

Rapport INRIA 1994 — Programme 2

# Modèles et implémentation des calculs syntaxiques

Projet MICAS

3 mai 1995



## Projet MICAS

---

# Modèles et implémentation des calculs syntaxiques

---

**Localisation :** *Rennes*

**Mots-clés :** algèbre (6), automate (6), bisimulation (1, 5), dualité (1, 3), graphe (1, 5), MICAS (1), programmation fonctionnelle (1), réécriture (1, 7), régularité (1, 5, 6), réseau de Petri (1, 3), structure d'événement (1, 5), système de transition (1, 3), typage (1, 7).

Micas est un projet commun Inria/CNRS (URA 227).

## 1 Composition de l'équipe

### Responsable scientifique

Philippe Darondeau, DR Inria

### Personnel Inria

Éric Badouel, CR

Boubakar Gamatié, CR

### Personnel Ura 227

Didier Caucal, CR CNRS

Annie Foret, maître de conférences, université de Rennes 1

Anne Grazon, maître de conférences, université de Rennes 1

Gilles Lesventes, maître de conférences, université de Rennes 1

Jean-Claude Raoult, professeur, université de Rennes 1

Martine Vergne, maître de conférences, université de Rennes 1

### Chercheurs post-doctorants

Luca Bernardinello, post-doc HCM jusqu'au 31 mai 94, invité  
pour 6 mois à partir du 1 octobre 94

Andreas Potthoff, post-doc HCM à partir du 1 juillet 94

### **Chercheurs doctorants**

François Noël, allocataire MESR jusqu'au 31 septembre 94

Vincent Schmitt, allocataire MESR depuis novembre 93

## **2 Présentation générale et objectifs**

Nous étudions les correspondances effectives entre automates concurrents, réseaux, structures d'événements et domaines de configurations. Ces correspondances nous servent à définir la sémantique des langages de programmation non séquentiels, à mesurer leur pouvoir d'expression, et à caractériser les sous-ensembles de ces langages susceptibles de vérifications automatisées. Nous étudions les graphes associés aux systèmes de réécritures, leurs réductions et leurs propriétés décidables. Les résultats s'appliquent aux programmes non-déterministes définis par grammaires ou automates, et aux programmes fonctionnels définis par schémas de programmes récursifs. Nous étudions le typage et le sous-typage dans les langages fonctionnels, et les algorithmes de typage qui s'appuient sur la réécriture. Parmi nos objectifs actuels, citons :

- l'étude générale des correspondances entre automates et réseaux, fondées sur la dualité entre états (marquages) et propriétés (places), la réalisation d'algorithmes de synthèse de réseaux bornés à partir d'automates ou de langages réguliers, et la recherche d'objets schizophrènes qui permettent d'expliquer ces correspondances de façon uniforme ;
- la transposition du problème de synthèse de réseaux à d'autres types de systèmes de transitions, explicites (automates à semi-commutations), partiels (automates incomplètement spécifiés) ou implicites (systèmes dynamiques discrets) ;
- l'étude des graphes infinis réguliers qui ne peuvent pas être définis par grammaire de graphes (avec comme cas particulier celui des graphes de configurations de structures d'événements), la décision de leur bisimulation lorsqu'elle est possible, et la construction des quotients correspondants ;

- l'étude générale des transformations de graphes et d'arbres vues comme parties reconnaissables dans des algèbres partielles ;
- l'étude d'algorithmes de typage et de sous-typage fondés sur des techniques de réécriture.

### 3 Actions de recherche

#### 3.1 Systèmes de transitions concurrents et dualités

*Participants* : Éric Badouel, Luca Bernardinello, Philippe Darondeau, Boubakar Gamatié, Gilles Lesventes, Vincent Schmitt

Le problème de synthèse de réseaux consiste à décider, pour un graphe ou un système de transitions donné, s'il est isomorphe au graphe de marquage d'un réseau, et à construire ce réseau. Ce problème a été résolu dans les dernières années pour diverses classes de réseaux, allant des réseaux élémentaires aux réseaux de Petri en passant par les réseaux trace, une famille de réseaux que nous avons définie afin de rendre compte de la concurrence dans les spécifications opérationnelles à la Plotkin [1]. Le principe de résolution général qui a été proposé par Ehrenfeucht et Rozenberg consiste à caractériser les sous-ensembles du graphe, ou régions, qui représentent des extensions possibles de places du réseau à construire. Une région peut être vue comme une propriété, satisfaite par les noeuds ou états qu'elle contient, et qui est uniformément validée, invalidée, ou laissée inchangée par toutes les occurrences de chacune des actions qui étiquettent les arcs du graphe. Un noeud du graphe, vu comme l'ensemble des propriétés qu'il satisfait, représente alors l'un des marquages du réseau associé. Dans le cas des réseaux de Petri, où les marquages sont des multi-ensembles de places, les régions d'un graphe sont des multi-ensembles de noeuds du graphe, sur lesquels chacune des actions opère de façon uniforme. Nous appelons ces régions des régions généralisées, par opposition aux régions élémentaires. La complexité apparente des diverses formes du problème de synthèse est exponentielle, et aucune des optimisations apportées jusqu'à présent à la synthèse des réseaux élémentaires n'a conduit à des algorithmes polynomiaux. Luca Bernardinello a montré que les régions élémentaires d'un graphe, ordonnées par inclusion, forment une structure d'algèbre de Boole partielle (au sens de la logique quantique). Il est peu probable que cette structure algébrique pauvre ait un intérêt algorithmique. Luca Bernardinello

a aussi montré que les régions généralisées d'un graphe, fortement reliées aux distances synchroniques qui y sont définies, forment un module de dimension finie sur l'anneau entier [7]. Eric Badouel, Luca Bernardinello et Philippe Darondeau, s'inspirant des travaux précédents, ont construit deux algorithmes qui résolvent en temps polynomial les problèmes de synthèse de réseaux de Petri bornés (c.a.d. dont l'ensemble des marquages accessibles est fini) à partir d'automates finis et à partir de langages réguliers (donnés par des expressions spéciales) [6]. Afin d'obtenir ces résultats, nous avons montré que les régions généralisées d'un graphe peuvent être redéfinies de façon équivalente comme des fonctions de l'ensemble des actions dans les entiers relatifs, mesurant l'effet de ces actions sur les multi-ensembles de noeuds ou d'états considérés précédemment. L'intérêt majeur de cette nouvelle définition est de conduire au cadre classique de l'algèbre linéaire pour le calcul de la base du module des régions d'un graphe. Son avantage secondaire est de s'appliquer aussi bien à des langages qu'à des graphes. Dans le cas de langages réguliers, le module des régions est caractérisé par un système d'équations déduites des sous-expressions itérées par l'opération de Kleene (la forme spéciale des expressions assure que le nombre des équations reste polynomial). Dans le cas de graphes ou d'automates, les équations sont posées en s'appuyant sur la construction préalable d'une base de cycles du graphe. Dans les deux cas, la solution du problème de synthèse (consistant pour un langage à décider s'il s'agit du langage d'un réseau et à le construire) passe par la résolution de systèmes d'inégalités linéaires dans les rationnels. Eric Badouel, Luca Bernardinello et Philippe Darondeau ont aussi commencé un travail visant à montrer que les correspondances entre automates et réseaux étudiées jusqu'à présent reposent toutes sur l'existence d'un objet schizophrène, ou paire d'objets *classifiants* formée d'un automate et d'un réseau construits sur le même ensemble (de transitions pour l'automate, de places pour le réseau), tels que le dual d'un objet (de l'une ou l'autre des deux catégories) puisse être caractérisé par un ensemble de morphismes vers l'objet classifiant correspondant.

Les techniques présentées ci-dessus donnent le moyen de construire un système parallèle de comportement donné lorsque ce comportement peut être spécifié par un langage régulier ou par un système de transitions fini. Ces cas d'applications se rencontrent dans les protocoles de communication et dans les systèmes à événements discrets.

### 3.2 Domaines d'événements reconnaissables

*Participants* : Éric Badouel, Philippe Darondeau, Jean-Claude Raoult

Les travaux de Stark et Winskel permettent de construire une correspondance entre automates trace et structures d'événements à conflits binaires, ou plus exactement entre automates trace et domaines d'événements. De fait, les trois axiomes C, R et V qui caractérisent les domaines d'événements (dans la classe des domaines de Scott finitaires) expriment exactement l'existence d'un alphabet concurrent susceptible d'étiqueter les intervalles premiers d'un domaine d'événements, afin de le transformer en automate trace. Réciproquement, l'ensemble des classes de mots équivalents par permutations (de lettres concurrentes) acceptés par un automate trace forme un domaine d'événements lorsqu'on le munit de l'ordre préfixe modulo permutations. E. Badouel, Ph. Darondeau et J.-C. Raoult ont montré que tout domaine d'événements dont le diagramme de Hasse est un graphe régulier (c.à.d. défini par grammaire déterministe de graphes) est reconnaissable (c.à.d. engendré par un automate trace fini). Ce résultat a été complété par la construction d'une procédure capable de décider, à partir d'une grammaire de graphes arbitraire, si le graphe engendré par cette grammaire est bien le diagramme de Hasse d'un domaine d'événements.

Les techniques présentées ci-dessus permettent par exemple de décrire par un automate fini l'allocation des processeurs aux divers pas de calcul d'un processus parallèle.

### 3.3 Graphes réguliers et bisimulation

*Participants* : Didier Caucal

D. Caucal étudie de façon générale les graphes réguliers et leurs bisimulations. Il a tout d'abord donné une nouvelle caractérisation de la bisimulation dans les graphes (quelconques), en montrant que deux sommets d'un graphe sont bisimilaires si et seulement si chacun des deux arbres qu'ils engendrent par dépliage du graphe peut être obtenu par suppression simultanée de sous-arbres adjacents identiques dans un troisième arbre (arbitraire). Il a par ailleurs poursuivi son travail sur la bisimulation dans les graphes de transitions de grammaires algébriques

et d'automates à pile [3]. En ce qui concerne les graphes de transitions préfixes selon des grammaires algébriques, D. Caucal a montré que la bisimulation dans ces graphes est une relation rationnelle. Ce résultat a été établi en s'appuyant sur le fait que la bisimulation dans les graphes grammaticaux est une congruence finiment engendrée, fait qui a été prouvé par Christensen, Hüttel et Stirling, et qui leur a permis d'étendre à toutes les grammaires le résultat de décision de la bisimulation obtenu initialement par Baeten, Bergstra et Klop pour les seules grammaires réduites. En ce qui concerne les graphes de transitions des automates à pile, c.a.d. les graphes réguliers de degré fini, D. Caucal a montré que la bisimulation peut encore être décidée par une généralisation de la méthode de Baeten, Bergstra et Klop si l'on se restreint aux graphes réguliers par norme croissante (qui sont une extension stricte des graphes de transitions préfixes selon les grammaires algébriques réduites). Le problème de décision de la bisimulation reste posé pour les graphes d'automates à pile arbitraires. Ce problème a été résolu positivement par Romanovskii pour les graphes d'automates à pile déterministes temps-réel (ou graphes déterministes réguliers de degré fini).

Ces travaux sur la décision de la bisimulation visent à permettre la vérification automatisée de systèmes de transitions infinis représentant des programmes réactifs à mémoire non bornée.

### 3.4 Algèbres partielles

*Participants* : Didier Caucal, Jean-Claude Raoult

Étant donné un ensemble  $F$  d'opérations avec arités, la structure de  $F$ -algèbre libre est bien connue : c'est celle des arbres étiquetés par  $F$ . Comme dans le cas des mots, les ensembles d'arbres reconnaissables au moyen d'automates finis ont une théorie du second ordre monadique décidable. D. Caucal et J.-C. Raoult étudient une autre structure de  $F$ -algèbres, celle des algèbres dans lesquelles les opérations de  $F$  ne sont pas partout définies, ou  $F$ -algèbres partielles. Ces algèbres partielles et leurs morphismes permettent de définir des ensembles reconnaissables plus généraux que les ensembles reconnaissables des  $F$ -algèbres libres, avec les mêmes propriétés de stabilité (par opérations booléennes et par projection). Dans un premier temps, D. Caucal et J.-C. Raoult se limitent aux  $F$ -algèbres partielles dans lesquelles toutes les opérations de



$F$  sont d'arité un, ce qui correspond à une généralisation des automates déterministes incomplets sur les mots. Les ensembles reconnaissables (de mots ou de  $n$ -uples de mots) qui sont alors obtenus forment une famille intermédiaire entre la famille des ensembles rationnels et celle des ensembles reconnaissables au sens classique. Les relations synchronisées à gauche (ou à droite) deviennent ainsi des relations reconnaissables. Ces relations reconnaissables sont stables par opérations booléennes et par projection. On peut donc y décider du vide et de l'inclusion, et par suite, la théorie du premier ordre de l'appartenance à ces parties est décidable. En étendant l'étude à des  $F$ -algèbres où les opérations sont d'arité quelconque, on peut espérer retrouver certaines sous-familles des relations rationnelles précédemment considérées par J.-C. Raoult (J.-C. Raoult, «Recursively defined tree-transductions», *Proc.RTA '93*, LNCS690,1993,p.343-357), et en particulier les «GTT transductions» de Dauchet et Tison.

### 3.5 Algèbres logiques et applications

*Participant* : Annie Foret

La notion de sous-type apparaît dans de nombreux langages de programmation, et suscite des travaux dans différents cadres tels que la méthodologie objet et la programmation fonctionnelle. A. Foret a étudié certaines formalisations de relations de sous-typage dans le cadre du lambda-calcul, et notamment les systèmes avec des types intersection et union proposés en 1991 par B. Peirce ou F. Barbanera et M. Dezani-Ciancaglini. Elle poursuit l'étude des correspondances possibles entre ces systèmes de sous-typage et les systèmes de logique modale, afin d'obtenir pour les expressions de types des représentants canoniques définis par systèmes de réécriture.

## 4 Actions nationales et internationales

### 4.1 Actions nationales

Participation de É. Badouel, D. Caucau, Ph. Darondeau et J.-C. Raoult au PRC Modèles et preuves de systèmes parallèles et distribués (coordonnateur : Joffroy Beauquier).

## 4.2 Actions internationales

Participation au programme HCM dans les domaines de la sémantique des langages de programmation et de leur mise en oeuvre.

Participation de É. Badouel, Ph. Darondeau et V. Schmitt au projet Science Mask (coordinateur : J.W. de Bakker).

Participation de É. Badouel, Ph. Darondeau et V. Schmitt au réseau HCM Express (coordinateur : F. Vaandrager).

Participation de D. Caucal et J.-C. Raoult au projet Esprit Bra Asmics (coordinateur : J. Sakarovitch).

Participation de J.-C. Raoult au groupe de travail Semagraph (coordinateur : M.-R. Sleep).

Association de J.-C. Raoult au projet Esprit Bra Compugraph (coordinateur : H. Ehrig).

## 5 Diffusion des résultats

### 5.1 Participations à des conférences et séminaires

É. Badouel, Dualités entre réseaux et automates induites par objets schizophréniques, séminaire LIENS, Paris (France).

É. Badouel et V. Schmitt, On dualities between nets and automata, Mask meeting, Rennes (France).

Luca Bernardinello, On Synchronic and Enlogic Structure of Transition Systems, Caliban open workshop, Zaragoza (Spain).

D. Caucal, Efficient transformations of context-free grammars, Dagstuhl-Seminar, Dagstuhl (Allemagne).

D. Caucal, Bisimulation of context-free grammars and of pushdown automata, Workshop «Three days of bisimulation», CWI, Amsterdam (Hollande).

D. Caucal, Bisimulation of regular graphs, séminaire, université de Passau (Allemagne).

D. Caucal, On the prefix transition graphs of rewriting systems, Asmics Meeting, La Briantais (France).

D. Caucal, Bisimulation of prefix transition graphs, Concur2 Meeting, Stockholm (Suède).

Ph. Darondeau, On the recognizability of context free event domains, Express meeting, CWI, Amsterdam (Hollande).

Ph. Darondeau, A polynomial algorithm for synthesizing bounded nets from regular expressions and finite automata, IFIP WG 2.2 meeting, San Miniato (Italie).

## 5.2 Organisation de colloques

Ph. Darondeau a organisé un colloque du projet Mask sur les dualités, qui s'est tenu à l'Irisa en Avril 94.

J.-C. Raoult a organisé un colloque du projet Asmics, qui s'est tenu à La Briantais en Septembre 94.

## 6 Bibliographie du projet

### Articles et chapitres de livre

- [1] E. BADOUEL, P. DARONDEAU, «Trace Nets and Process Automata», *Acta Informatica*, 1994, à paraître.
- [2] D. CAUCAL, D. HUYNH, L. TIAN, «Branching bisimulation for context-free processes», *Information and Computation*, 1994, à paraître.
- [3] D. CAUCAL, *Bisimulation of context-free grammars and of pushdown automata*, CSLI Lecture Notes (Stanford University), 1994, à paraître.
- [4] A. FORET, P. FRESNAIS, «Évaluation comparative d'algorithmes de normalisation des schémas relationnels», *Ingénierie des systèmes d'information*, 1994, à paraître.

### Communications à des congrès, colloques, etc.

- [5] J.-C. RAOULT, F. VOISIN, «Set-theoretic graph rewriting», in: *Proceedings Graph Transformations in Computer Science, 776*, Springer-Verlag, Lecture Notes in Computer Science, p. 312–325, 1994.

## Rapports de recherche et publications internes

- [6] L. BERNARDINELLO, E. BADOUEL, P. DARONDEAU, «Polynomial algorithms for the synthesis of bounded nets», *rapport de recherche n°847*, Irisa, 1994.
- [7] L. BERNARDINELLO, G. D. MICHELIS, K. PETRUNI, «Synchronic distances as Generalized Regions», *rapport de recherche n°107-93*, Dipartimento di Scienze dell'Informazione, Università degli Studi di Milano, 1993.

## 7 Abstract

We study effective correspondences between concurrent automata, nets, event structures, and domains of configurations. These relations may be used for defining the semantics of non sequential programming languages, for measuring their expressive power, and for characterizing their subsets adequate to automated verification techniques. We study graphs associated with rewriting systems, their reductions, and their decidable properties. The results may be applied to functional programs defined by recursive program schemes, and to non-deterministic programs defined by grammars or automata. Finally, we study some applications of rewriting to logics and graphs.

Scientific Context:

- Concurrent transition systems.
- Bisimulations, graphs, and rewriting.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Composition de l'équipe</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Présentation générale et objectifs</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Actions de recherche</b>	<b>3</b>
3.1	Systèmes de transitions concurrents et dualités . . . . .	3
3.2	Domaines d'événements reconnaissables . . . . .	5
3.3	Graphes réguliers et bisimulation . . . . .	5
3.4	Algèbres partielles . . . . .	6
3.5	Algèbres logiques et applications . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Actions nationales et internationales</b>	<b>7</b>
4.1	Actions nationales . . . . .	7
4.2	Actions internationales . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Diffusion des résultats</b>	<b>8</b>
5.1	Participations à des conférences et séminaires . . . . .	8
5.2	Organisation de colloques . . . . .	9
<b>6</b>	<b>Bibliographie du projet</b>	<b>9</b>
<b>7</b>	<b>Abstract</b>	<b>10</b>