the preceding section, to develop robust numerical algorithms to compute eigenvalues. Indeed, in many practical situations, the entries of a matrix may be of different order of magnitude, which make the existing methods less efficient. The proof of the results of [28] and [39] suggests diagonal scalings, allowing one to make more precise numerical eigenvalue computations. The internship of "M2" of Sylvain Corlay began to explore this topic, considering particularly matrices arising in an optimal portfolio selection problem.

## 6.5. Systèmes à événements discrets/Discrete event systems

### 6.5.1. Le problème de $l'(A, B)$ -invariance max-plus/The max-plus $(A, B)$ -invariance problem

**Participant:** R. Katz.

En théorie du contrôle, un point de vue fructueux est l'approche géométrique de Wonham. La thèse de R. Katz [78] s'est intéressée à la généralisation de cette théorie au cas des systèmes à événements discrets régis par des dynamiques max-plus linéaires. Étant donné un système max-plus linéaire récurrent  $x(k+1) = Ax(k) \oplus Bu(k)$  et un certain espace  $K$  représentant une spécification (par exemple, que certains temps de séjour soient majorés par des bornes données), le problème de  $l'(A, B)$ -invariance consiste à déterminer un contrôle en boucle fermée,  $u(k) = Fx(k)$ , tel que les trajectoires du système contrôlé restent dans l'espace "légal"  $K$ . (Ce problème apparaît dans de nombreuses applications, par exemple, les classiques politiques "kanban" peuvent être vues comme des cas particuliers de tels feedbacks, visant à garantir la

bornitude des stocks). On montre dans [22] que ce problème peut être résolu pour une sous-classe d'instances, à l'aide d'un algorithme de point fixe inspiré de celui de Wonham pour les systèmes linéaires classiques.

### *English version*

In classical control theory, a fruitful point of view is Wonham's geometric approach. The thesis of R. Katz [78], considered particularly the extension of this approach to the case of max-plus linear discrete event systems, together with various problems of invariance and accessibility. In particular, given a discrete event system represented by a max-plus dynamics  $x(k+1) = Ax(k) \oplus Bu(k)$  and a certain space  $K$  representing a specification (for instance, that certain sojourn times be bounded by given constants), the  $(A, B)$ -invariance problem consists in finding a feedback  $u(k) = Fx(k)$  which makes the trajectories of closed loop system stay in the "legal" space  $K$ . (This problem arises in many applications, for instance, the celebrated "kanban" policy in manufacturing is a special case of such a feedback, ensuring the boundedness of internal stocks.) It is shown in [22] that this problem can be solved for a subclass of instances by a fixed point algorithm involving max-plus semimodules, which is analogous to Wonham's method for linear systems over fields.

## 6.6. Méthode des éléments finis max-plus pour la résolution de problèmes de commande optimale déterministe/The max-plus finite element method for deterministic optimal control problem

**Participants:** M. Akian, S. Gaubert, A. Lakhoua, H. El Fekih (ENIT, Tunis).

Le sujet de thèse d'A. Lakhoua est le développement de méthodes de discrétisation des équations d'Hamilton-Jacobi exploitant la linéarité max-plus. Nous avons commencé par étudier un analogue max-plus de la méthode des éléments finis de Petrov-Galerkin dans le cas de l'équation d'évolution

$$-\frac{\partial v}{\partial t} + H(x, \frac{\partial v}{\partial x}) = 0, \quad (x, t) \in X \times (0, T], \quad v(x, 0) = \varphi(x), \quad x \in X, \quad (12)$$

où l'hamiltonien  $H(x, p)$  est supposé convexe par rapport à  $p$ . Comme rappelé dans la §3.2, le semi-groupe d'évolution  $S^t$  associé est max-plus linéaire. Ainsi, on peut remplacer l'équation (12) par la formulation variationnelle suivante, définie récursivement par :

$$v^{t+\Delta t} \in \mathcal{W}_h, \quad \langle z, v^{t+\Delta t} \rangle = \langle z, S^{\Delta t} v^t \rangle, \quad \forall z \in \mathcal{Z}_h, \quad (13)$$

pour  $t = 0, \Delta t, \dots, T - \Delta t$ . Ici,  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  est le produit scalaire max-plus et  $\mathcal{W}_h$  et  $\mathcal{Z}_h$  sont respectivement des semi-modules max-plus finiment engendrés d'éléments finis et de fonctions test. Cette formulation approxime la formulation variationnelle max-plus introduite par Kolokoltsov et Maslov. Comme (13) peut ne pas avoir de solution  $v^{t+\Delta t}$ , on définit  $v^{t+\Delta t}$  comme étant la sous-solution maximale de (13), qui est obtenue en remplaçant l'égalité par une inégalité, et en maximisant  $v^{t+\Delta t}$ . Le système dynamique ainsi obtenu s'interprète comme l'équation de la programmation dynamique d'un problème de jeux à somme nulle déterministe, contrairement au cas de la méthode proposée initialement par Fleming et McEneaney [66], qui elle est purement max-plus linéaire. Sous des hypothèses standard de régularité, nous avons obtenu des estimations d'erreur similaire au cas de la méthode des éléments finis classique : les projecteurs pour la norme d'énergie sont remplacés par des projecteurs sur des semi-modules max-plus, et l'erreur de projection est mesurée dans la norme du sup. Ces résultats utilisent la théorie développée dans [8], voir §6.3 : l'interprétation géométrique fournie par ces travaux permet de comprendre pourquoi les espaces  $\mathcal{W}_h$  et  $\mathcal{Z}_h$  doivent être différents. La méthode nécessite le calcul de  $\langle z, S^{\Delta t} w \rangle$  pour toute fonction test  $z$  et tout élément fini  $w$ . Plusieurs approximations ont été proposées et étudiées tant théoriquement que numériquement. Des versions préliminaires de ces travaux sont publiés dans [40] et [24].

### *English version*



The goal of the thesis of A. Lakhoua is to develop methods of discretization of Hamilton-Jacobi equations exploiting the max-plus linearity. We began by proposing a max-plus analogue of the classical Petrov-Galerkin finite element method, in the case of the evolution equation (12) where the Hamiltonian  $H(x, p)$  is convex in the variable  $p$ . As we recalled in §3.2, the associated evolution semigroup  $S^t$  is max-plus linear. Therefore, we replace Equation (12) by the max-plus variational approximation, defined recursively by (13) for  $t = 0, \Delta t, \dots, T - \Delta t$ . Here,  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  denotes the max-plus scalar product, and  $\mathcal{W}_h$  and  $\mathcal{Z}_h$  are finitely generated max-plus semimodules of finite elements and test functions, respectively. This formulation approximates the max-plus variational formulation due to Kolokoltsov and Maslov. Since Equation (13) need not have a solution  $v^{t+\Delta t}$ , we define  $v^{t+\Delta t}$  to be the maximal subsolution of (13). This yields a discretized scheme which can be interpreted as the dynamic programming equation of a zero-sum two players repeated game, unlike a max-plus discretization scheme proposed previously by Fleming and McEneaney [66] which is purely max-plus linear. We obtained, under standard assumptions, error estimates which are similar to the case of the classical finite element method: projectors in the energy norm are replaced here by projectors on max-plus semimodules, and the projection error is measured in the sup norm. These results rely on the theory developed in [8], see §6.3: in particular, the geometrical interpretation given there allows one to understand why the spaces  $\mathcal{W}_h$  and  $\mathcal{Z}_h$  must differ. The method requires the evaluation of  $\langle z, S^{\Delta t} w \rangle$  for each test function  $z$  and each finite element  $w$ . Various approximations have been proposed and studied theoretically and numerically. Preliminary versions of these studies appeared in [40] and [24].

## 6.7. Analyse statique de programmes et itération sur les politiques/Static analysis of computer programs and policy iteration

**Participants:** A. Costan (Polytechnica, Bucarest), S. Gaubert, E. Goubault (CEA), M. Martel (CEA), S. Putot (CEA), A Taly (IIT Mumbai).

L'interprétation abstraite est une technique, introduite par Cousot, qui permet de déterminer des invariants de programmes en calculant des points fixes minimaux d'applications monotones définies sur certains treillis. Il peut s'agir par exemple de treillis d'intervalles de  $\mathbb{R}^n$ , ou bien de treillis formés de familles de sous-ensembles de  $\mathbb{R}^n$  (décrits par des inégalités de type potentiel, par des inégalités affines, etc.) Une difficulté répertoriée est que les algorithmes de point fixe naïfs effectuent parfois un nombre d'itérations considérable. Cette pathologie a donné lieu à de nombreux travaux.

Dans un premier travail [25], nous avons montré que les algorithmes généraux d'itérations sur les politiques, tels que ceux développés dans [68], [56],[7], peuvent être généralisés à ces problèmes. Une première implémentation, adaptée aux treillis d'intervalles, et qui prend comme entrée un programme écrit dans un langage C restreint, a permis de tester la méthode, et de montrer qu'elle améliore les autres approches, en précision et en vitesse, pour certaines classes de programmes (par exemple avec boucles imbriquées).

Ce travail s'est poursuivi avec le stage d'A. Taly, élève de l'IIT de Mumbai, effectué au Lix (École Polytechnique), sous la direction de S. Gaubert et E. Goubault. Ce stage a permis de formuler et de tester un algorithme d'itération sur les politiques adapté au cas de certains treillis d'ensembles convexes polyédraux. Comme dans le cas des intervalles, on a pu mettre en évidence des situations où cet algorithme permet de gagner en précision par rapport aux approches classiques.

### *English version*

Cousot's abstract interpretation allows one to determine invariants of programs by computing the smallest fixed point of certain monotone maps, defined on some complete lattices, like lattices of intervals of  $\mathbb{R}^n$ , or more generally, on lattices consisting of "nice" families of subsets of  $\mathbb{R}^n$  (defined by potential constraints, by affine inequalities, etc.) A well known difficulty, which has motivated much work in the field, is that the convergence of naive fixed point iterations can be slow.

In a first work [25], we showed that the general policy iteration techniques (for repeated games) of [68], [56],[7] can be generalised to compute such fixed points. A first implementation, adapted to interval lattices,

which starts from a program written in a simplified sublanguage of C, allowed us to test the method, showing that it seems to improve other approaches, in speed and in precision, for certain classes of programs (with nested loops).

This work was pursued with the internship of A. Taly, student from IIT Mumbai, done at the Lix (École Polytechnique), under the supervision of S. Gaubert and E. Goubault. During this internship, we developed a policy iteration algorithm adapted to some lattices of convex polyhedral sets. As in the case of interval lattices, we could observe improvements in precision on subclasses of instances, by comparison with classical approaches.

## 7. Other Grants and Activities

### 7.1. Actions internationales

- Coopération STIC-INRIA-Universités tunisiennes entre les projets Mathfi, Maxplus, et Sydoco de l'INRIA Rocquencourt et le Laboratoire de Modélisation Mathématique et Numérique dans les Sciences de l'Ingénieur (LAMSIN) de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT), depuis janvier 2004. Le titre de la coopération est "Méthodes numériques pour le contrôle optimal et applications en finance", et les responsables en sont H. El Fekih du côté ENIT et S. Gaubert du côté INRIA.
- Bourse de l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) : Asma Lakhoua a obtenu une bourse de l'AUF de 10 mois à partir du 1er novembre 2004, renouvelée pour 10 mois à partir du 1er novembre 2005, pour sa thèse en cotutelle (Paris 6-ENIT).

### 7.2. Accueils de chercheurs étrangers

- Ravindra Bapat de l'Indian Statistical Institute (New Delhi), 1 semaine.
- Henda El Fekih de l'ENIT, 2×1 semaine.
- Alexander Guterman de l'université de Moscou, 2 jours.
- Bas Lemmens de Warwick University, 1 semaine.

## 8. Dissemination

### 8.1. Animation de la communauté scientifique

- M. Akian :
  - Co-responsable du séminaire <<Probabilités, Optimisation, Contrôle>> de l'INRIA Rocquencourt.
- S. Gaubert :
  - Membre du conseil de la formation à l'ENSTA.
  - Membre du Comité de Programme de MSR'05 (Colloque Modélisation de Systèmes Réactifs).
- J.P. Quadrat :
  - Administre le site d'intérêt général <http://www.maxplus.org>, dédié à l'algèbre max-plus.

## 8.2. 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.
- S. Gaubert
  - Cours (Optimisation Combinatoire) en troisième année à l'Ensta.
  - Cours (Systèmes à Événements Discrets) au DEA Automatique et Traitement du Signal (Orsay) commun à l'Option Automatique de l'ENSMP.
  - Cours (Algèbre max-plus pour le contrôle optimal et les jeux) au DEA OJME (Paris 6).
  - Petites classes d'analyse numérique et optimisation en seconde année à l'École Polytechnique.
  - Cours, petites classes et organisation des enseignements d'approfondissement de Recherche Opérationnelle en troisième année à l'École Polytechnique (majeure de Mathématiques Appliquées).

## 8.3. Encadrement de thèse

- Asma Lakhoua. Encadrement assuré par S. Gaubert, M. Akian et Henda El Fekih (ENIT, Tunis).

## 8.4. Participation à des colloques, séminaires, invitations

- M. Akian
  - Visite d'une semaine à Nottingham Trent University (Vassili Kolokoltsov), Juin 2005.
  - 8th International Symposium on Generalized Convexity and Generalized Monotonicity (Varese, Juillet 2005). Titre de l'exposé: "Invertibility of Moreau conjugacies with application to large deviations".
  - Visite d'une semaine à l'ENIT dans le cadre de la coopération STIC INRIA-Universités tunisiennes, Octobre 2005.
  - CDC-ECC'05 (44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference ECC 2005), Seville, Décembre 2005. Titre de l'exposé: "Solutions of max-plus linear equations and large deviations".
- S. Gaubert
  - AMS-MAA Joint Mathematics Meetings, Atlanta, Janvier 2005. Titre de l'exposé: "Perturbation of matrix eigenvalues and min-plus algebra".
  - Visite d'une semaine à l'ENIT dans le cadre de la coopération STIC INRIA-Universités tunisiennes, Avril 2005.
  - SIAM conference on Control and its applications, New Orleans, Juillet 2005. Titre de l'exposé: "Iterates of Semidifferentiable Nonexpansive Maps and Zero-Sum Repeated Games".

- Visite d'une semaine à l'University of California, San Diego (McEneaney), Juillet 2005.
- Conférence invitée à MSR'05 (Colloque Modélisation de Systèmes Réactifs), Autrans, Octobre 2005. Titre de l'exposé: "Nonlinear Perron-Frobenius theory and discrete event systems".
- A. Lakhoua
  - TAMTAM'05 (Tendances dans les Applications Mathématiques en Tunisie, Algérie, Maroc), Tunis, Avril 2005. Titre de l'exposé: "A max-plus finite element method for solving Hamilton-Jacobi equations".
  - CDC-ECC'05 (44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference ECC 2005), Seville, Décembre 2005. Titre de l'exposé: "The Max-Plus Finite Element Method for Optimal Control Problems: Further Approximation Results".
- J.-P. Quadrat
  - Présentation de la boîte à outil Maxplus de Scilab dans le Cours Scilab, Blida (Algérie), Novembre 2005.
  - CDC-ECC'05 (44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference ECC 2005), Seville, Décembre 2005. Titre de l'exposé: "Derivation of the Fundamental Diagram for Two Circular Roads and a Crossing Using Minplus Algebra and Petri Net Modeling".
- C. Walsh
  - SIAM conference on Control and its applications, New Orleans, Juillet 2005. Titre de l'exposé: "Idempotent Potential Theory".

## 9. Bibliography

### Major publications by the team in recent years

- [1] M. AKIAN. *Densities of idempotent measures and large deviations*, in "Transactions of the American Mathematical Society", vol. 351, n° 11, 1999, p. 4515–4543.
- [2] M. AKIAN, R. BAPAT, S. GAUBERT. *Asymptotics of the Perron Eigenvalue and Eigenvector using Max Algebra*, in "C. R. Acad. Sci. Paris.", Also INRIA Research Report RR-3450, vol. 327, Série I, 1998, p. 927–932, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3450.html>.
- [3] M. AKIAN, S. GAUBERT. *Spectral Theorem for Convex Monotone Homogeneous Maps, and ergodic Control*, in "Nonlinear Analysis. Theory, Methods & Applications", vol. 52, n° 2, 2003, p. 637-679, <http://hal.inria.fr/inria-00000201/en/>.
- [4] M. AKIAN, J.-P. QUADRAT, M. VIOT. *Duality between probability and optimization*, in "Idempotency", J. GUNAWARDENA (editor)., Publications of the Isaac Newton Institute, Cambridge University Press, 1998.
- [5] M. AKIAN, A. SULEM, M. TAKSAR. *Dynamic optimisation of long term growth rate for a portfolio with transaction costs and logarithmic utility*, in "Mathematical Finance", vol. 11, n° 2, 2001, p. 153–188.

- [6] F. BACCELLI, G. COHEN, G. OLSDER, J.-P. QUADRAT. *Synchronisation and Linearity*, Wiley, 1992.
- [7] J. COCHET-TERRASSON, S. GAUBERT, J. GUNAWARDENA. *A constructive fixed point theorem for min-max functions*, in "Dynamics and Stability of Systems", vol. 14, n° 4, 1999.
- [8] G. COHEN, S. GAUBERT, J.-P. QUADRAT. *Duality and Separation Theorems in Idempotent Semimodules*, in "Linear Algebra and Appl.", vol. 379, 2004, p. 395–422, [http://arxiv.org/PS\\_cache/math/pdf/0212/0212294.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/math/pdf/0212/0212294.pdf).
- [9] G. COHEN, S. GAUBERT, J.-P. QUADRAT. *Max-plus algebra and system theory: where we are and where to go now*, in "Annual Reviews in Control", vol. 23, 1999, p. 207–219.
- [10] S. GAUBERT. *Performance Evaluation of  $(max, +)$  Automata*, in "IEEE Trans. on Automatic Control", vol. 40, n° 12, Dec 1995, p. 2014–2025.
- [11] S. GAUBERT. *On the Burnside Problem for Semigroups of Matrices in the  $(max, +)$  Algebra*, in "Semigroup Forum", vol. 52, 1996, p. 271–292.
- [12] S. GAUBERT, J. GUNAWARDENA. *The Perron-Frobenius Theorem for Homogeneous, Monotone Functions*, in "Trans. of AMS", PII: S 0002-9947(04)03470-1, vol. 356, n° 12, 2004, p. 4931-4950, <http://arxiv.org/abs/math.FA/0105091>.
- [13] S. GAUBERT, J. MAIRESSE. *Modeling and analysis of timed Petri nets using heaps of pieces*, in "IEEE Trans. Automat. Control", vol. 44, n° 4, 1999, p. 683–697.
- [14] S. GAUBERT, M. PLUS. *Methods and Applications of  $(max, +)$  Linear Algebra*, in "STACS'97, Lübeck", R. REISCHUK, M. MORVAN (editors). , LNCS, n° 1200, Springer, March 1997.
- [15] MAX-PLUS WORKING GROUP, PRESENTED BY J.P. QUADRAT. *Max-Plus Algebra and Applications to System Theory and Optimal Control*, in "Proceedings of the ICM, Zurich", August 1994.

### Articles in refereed journals and book chapters

- [16] M. AKIAN, R. BAPAT, S. GAUBERT. *Max-plus algebras*, in "Handbook of Linear Algebra", L. HOGBEN, R. BRUALDI, A. GREENBAUM, R. MATHIAS (editors). , to appear, Chapman & Hall.
- [17] M. AKIAN, S. GAUBERT, V. KOLOKOLTSOV. *Set coverings and invertibility of functional Galois connections*, in "Idempotent Mathematics and Mathematical Physics", G. LITVINOV, V. MASLOV (editors). , Contemporary Mathematics, Also ESI Preprint 1447, arXiv:math.FA/0403441, American Mathematical Society, 2005, p. 19-51, <http://hal.inria.fr/inria-00000966/en/>.
- [18] M. AKIAN, S. GAUBERT, C. WALSH. *Discrete max-plus spectral theory*, in "Idempotent Mathematics and Mathematical Physics", G. L. LITVINOV, V. P. MASLOV (editors). , Contemporary Mathematics, Also ESI Preprint 1485, arXiv:math.SP/0405225, American Mathematical Society, 2005, p. 19-51, <http://hal.inria.fr/inria-00000968/en/>.

- [19] G. COHEN, S. GAUBERT, J.-P. QUADRAT. *L'algèbre des sandwiches*, in "Pour la Science", Février 2005, p. 56–63.
- [20] G. COHEN, S. GAUBERT, J.-P. QUADRAT. *Projection and Aggregation in Maxplus Algebra*, in "Current Trends in Nonlinear Systems and Control, in Honor of Petar Kokotovic and Turi Nicosia", L. MENINI, L. ZACCARIAN, C. T. ABDALLAH (editors). , Systems & Control: Foundations & Applications, Birkhauser, January 2006.
- [21] G. COHEN, S. GAUBERT, J. QUADRAT, I. SINGER. *Max-plus convex sets and functions*, in "Idempotent Mathematics and Mathematical Physics", G. L. LITVINOV, V. P. MASLOV (editors). , Contemporary Mathematics, Also ESI Preprint 1341, American Mathematical Society, 2005, p. 105–129, <http://www.arxiv.org/abs/math.FA/0308166>.
- [22] R. KATZ. *Max-plus  $(A, B)$ -invariant spaces and discrete event systems*, Accepted for publication in IEEE Trans. on Automatic Control.

## Publications in Conferences and Workshops

- [23] M. AKIAN, S. GAUBERT, V. KOLOKOLTSOV. *Solutions of max-plus linear equations and large deviations*, in "Proceedings of the joint 44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference ECC 2005 (CDC-ECC'05), Seville, Espagne", Also arXiv:math.PR/0509279, 2005, <http://hal.inria.fr/inria-00000218/en/>.
- [24] M. AKIAN, S. GAUBERT, A. LAKHOUA. *The max-plus finite element method for optimal control problems: further approximation results*, in "Proceedings of the joint 44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference ECC 2005 (CDC-ECC'05), Seville, Espagne", Also arXiv:math.OC/0509250, 2005, <http://hal.inria.fr/inria-00000965/en/>.
- [25] A. COSTAN, S. GAUBERT, E. GOUBAULT, M. MARTEL, S. PUTOT. *A policy iteration algorithm for computing fixed points in static analysis of programs*, in "Proceedings of the 17th International Conference on Computer Aided Verification (CAV'05), Edinburgh", LNCS, Springer, July 2005, p. 462–475.
- [26] N. FARHI, M. GOURSAT, J.-P. QUADRAT. *Derivation of the Fundamental Diagram for Two Circular Roads and a Crossing Using Minplus Algebra and Petri Net Modeling*, in "Proceedings of the joint 44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference ECC 2005 (CDC-ECC'05), Seville, Espagne", 2005.

## Internal Reports

- [27] F. BONNANS, S. GAUBERT. *Recherche opérationnelle: aspects mathématiques et applications (Majeure de Mathématiques Appliquées)*, Cours à l'École Polytechnique, 2005.

## Miscellaneous

- [28] M. AKIAN, R. BAPAT, S. GAUBERT. *Min-plus methods in eigenvalue perturbation theory and generalised Lidskii-Vishik-Ljusternik theorem*, version 2, 2005, [http://arxiv.org/PS\\_cache/math/pdf/0402/0402090.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/math/pdf/0402/0402090.pdf).

- [29] M. AKIAN, S. GAUBERT, V. KOLOKOLTSOV. *Invertibility of Moreau conjugacies and large deviations*, Preprint, 2005.
- [30] M. AKIAN, S. GAUBERT, B. LEMMENS. *Stable fixed points in discrete convex monotone dynamical systems*, Preprint, 2005.
- [31] M. AKIAN, S. GAUBERT, L. NINOVE. *The T-pagerank: a model of self-validating effects of web surfing*, Preprint, 2005.
- [32] M. AKIAN, S. GAUBERT, R. NUSSBAUM. *Uniqueness of fixed points of nonexpansive semi-differentiable maps*, Preprint, 2005.
- [33] M. AKIAN, S. GAUBERT, C. WALSH. *The max-plus Martin boundary*, 2005, [http://arxiv.org/PS\\_cache/math/pdf/0412/0412408.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/math/pdf/0412/0412408.pdf)
- [34] G. COHEN, S. GAUBERT, J.-P. QUADRAT. *Regular matrices in max-plus algebra*, Preprint, 2005.
- [35] C. WALSH. *Minimum representing measures in Idempotent Analysis*, 2005, <http://arxiv.org/abs/math.MG/0503716>.
- [36] C. WALSH. *The horofunction boundary of finite-dimensional normed spaces*, 2005, [http://arxiv.org/PS\\_cache/math/pdf/0510/0510101.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/math/pdf/0510/0510101.pdf)

### Bibliography in notes

- [37] A. NEYMAN, S. SORIN (editors). *Stochastic games and applications*, NATO Science Series C: Mathematical and Physical Sciences, vol. 570, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2003, x+473.
- [38] 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, Praha", Elsevier, 2001.
- [39] M. AKIAN, R. BAPAT, S. GAUBERT. *Perturbation of eigenvalues of matrix pencils and optimal assignment problem*, in "C. R. Acad. Sci. Paris, Série I", Also arXiv:math.SP/0402438, vol. 339, 2004, p. 103–108, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-5120.html>.
- [40] M. AKIAN, S. GAUBERT, A. LAKHOUA. *A max-plus finite element method for solving finite horizon deterministic optimal control problems*, in "Proceedings of MTNS'04, Louvain, Belgique", Also arXiv:math.OC/0404184, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-5163.html>.
- [41] N. BACAËR. *Perturbations singulières et théorie spectrale min-plus*, Thèse de doctorat, Université Paris 6, January 2002.
- [42] F. BACCELLI, D. HONG. *TCP is max-plus linear and what it tells us on its throughput*, in "Proceedings of the conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication", 2000, p. 219-230.
- [43] R. BAPAT. *A max version of the Perron-Frobenius theorem*, in "Linear Algebra Appl.", vol. 275/276, 1998, p. 3–18.

- 
- [44] R. BAPAT, T. RAGHAVAN. *Nonnegative matrices and applications*, n° 64, Cambridge university press, 1997.
- [45] A. BENVENISTE, S. GAUBERT, C. JARD. *Monotone rational series and max-plus algebraic models of real-time systems*, in "Proc. of the Fourth Workshop on Discrete Event Systems (WODES98), Cagliari, Italy", IEE, 1998.
- [46] A. BERENSTEIN, A. N. KIRILLOV. *The Robinson-Schensted-Knuth bijection, quantum matrices, and piecewise linear combinatorics*, in "Proceedings of FPSAC'01", 2001.
- [47] T. BLYTH, M. JANOWITZ. *Residuation Theory*, Pergamon press, 1972.
- [48] J.-Y. L. BOUDEEC, P. THIRAN. *Network calculus*, LNCS, n° 2050, Springer, 2001.
- [49] H. BRAKER. *Algorithms and Applications in Timed Discrete Event Systems*, Ph. D. Thesis, Delft University of Technology, Dec 1993.
- [50] S. M. BURNS. *Performance analysis and optimization of asynchronous circuits*, PhD Thesis, Caltech, 1990.
- [51] P. BUTKOVIC. *Max-algebra: the linear algebra of combinatorics?*, in "Lin.Alg. and Appl.", vol. 367, 2003, p. 313-335.
- [52] Z. CAO, K. KIM, F. ROUSH. *Incline algebra and applications*, Ellis Horwood, 1984.
- [53] C.-S. CHANG. *Performance guarantees in Communication networks*, Springer, 2000.
- [54] W. CHOU, R. GRIFFITHS. *Ground states of one dimensional systems using effective potentials*, in "Phys. Rev. B", vol. 34, 1986, p. 6219-34.
- [55] P. CHRETIENNE. *Les Réseaux de Petri Temporisés*, Thèse Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), Paris, 1983.
- [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, G. COHEN, S. GAUBERT, M. M. GETTRICK, J.-P. QUADRAT. *Numerical computation of spectral elements in max-plus algebra*, in "Proc. of the IFAC Conference on System Structure and Control, Nantes", July 1998.
- [58] G. COHEN, D. DUBOIS, J.-P. QUADRAT, M. VIOT. *Analyse du comportement périodique des systèmes de production par la théorie des diïodes*, Rapport de recherche, n° 191, INRIA, Le Chesnay, France, 1983, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-0191.html>.
- [59] J.-P. COMET. *Application of max-plus algebra to biological sequence comparison*, in "Theor. Comput. Sci., Special issue on max-plus algebras", To appear.



- [60] M. CRANDALL, L. TARTAR. *Some relations between non expansive and order preserving maps*, in "Proceedings of the AMS", vol. 78, n° 3, 1980, p. 385–390.
- [61] R. CUNINGHAME-GREEN. *Minimax Algebra*, Lecture notes in Economics and Mathematical Systems, n° 166, Springer, 1979.
- [62] P. DEL MORAL. *Maslov optimization theory: topological aspects*, in "Idempotency (Bristol, 1994), Cambridge", Publ. Newton Inst., vol. 11, Cambridge Univ. Press, 1998, p. 354–382.
- [63] M. DEVELIN, B. STURMFELS. *Tropical convexity*, in "Doc. Math.", vol. 9, 2004, p. 1–27 (electronic).
- [64] M. DUBREIL-JACOTIN, L. LESIEUR, R. CROISOT. *Leçons sur la Théorie des Treillis, des Structures Algébriques Ordonnées, et des Treillis géométriques*, Cahiers Scientifiques, vol. XXI, Gauthier Villars, Paris, 1953.
- [65] A. FATHI. *Solutions KAM faibles et théorie de Mather sur les systèmes lagrangiens*, in "C. R. Acad. Sci. Paris, Sér. I Math.", vol. 324, n° 9, 1997, p. 1043–1046.
- [66] W. FLEMING, W. MCENEANEY. *A max-plus based algorithm for an HJB equation of non-linear filtering*, in "SIAM J. Control and Opt.", 2000, p. 683–710.
- [67] S. FOMIN, A. ZELEVINSKY. *Cluster algebras I: foundations*, 2001, [http://arxiv.org/PS\\_cache/math/pdf/0104/0104151.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/math/pdf/0104/0104151.pdf).
- [68] S. GAUBERT, J. GUNAWARDENA. *The Duality Theorem for min-max functions*, in "C. R. Acad. Sci. Paris.", vol. 326, Série I, 1998, p. 43–48.
- [69] I. GELFAND, M. KAPRANOV, A. ZELEVINSKY. *Discriminants, resultants, and multidimensional determinants*, Birkhäuser, 1994.
- [70] M. GONDRAN. *Analyse MINPLUS*, in "C. R. Acad. Sci. Paris Sér. I Math.", vol. 323, n° 4, 1996, p. 371–375.
- [71] M. GONDRAN, M. MINOUX. *Graphes, Dioïdes et semi-anneaux*, TEC & DOC, Paris, 2002.
- [72] M. GONDRAN, M. MINOUX. *Valeurs propres et vecteurs propres dans les dioïdes et leur interprétation en théorie des graphes*, in "EDF, Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches, Serie C, Mathématiques Informatique", vol. 2, 1977, p. 25-41.
- [73] M. GONDRAN, M. MINOUX. *Graphes et algorithmes*, Engl. transl. Graphs and Algorithms, Wiley, 1984, Eyrolles, Paris, 1979.
- [74] M. GONDRAN, M. MINOUX. *Linear algebra in dioids: a survey of recent results*, in "Annals of Discrete Mathematics", vol. 19, 1984, p. 147-164.
- [75] J. GUNAWARDENA. *From max-plus algebra to nonexpansive maps: a nonlinear theory for discrete event systems*, in "Theoretical Computer Science", vol. 293, 2003, p. 141–167.

- [76] K. HASHIGUCHI. *Improved limitedness theorems on finite automata with distance functions*, in "Theoret. Comput. Sci.", vol. 72, 1990, p. 27–38.
- [77] H. HILLION, J. PROTH. *Performance Evaluation of Job-shop Systems using Timed Event-Graphs*, in "IEEE Trans. on Automatic Control", vol. 34, n° 1, Jan 1989, p. 3-9.
- [78] R. KATZ. *Problemas de alcanzabilidad e invariancia en el álgebra max-plus*, Tesis doctoral, Universidad Nacional de Rosario, Argentina, Noviembre 2003.
- [79] V. KOLOKOLTSOV, V. MASLOV. *Idempotent analysis and applications*, Kluwer Acad. Publisher, 1997.
- [80] M. KREĀN, M. RUTMAN. *Linear operators leaving invariant a cone in a Banach space*, in "Amer. Math. Soc. Translation", vol. 1950, n° 26, 1950, 128.
- [81] D. KROB. *The equality problem for rational series with multiplicities in the tropical semiring is undecidable*, in "Int. J. of Algebra and Comput.", vol. 3, 1993.
- [82] J.-B. LASSERRE. *Generating functions and duality for integer programs*, in "Discrete Optimization", To appear.
- [83] P. LE MAIGAT. *Techniques algébriques Max-Plus pour l'analyse des performances temporelles de systèmes concurrents*, Thèse de doctorat, Université Rennes 1, September 2002.
- [84] C. LENTÉ. *Analyse max-plus des problèmes d'ordonnancement de type flowshop*, Thèse, Université de Tours, November 2001.
- [85] H. LEUNG. *Limitedness theorem on finite automata with distance function: an algebraic proof*, in "Theoret. Comput. Sci", vol. 81, 1991, p. 137–145.
- [86] G. LITVINOV, V. MASLOV, G. SHPIZ. *Idempotent functional analysis: an algebraic approach*, in "Math. Notes", vol. 69, n° 5, 2001, p. 696–729, <http://arxiv.org/abs/math.FA/0009128>.
- [87] P. LOTITO, E. MANCINELLI, J. P. QUADRAT. *A minplus derivation of the fundamental car traffic law*, Rapport de Recherche, n° 4324, INRIA, 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4324.html>.
- [88] J. MALLET-PARET, R. NUSSBAUM. *Eigenvalues for a Class of Homogeneous Cone Maps Arising from Max-Plus Operators*, in "Discrete and Continuous Dynamical Systems", vol. 8, n° 3, July 2002, p. 519–562.
- [89] E. MANCINELLI, G. COHEN, S. GAUBERT, J.-P. QUADRAT, E. ROFMAN. *On Traffic Light Control of Regular Towns*, Rapport de Recherche, n° 4276, INRIA, 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4276.html>.
- [90] V. MASLOV. *Méthodes Operatorielles*, trad. fr. 1987, Edition Mir, Moscou, 1973.
- [91] V. MASLOV, S. SAMBORSKIĀ. *Idempotent analysis*, Advances In Soviet Mathematics, vol. 13, Amer. Math. Soc., Providence, 1992.

- [92] G. MIKHALKIN. *Amoebas of algebraic varieties*, Survey for the Real Algebraic and Analytic Conference in Rennes, arXiv:math.AG/0108255, 2001.
- [93] P. D. MORAL, T. THUILLET, G. RIGAL, G. SALUT. *Optimal versus random processes : the nonlinear case*, Rapport de recherche, LAAS, 1990.
- [94] M. MORISHIMA. *Equilibrium, stability, and growth: A multi-sectoral analysis*, Clarendon Press, Oxford, 1964.
- [95] R. D. NUSSBAUM. *Hilbert's projective metric and iterated nonlinear maps*, in "Memoirs of the AMS", vol. 75, n° 391, 1988.
- [96] G. OLSDER. *Eigenvalues of dynamic max-min systems*, in "Discrete Event Dyn. Syst.", vol. 1, n° 2, 1991, p. 177-207.
- [97] J.-E. PIN. *Tropical Semirings*, in "Idempotency", J. GUNAWARDENA (editor). , Publications of the Isaac Newton Institute, Cambridge University Press, 1998.
- [98] M. PLUS. *Linear systems in  $(\max, +)$ -algebra*, in "Proceedings of the 29th Conference on Decision and Control, Honolulu", Dec. 1990.
- [99] A. PUHALSKIĪ. *Large Deviations and Idempotent Probability*, Monographs and Surveys in Pure and Applied Mathematics, n° 119, Chapman & Hall, 2001.
- [100] J.-P. QUADRAT. *Théorèmes asymptotiques en programmation dynamique*, in "Note C.R.A.S.", n° 311, 1990, p. 745-748.
- [101] I. ROMANOVSKIĪ. *Optimization of stationary control of discrete deterministic process in dynamic programming*, in "Kibernetika", vol. 3, n° 2, 1967, p. 66-78.
- [102] D. ROSENBERG, S. SORIN. *An operator approach to zero-sum repeated games*, in "Israel J. Math.", vol. 121, 2001, p. 221–246.
- [103] A. RUBINOV. *Abstract convexity and global optimization*, Kluwer, 2000.
- [104] S. N. SAMBORSKIĪ. *Extensions of differential operators and nonsmooth solutions of differential equations*, in "Kibernet. Sistem. Anal.", n° 3, 2002, p. 163–180, 192.
- [105] I. SIMON. *Limited subsets of the free monoid*, in "Proc. of the 19th Annual Symposium on Foundations of Computer Science", IEEE, 1978, p. 143–150.
- [106] I. SIMON. *On semigroups of matrices over the tropical semiring*, in "Theor. Infor. and Appl.", vol. 28, n° 3-4, 1994, p. 277–294.
- [107] I. SINGER. *Abstract convex analysis*, Wiley, 1997.

- [108] D. SPEYER, B. STURMFELS. *The tropical Grassmannian*, in "Adv. Geom.", vol. 4, n° 3, 2004, p. 389–411.
- [109] O. VIRO. *Real plane algebraic curves*, in "Proceedings of the European Congress of Mathematicians", 2000.
- [110] N. N. VOROBYEV. *Extremal algebra of positive matrices*, in "Elektron. Informationsverarbeit. Kybernetik", in russian, vol. 3, 1967, p. 39–71.
- [111] K. ZIMMERMANN. *Disjunctive optimization, max-separable problems and extremal algebras*, in "Theoret. Comput. Sci.", Max-plus algebras, vol. 293, n° 1, 2003, p. 45–54.
- [112] K. ZIMMERMANN. *Extremální Algebra*, (in Czech), Ekonomický ústav ČSAV, Praha, 1976.
- [113] U. ZIMMERMANN. *Linear and Combinatorial Optimization in Ordered Algebraic Structures*, North Holland, 1981.