

Rapport INRIA 1994 — Programme 2
Parallélisme, Synchronisation et Temps-Réel

PROJET MEIJE

3 mai 1995

PROJET MEIJE

Parallélisme, Synchronisation et Temps-Réel

Localisation : *Sophia-Antipolis*

Mots-clés : automate (10), bisimulation (3, 10), causalité (7), circuit numérique (7), compilation (7), concurrence (1, 3, 10), coopération (1, 10), expérimentation d'algorithme (10), interface graphique (10), lambda-calcul (3), langage fonctionnel (1, 3), langage synchrone (1, 7), MEIJE (1, 10), modélisation (3), optimisation de code (7), parallélisme asynchrone (1, 3, 10), protocole de communication (10), réactivité (1, 7), réécriture (10), sémantique (1, 3, 7, 10), spécification formelle (10), synchronisation (1, 3, 10), système de transition (10), temps réel (1, 7), vérification de programme (1, 3, 10).

1 Composition de l'équipe

Responsables scientifiques

Robert de Simone, directeur de recherches, Inria

Gérard Berry, directeur de recherches, Ecole des Mines de Paris

Responsable permanent

Gérard Boudol, directeur de recherches, Inria

Secrétaires

Gisèle Zimol, Inria

Dominique Micollier, Ecole des Mines

Personnel Inria

Ilaria Castellani, chargée de recherches
David Geldreich, ingénieur de recherches depuis le 1er déc.
1994
Eric Madelaine, chargé de recherches
Annie Ressouche, chargée de recherches
Davide Sangiorgi, chargé de recherches depuis le 1er déc. 1994

Personnel Ecole des Mines de Paris

Frédéric Boussinot, maître de recherches
Maurice Gherardi, ingénieur de recherches Armines jusqu'au
15 août 1994
Valérie Roy, chargée de recherches
Jean-Marc Tanzi, maître-assistant

Chercheurs invités

Edward Lee, University of California at Berkeley, depuis le
1er septembre 1994

Ingénieurs experts

Amar Bouali, depuis le 1er août 1994
Tom Shiple, du 1er août au 30 septembre 1994

Chercheurs post-doctorants

Cosimo Laneve, jusqu'au 1er novembre 1994
Christian Rétoré, jusqu'au 1er octobre 1994

Chercheurs doctorants

François-Xavier Fornari, boursier Inria
Monica Lara de Souza, boursière gouvernement brésilien
Karima Machane, boursière CIES depuis le 1er décembre
1994
Frédéric Mignard, boursier Ecole des Mines de Paris
Olivier Ploton, boursier Ecole Polytechnique
Horia Toma, boursier Ecole des Mines de Paris

Chercheurs extérieurs

Roberto Amadio, chercheur CNRS I3S, depuis le 1er nov.
1994

Autres personnels

Wendell Baker, Conseiller scientifique (2 mois)
Silvano Dal-Zilio, ENS Lyon, stagiaire DEA

2 Présentation du projet

Le projet “Parallélisme, Synchronisation et Temps Réel” est un projet commun INRIA-Ecole des Mines à Sophia-Antipolis. Ses activités s’articulent autour de trois thèmes:

- L’étude et la modélisation algébrique des concepts théoriques liés aux systèmes et langages parallèles et répartis;
- L’étude plus spécifique du domaine des formalismes réactifs synchrones, et surtout le développement du langage Esterel et de ses modèles sémantiques;
- Le développement d’outils d’analyse et de vérification automatique de programmes inspirés des deux thèmes précédents.

3 Actions de recherche

3.1 Sémantique des langages concurrents et fonctionnels

Participants :

Gérard Boudol, Ilaria Castellani, Silvano Dal-Zilio, Cosimo Laneve, Christian Retoré

Notre travail sur le “parallélisme vrai” s’est concentré sur l’étude du formalisme que nous avons proposé ces dernières années pour rendre compte de la répartition spatiale des processus (notion de localité). Dans le domaine du “parallélisme d’ordre supérieur”, nous avons approfondi notre travail sur le problème de l’implémentation optimale des langages fonctionnels (problème du partage et de l’évaluation parallèle dans le λ -calcul), et nous avons entrepris une étude systématique des relations entre parallélisme et calcul fonctionnel.

3.1.1 Parallélisme vrai

Participants : Gérard Boudol, Ilaria Castellani

L'objectif de la recherche en “parallélisme vrai” est de trouver de bons modèles pour l'implémentation du parallélisme, et de fournir des méthodes d'analyse et de vérification plus fines que les méthodes désormais classiques de réduction de systèmes de transitions. Ce dernier point, qui fait aussi l'objet de recherches décrites en 3.3.2 se révèle beaucoup plus ardu qu'on n'aurait pu l'imaginer.

Nous avons développé depuis quelques années une nouvelle manière de traiter le problème du “parallélisme vrai”, fondée sur la notion de *localité*: l'idée est de rendre observable, dans une certaine mesure, la répartition spatiale d'un système parallèle, en nommant les sites dans lesquels se produisent des actions. Ce faisant, nous pouvons distinguer de manière très fine des systèmes dont le comportement global est similaire mais dont la structure de parallélisme est différente.

Nous avons en fait proposé diverses formalisations possibles de cette idée. Nous avons montré que ces diverses approches coïncident, c'est à dire qu'elles donnent la même vision sémantique des systèmes parallèles. Ceci fait l'objet du rapport [10], soumis à un journal pour publication. Il faut noter que la formalisation la plus intuitive et naturelle de la distribution spatiale, qui consiste à attribuer à chaque composant d'un système parallèle une localité, indépendamment de son comportement, semble la mieux appropriée à des fins de vérification. On peut en fait utiliser cette notion de localité d'autres manières que nous ne l'avons fait. En effet, elle devrait permettre de définir des vues “locales” d'un système, et ceci est bien dans l'esprit de ce que nous faisons dans les outils de vérification, avec la notion de “critère d'abstraction” en particulier.

3.1.2 Parallélisme et ordre supérieur.

Participants : Gérard Boudol, Ilaria Castellani, Silvano Dal-Zilio, Cosimo Laneve, Christian Retoré

Il y a deux points principaux dans cette recherche, qui se fait dans le cadre du BRA CONFER. Le premier est l'étude du parallélisme potentiel dans l'évaluation des programmes fonctionnels et de la question de l'évaluation optimale. Le second est l'étude des relations entre programmation fonctionnelle et programmation parallèle, et donc de l'intégration

de ces deux paradigmes (c'est le thème central de CONFER). Nous abordons ces questions à travers les modèles mathématiques fournis par le λ -calcul et le π -calcul. Ces modèles sont à la base de prototypes de langages, comme FACILE (développé à l'ECRC, en partie dans le cadre de CONFER).

La formalisation de la notion d'évaluation optimale, due à J.-J. Lévy, date de 1978, mais c'est seulement récemment que l'on a trouvé une structure de données permettant de l'implémenter. Toutefois prouver la correction d'une telle implémentation est une tâche qui est loin d'être facile. Rappelons brièvement le problème: Lévy a défini la notion de "famille de radicaux", une famille représentant toutes les duplications, dans la syntaxe d'un programme, de ce qui ne devrait être qu'une seule "instruction élémentaire". Le problème de l'implémentation optimale consiste à trouver une structure où chaque famille a un représentant unique. On réduit donc ainsi une évaluation parallèle, calculant simultanément tous les membres d'une même famille, à une évaluation partagée où ce calcul en famille se fait en une seule étape. Nous avons montré que cette notion de famille admet en fait plusieurs caractérisations équivalentes, la plus remarquable étant en termes de chemins dans un λ -terme [5]. On peut ainsi, sans calculer ni transformer ce terme (en "graphe de partage" par exemple) y repérer les familles. Cette caractérisation permet de mieux comprendre l'implémentation optimale par les graphes de partage de Lamping et Gonthier, et d'en montrer la correction. Le résultat central de [5] se situe à la confluence de plusieurs domaines, notamment celui de la logique linéaire et de la géométrie de l'interaction de J.-Y. Girard.

Le travail de Cosimo Laneve, en collaboration avec Andrea Asperti de l'Université de Bologne, sur les "systèmes d'interaction" a pris une forme achevée cette année (articles acceptés dans les revues "Mathematical Structures in Computer Science" et "Theoretical Computer Science"). Notons toutefois la recherche faite pour généraliser la notion de famille de radicaux à ces systèmes, qui fait l'objet de l'article [6].

L'objectif de l'étude systématique des relations entre parallélisme et calcul fonctionnel est de comprendre comment réussir une intégration entre ces deux paradigmes de calcul. En particulier, la programmation fonctionnelle offre l'avantage de mettre en œuvre des concepts mathématiquement très bien compris, en apportant des éléments de sécurité comme l'inférence de types polymorphes. On sait que le calcul

parallèle est loin d'être aussi bien maîtrisé, en particulier à cause du non-déterminisme de l'évaluation, et de l'absence d'une bonne notion de type. Un premier problème est donc de déterminer ce qui "survit" de l'harmonie du monde fonctionnel lorsqu'on le plonge dans un univers parallèle.

Nous abordons cette question à travers les modèles théoriques fournis respectivement par le λ -calcul et le π -calcul (il s'agit donc pour le moment de modèles non typés). Nous avons introduit pour ce faire un raffinement du λ -calcul fondé sur l'idée de multiplicité. Quoique rien ne soit encore officiellement publié, nous avons obtenu cette année une série de résultats très significatifs. Le λ -calcul avec multiplicités, tout en restant très proche du modèle fonctionnel, introduit des phénomènes nouveaux, typiques du parallélisme, comme la possibilité de blocage de l'évaluation, ou le non-déterminisme. Nous avons particulièrement étudié cette année un sous-ensemble de ce calcul, où l'évaluation reste strictement déterministe, mais avec possibilité de blocage. Plusieurs scénarios sémantiques sont envisageables, selon les rôles respectifs attribués aux résultats possibles de l'évaluateur: non-terminaison, blocage ou terminaison sur une valeur. Nous montrons en particulier qu'en ce qui concerne les programmes fonctionnels (i.e. les λ -termes), le fait de les plonger dans le π -calcul n'a pas plus de conséquences que de les considérer dans un univers où les ressources sont limitées. Cela signifie par exemple que le non-déterminisme n'affecte pas réellement les programmes fonctionnels, qui sont donc plus "robustes" qu'on ne pouvait l'imaginer. Nous avons aussi caractérisé la sémantique des λ -termes à l'intérieur du calcul avec multiplicités, en utilisant la représentation fournie par les arbres de Lévy-Longo.

Nous poursuivons par ailleurs l'étude de la sémantique dénotationnelle du λ -calcul avec multiplicités (c'est l'objet du travail de thèse de Carolina Lavatelli au LIENS, sous la direction de G. Boudol). Comme nous l'avons mentionné l'année passée, ce travail repose sur une notion de type plus fine que la notion habituelle, qui a quelques similarités avec la logique linéaire de J.-Y. Girard. Cette étude renforce l'idée que le calcul avec multiplicités est en fait beaucoup plus proche des modèles fonctionnels que des modèles parallèles – quoiqu'il permette de caractériser, comme nous l'avons vu, l'"impact" du parallélisme sur le modèle fonctionnel.

En relation avec le système de type que nous avons donné pour le λ -calcul avec multiplicités, Ch. Retoré a étudié le résultat classique qui relie la propriété de terminaison forte au typage dans le système avec intersection de types. Il a montré que ce résultat se ramène en fait à un autre, bien connu, qui concerne la déduction naturelle en logique intuitionniste [12]. Il a également donné une nouvelle caractérisation de la correction d'un "réseau de preuve" en logique linéaire, en utilisant un critère sémantique.

Un dernier point à mentionner ici concerne le travail de stage de DEA de S. Dal-Zilio. Nous lui avons proposé d'étudier les "structures d'actions" proposées par Milner. Il s'agissait en particulier de voir si cette notion permettait de rendre compte de la sémantique "vraiment parallèle" du π -calcul, définie en utilisant les travaux sur l'équivalence par permutations. Ce travail est naturellement de caractère préliminaire.

3.2 Esterel et la programmation réactive synchrone

Participants :

Gérard Berry, Frédéric Boussinot, François-Xavier Fornari, Maurice Gherardi, Edward Lee, Frederic Mignard, Olivier Ploton, Jean-Marc Tanzi

L'activité sur Esterel s'est concentrée sur le développement du compilateur Esterel v4, l'étude d'optimisations pour l'implantation matérielle ou logicielle du langage, et l'étude de nouvelles techniques de compilation causale. Ces études ont permis de supprimer les deux gros obstacles à la compilation des programmes Esterel par les versions précédentes, l'explosion en taille et les difficultés liées à la causalité. Le nouveau compilateur est distribué aux universitaires et centres de recherches et en cours de test chez Dassault Aviation.

3.2.1 Le compilateur ESTEREL V4

Participants : Gérard Berry, Frederic Mignard

Le compilateur Esterel V4 est fondé sur une traduction de la partie contrôle des programmes Esterel en systèmes d'équations booléennes, qui sont ensuite optimisés et implantés soit en matériel soit en logiciel.

Sur le plan théorique, le travail principal a consisté en la preuve formelle de correction de ce compilateur par rapport à la sémantique du langage. Ceci a fait l'objet de la thèse de Frédéric Mignard [1]. Sur le plan pratique, nous avons diffusé une version stabilisée du compilateur, ainsi que des versions notablement améliorées d'autres processeurs de l'environnement (débugueurs symboliques).

3.2.2 Etude fine de la causalité

Participants : Gérard Berry, Olivier Ploton, Tom Shiple

Si le compilateur Esterel v4 évite les problèmes d'explosion en taille que l'on connaissait avec la version précédente, il est peu tolérant vis-à-vis des problèmes de causalité, et rejette comme non compilable des programmes qui compilaient en Esterel v3. Ceci s'est avéré plus gênant que prévu pour les utilisateurs. En exploitant des résultats récents sur le comportement des circuits cycliques et en les reliant à des considérations de logique intuitioniste, nous avons pu définir une notion de causalité exacte pour les programmes Esterel et implanter deux types d'algorithmes exploitant cette notion: un interprète qui réalise efficacement le calcul des réactions du programme mais peut s'arrêter à l'exécution en détectant un problème de causalité, et un compilateur causal qui réalise une analyse complète et exacte du comportement causal d'un programme à la compilation et produit un circuit équivalent mais sans cycles. Ce nouveau module de compilation a été écrit par Tom Shiple dans le contexte d'une coopération informelle avec la société DEC-Prl, en utilisant la bibliothèque TiGeR de graphes de décision binaires (BDD). Par ailleurs des explorations basées sur d'autres variantes intéressantes de l'approche, menées par Olivier Ploton, ont conduit à un autre prototype de compilateur.

3.2.3 Interface avec les systèmes de synthèse et optimisation de circuits

Participants : Gérard Berry, François-Xavier Fornari, Olivier Ploton

Nous avons interfacé nos outils avec des systèmes de CAO de matériel [8], afin de bénéficier de leurs procédures d'optimisation ou de synthèse. Les procédures d'optimisation proviennent principalement du système *Sis* de U.C. Berkeley, et les travaux que nous avons effectués en commun

avec H. Touati de Digital PRL sont maintenant diffusés dans le système sis-1.2 de l'U.C. Berkeley. Les expériences menées sur de gros exemples ont montré un gain très appréciable dans la taille du code produit, aussi bien pour la génération de circuits que pour l'implantation logicielle en C. Nous avons continué la synthèse de circuits à partir d'Esterel complet en utilisant le système Olympus de Stanford. La relative fragilité de ce système imposera de passer par VHDL si nous voulons continuer dans ce domaine; malheureusement, les systèmes de synthèse comportementale dont nous aurions besoin (Synopsys) ne sont pas encore diffusés aux universitaires.

3.2.4 Esterel et les systèmes distribués

Participants : Gérard Berry, Maurice Gherardi

En 1991, nous avons défini le langage CRP (Communicating Reactive Processes) qui unifie Esterel et CSP / OCCAM. Ce langage a été implanté dans le cadre d'un contrat MESR avec Cisi Ingénierie et Dassault Aviation, avec la collaboration du Tata Institute (TIFR) de Bombay. Dans le même contrat, nous avons réalisé la distribution de code objet Esterel sur réseau asynchrone en adaptant le processeur oc2rep développé par P. Caspi et A. Girault à Grenoble (projet SPECTRE).

3.2.5 Esterel et Ptolemy

Participant : Edward Lee

A l'occasion de la visite d'Edward Lee (U.C. Berkeley), nous avons étudié l'immersion de modules Esterel comme composants du système Ptolemy, qui est un environnement de conception et de programmation modulaire de systèmes "flot de données" pour le traitement du signal. Des contacts avec Frédéric Boulanger (Supelec) ont permis d'élargir cette intégration des deux systèmes. La visite d'Edward Lee a été par ailleurs pour lui l'occasion de confrontations et de discussions avec de nombreux acteurs du domaine de la programmation synchrone en France, tant académiques qu'industriels.

3.2.6 Programmation par Objets Réactifs

Participant : Frédéric Boussinot

Dans le cadre de la poursuite d'un contrat avec le CNET portant sur la programmation par objets réactifs, nous avons étudié les points suivants :

- La sémantique du modèle a été exprimée d'une part dans le formalisme de "Machine Abstraite Chimique" (CHAM), d'autre part en π -calcul; nous avons prouvé l'adéquation entre la vision abstraite fournie par la CHAM et la vision plus concrète du π -calcul.
- Nous avons réalisé un premier prototype d'implémentation des objets réactifs en Reactive C. Plusieurs expérimentations d'introduction de nouvelles primitives à travers des traitements d'exemples sont actuellement menées.
- Une présentation globale de l'approche réactive des systèmes parallèles a été rédigée; elle décrit RC et diverses implémentations réalisées autour de ce langage, en particulier celle du modèle des Objets Réactifs.

3.3 Vérification et analyse de systèmes répartis

Participants :

Amar Bouali, Monica Lara de Souza, Eric Madelaine, Annie Ressousche, Valérie Roy, Robert de Simone

Les efforts dans cette activité ont porté principalement sur l'étude de techniques de représentation efficaces permettant de traiter des cas d'applications plus importantes, et de l'algorithmique associée. Les méthodes implicites et les représentations *partielles* d'automates en particulier ont été abordées dans le contexte des équivalences de processus.

Des développements logiciels ont été poursuivis sur les outils existants, et la diffusion de nouveaux modules a été initiée. Nos outils forment maintenant assez largement le socle de l'activité de développement d'outils concerté dans le projet Esprit BRA Concur2.

3.3.1 Vérification par méthodes implicites et BDD

Participants : Amar Bouali, Robert de Simone

Nous avons principalement exploité nos résultats antérieurs sur l'utilisation des diagrammes de décision binaire pour le calcul effectif d'équivalence par bisimulation. L'implantation d'une première version complète d'Hoggar a été menée à terme, et adaptée à un format commun de représentation de réseaux de processus algébriques (FC2 réseaux). Comme toujours dans le cas des BDD, de nombreuses optimisations algorithmiques peuvent encore être envisagées, mais leur évaluation demandera un effort important d'expérimentation. Une interface conviviale a été réalisée. Elle permet en particulier une visualisation a posteriori de l'évolution des tailles des structures internes.

3.3.2 Vérification par automates d'ordre partiel

Participants : Monica Lara de Souza, Robert de Simone

Dans le cadre de la représentation explicite d'automates globaux comme modèles expansés de processus parallèles, on peut penser limiter l'explosion combinatoire en n'incluant pas tous les ordonnancements possibles de comportements indépendants. Toutefois cette entreprise se révèle vite bien plus complexe qu'il n'y paraît, en particulier dans le cas où les comportements omis peuvent être non-déterministes, ce qui crée une ambiguïté sur les reconvergences. Nous avons étudié dans [11] ces phénomènes et dressé un bilan des réductions possibles, basé sur une panoplie de contre-exemples génériques. Néanmoins ces difficultés théoriques laissent percevoir des possibilités d'application efficace de ces méthodes dans des cas précis (quand seuls des comportements déterministes sont éliminés par exemple). Nous envisageons l'implantation d'une maquette pour expérimenter cette approche.

3.3.3 Bisimulation multi-transitions

Participants : Carsten Rhod Gregersen, Jens Lohmann-Hansen, Robert de Simone

Dans certaines modélisations étendues d'algèbres de processus prenant en compte des aspects supplémentaires des systèmes (probabilité,

données ...) on peut être amené à introduire des bisimulations plus complexes comme équivalences naturelles de comportement. C'est aussi le cas pour Esterel, dans lequel les comportements notifiés sont en fait des ensembles de comportements effectifs: les signaux non testés peuvent survenir ou non dans une transition donnée sans modifier la réaction [9]. La nature de ces nouvelles bisimulation est de non plus comparer les transitions une à une, mais bien un ensemble de transitions (possibles à partir d'un état) contre un autre ensemble (d'un état différent). Comme exemple, un système peut effectuer un certain comportement de plusieurs façons avec une probabilité cumulée qui recouvrira un seul comportement identique d'un autre système avec cette même probabilité.

Dans le cadre d'un stage de deux étudiants danois nous avons étudié les implications algorithmiques de cette extension et nous avons débuté l'implantation d'une maquette. Les cas particuliers des langages Esterel et Weighted CCS (une extension probabiliste de CCS développée à Aalborg) ont été identifiés comme des particularisations privilégiées de l'approche.

3.3.4 PAC: compilateur d'algèbres de processus

Participants : Eric Madelaine, Annie Ressouche

Le système PAC (*Process Algebra Compiler*) est un outil produisant automatiquement des front-ends d'outils de vérification à partir de descriptions de syntaxe et de sémantique opérationnelle d'algèbres de processus. Le travail cette année a porté essentiellement sur l'extension du langage de spécification sémantique, permettant le traitement de langages de processus plus complets (comme une version de CCS avec spécification de priorités, et une syntaxe de Basic Lotos proche du langage complet).

3.3.5 Interfaces utilisateurs

Participants : Eric Madelaine, Amar Bouali

Nous avons développé à l'aide des outils Tcl/Tk des interfaces utilisateurs permettant un accès homogène à nos outils de vérification (Mauto, Hoggar, Atg, et autres outils développés par des partenaires européens).

L'interface TkMeije gère un espace d'objets FC2 (automates ou réseaux synchronisés) et des fonctions de transformation de ces objets (diverses réductions, etc). L'utilisateur peut créer et contrôler des serveurs de vérification, comme Mauto et Hoggar, qui fonctionneront en parallèle avec l'interface, éventuellement sur des machines différentes pour répartir la charge. Un protocole assure la communication asynchrone (messages de contrôle, transfert de données FC2), entre l'interface et les différents serveurs. L'ajout de nouveaux outils travaillant sur des objets FC2 est très simple. L'ajout de nouveaux serveurs demande simplement l'implantation du protocole (basé sur la technologie Tcl/Tk).

4 Actions industrielles

4.1 Collaborations sur Esterel avec Dassault Aviation

Elles s'inscrivent dans le contexte du futur projet Genie et de l'industrialisation d'Esterel. La société Dassault Aviation développe une activité importante d'utilisateur industriel pilote du langage et de ses extensions (ainsi que de l'environnement de développement). En dehors de la collaboration formelle décrite ci-après, des expériences avancées d'optimisation de programmes écrits chez Dassault ont été menées en commun avec nous et une équipe de DEC-Prl travaillant sur l'implantation de techniques BDD sur ces thèmes (voir section 3.2.3). Les fonctionnalités du logiciel TiGeR, développé à DEC-Prl et acquis par les autres partenaires, ont ainsi été testées et parfois augmentées. Des évaluations d'efficacité en vraie grandeur du compilateur Esterel et des techniques d'optimisation en ont en outre résulté.

Par ailleurs le développement dans le projet du nouveau compilateur à causalité fine décrit en 3.2.2 a été largement supporté par cette société.

4.2 Convention MESR Esterel-CRP

Participants : Gérard Berry, Maurice Gherardi

Ce contrat arrive à son terme fin 1994. Une implantation répartie complète a récemment été achevée. Elle permet de connecter un ensemble de programmes Esterel en un réseau asynchrone CRP, des modules étant connectés sur le mode du rendez-vous sur ports synchronisés suivant une topologie décrite par l'utilisateur. Une généralisation du protocole

sous-jacent pour admettre des synchronisations multiples (*multicast*) est envisagée.

4.3 Contrat CNET: Objets Réactifs

Participant : Frédéric Boussinot

L'activité technique sur ce contrat est rapportée en 3.2.6. Elle est menée en collaboration avec la société Soft Mountain.

5 Actions nationales et internationales

5.1 Actions nationales

Le projet participe au PRC-CNRS PRS (2 thèmes: langages synchrones et vérification), à l'action inter-PRC "Modèles et preuves de systèmes parallèles et répartis", ainsi qu'au PRC-CNRS "Modèles Logiques de la Programmation". Nous faisons également partie du Groupement C^2A Automatique et participons à ses réunions régulières, en particulier sur la définition de formats standard d'interface.

5.2 Actions internationales

Le projet participe à deux consortiums de recherche Esprit BRA: Concur2 et Confer.

La collaboration Concur2 porte sur les calculs de processus comme modèles algébriques de la concurrence. Elle traite de l'exploration de leur expressivité (absolue ou comparée), l'étude d'extensions (temps quantitatif, valeurs de données, probabilités...), la définition de méthodes de vérification et la réalisation d'outils intégrés sur ces calculs. Des réunions de travail semestrielles ont eu lieu à Brighton et Stockholm, auxquelles ont participé Robert de Simone, Eric Madelaine et Amar Bouali.

L'action Confer a pour objectif de rapprocher, d'un double point de vue théorique et pratique, la programmation fonctionnelle et la programmation parallèle. On y étudie des formalismes unifiant ces deux approches de la programmation, sur le plan de la syntaxe, de la sémantique opérationnelle, de la logique et de l'implémentation. Des réunions de travail semestrielles ont eu lieu à Munich et Londres, auxquelles ont participé

Gérard Boudol, Ilaria Castellani, Cosimo Laneve, Christian Retoré et Gérard Berry.

Dans le cadre du réseau HCM EXPRESS Robert de Simone s'est rendu à un séminaire interne à Amsterdam.

Le projet a accueilli la visite de plusieurs chercheurs: Wendell Baker, Edward Lee et Tom Shiple, tous trois de l'université de Berkeley, pour plusieurs mois chacun; Matthew Hennessy (Université de Sussex), Franco Barbanera (Université de Turin), Achim Jung (Université de Darmstadt), Thomas Ehrhard (LIENS), John Reynolds (CMU), et Doeko Bosscher (CWI) pour des périodes plus courtes.

Dans le contexte de deux collaborations Franco-Indiennes CEFIPRA (avec le Tata Institute de Bombay et le SPIC Science Fondation de Madras), nous avons reçu la visite de P.S. Thiagarajan, et de R.K. Shyamasundar et S. Ramesh. Robert de Simone, Gérard Boudol et Ilaria Castellani se sont rendus à Madras, et Gérard Berry à Bombay et Bangalore.

Nous avons reçu deux étudiants stagiaires de l'université d'Aalborg pour une période de quatre mois, sur le thème décrit en 3.3.3.

La collaboration NSF/INRIA "Automated Generation of Verification Tools", avec l'université de Caroline du Nord (NCSU, Raleigh, USA) s'est poursuivie. Eric Madelaine et Annie Resouche se sont rendus à Raleigh chacun pour une semaine, et en retour Rance Cleaveland et Steve Sims nous ont visités pendant 3 semaines.

Frédéric Mignard et Jean Marc Tanzi se sont rendus à Linköping (Suède) dans le cadre du projet Eureka SYNCHRON. Sur ce contrat également nous avons accueilli Wendell Baker, de U.C. Berkeley, qui a effectué la traduction en anglais et la relecture technique du document de définition des formats intermédiaires communs des langages de programmation synchrone.

COMITES DE PROGRAMME

Robert de Simone a fait partie du comité de programme de la conférence internationale CAV'94. Ilaria Castellani a fait partie du comité de programme de la conférence internationale STACS 95. Gérard Berry a fait partie du comité de programme de la conférence ESOP'94.

6 Diffusion des résultats

6.1 Enseignement

Gérard Boudol a assuré le cours d'option sur “lambda-calcul et parallélisme” dans le DEA IMA X/ENS (21h).

Valérie Roy assure l'enseignement du langage de programmation C++ à l'ISIA (30h), ainsi que l'encadrement des projets de programmation.

Amar Bouali participe aussi à l'enseignement ISIA, sur les constructeurs d'interface *Tcl/Tk* (12h) et pour l'encadrement des projets de programmation.

Gérard Berry enseigne le λ -calcul et les modèles de circuits digitaux à l'ISIA et à l'Ecole des Mines (35h).

Frédéric Mignard a encadré des séances de travaux dirigés à l'ESSI, à l'ISIA et à l'Ecole des Mines de Paris sur le langage Esterel (25h).

Olivier Ploton assure des fonctions de monitorat à l'ESSI (langage C et système UNIX) (64h).

Eric Madelaine a participé à un enseignement “Techniques et Outils de vérification” à l'ENST Paris (12h).

Nous avons en outre participé à la création du DEA “ Mathématiques discrètes et fondements de l'informatique” à l'université de Marseille.

6.2 Participation à des conférences et colloques

Gérard Boudol et Cosimo Laneve ont donné des séminaires sur le λ -calcul avec multiplicités à Paris, Marseille, Londres (*workshop Confer*), Nancy, Madras.

Cosimo Laneve a fait des exposés à la conférence TACS (Sendai), aux universités de Venise (calculs optimaux) et de Pise (λ -calcul avec multiplicités).

Christian Retoré a fait des exposés au *workshop Confer* de Munich, au Congrès Types à Marseille, au Séminaire de Logique de l'Université de Paris 7, au Séminaire CRIN-INRIA (Nancy), aux Journées de Logique et Linguistique de Grenoble, et au congrès de Caen (Catégories, Algèbres, Esquisses, et Néo-Esquisses).

Ilaria Castellani a fait un exposé sur “Causalité et distribution dans les processus parallèles” au LITP à Paris, et a donné un cours sur les Structures d’événements à l’Ecole d’été MOVEP à Nantes, dans le cadre de l’action inter-PRC “Modèles et preuves de systèmes parallèles et répartis”.

Robert de Simone a présenté un tutorial invité dans le cadre de la conférence Concur’94 à Uppsala, intitulé “Model-based methods in automatic verification of concurrent systems”, ainsi qu’une communication à la conférence CAV’94. Il a donné des séminaires sur l’utilisation de méthodes d’ordre partiel pour la vérification (*workshops* Esprit Concur2 et HCM Express). En collaboration avec Christophe Diot et Christian Huitema (projet RODEO), il a présenté une communication aux journées *Communicating Informatics and Distributed Systems* de Grenoble.

Gérard Berry a donné plusieurs conférences invitées: à MFPS’94 sur “Digital Circuits and 2-adic numbers”, à LICS’94 sur “Synchronous programming”, et à POPL’94 sur “Synchronous programming languages”.

Xavier Fornari a présenté une communication à “IFIP Workshop on Logic and Architecture Synthesis”.

6.3 Diffusion de produits

Nous diffusons Esterel gratuitement sous license INRIA/Ecole des Mines-/Armines aux institutions académiques et organismes de recherche. La version actuelle de distribution ne contient pas encore les nouveaux compilateurs causaux décrits en 3.2.2.

Nous diffusons également gratuitement sous license INRIA les outils de vérification Auto/Graph.

Le langage réactif RC est en domaine public.

Les documentations et autres informations sur ces logiciels sont disponibles par ftp sur le serveur **cma.cma.fr**, ou par e-mail (**esterel-request@cma.cma.fr** et **meijetools@cma.cma.fr**).

Une première version de démonstration de l’interface Tkmeije a été présentée aux conférences CAV (Stanford, Juin 1994) et CONCUR (Uppsala, Août 1994), et distribuée en Novembre à nos utilisateurs.

6.4 Autre

G erard Boudol a été rapporteur de l'Habilitation   diriger des recherches de R. Amadio (Nancy). Robert de Simone a été rapporteur de deux thèses d'Université. G erard Berry a été également rapporteur de plusieurs thèses d'Université.

7 Publications

Thèses

- [1] F. MIGNARD, *Compilation du langage Esterel en systèmes d'équations booléennes*, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 1994.

Articles et chapitres de livre

- [2] G. BOUDOL, I. CASTELLANI, M. HENNESSY, A. KIEHN, «A theory of processes with localities», *Formal Aspects of Computing 6*, 1994, p. 165–200.
- [3] G. BOUDOL, I. CASTELLANI, «Flow models of distributed computations: three equivalent semantics for CCS», *Information and Computation 114*, 1994, p. 247–314.
- [4] S. GNESI, E. MADELAINE, G. RISTORI, «An exercise in Protocol Verification», *in: Third Lotosphere Workshop and Seminar*, T. Bolognesi, E. Brinksma, et C. Vissers (r d.), Kluwer Publ., Pisa, 1994.

Communications   des congrès, colloques, etc.

- [5] A. ASPERTI, V. DANOS, C. LANEVE, L. R GNIER, «Paths in the lambda-calculus», *in: LICS*, p. 426–436, Paris, 1994.
- [6] A. ASPERTI, C. LANEVE, «The family relation in interaction systems», *in: TACS Symposium, LNCS 789*, p. 366–384, Sendai, Japon, 1994.
- [7] G. BOUDOL, «Some chemical abstract machines», *in: REX School/Symposium A Decade of Concurrency, Reflections and Perspectives, LNCS 803*, p. 92–123, Noordwijkerhout, Pays-Bas, 1994.
- [8] F. FORNARI, «Translating Full Esterel Programs into Hardware», *in: Proceedings IFIP Workshop on Logic and Architecture Synthesis*, Grenoble, 1994.

- [9] A. RESSOUCHE, R. DE SIMONE, «Compositional semantics of Esterel and verification by compositional reductions», *in: Proceedings CAV'94, LNCS 818*, Stanford, 1994.

Rapports de recherche et publications internes

- [10] I. CASTELLANI, «Observing distribution in processes: static and dynamic localities», *rapport de recherche n° 2276*, Inria, Mai 1994.
- [11] M. L. DE SOUZA, R. D. SIMONE, «Partial-Order automata and equivalence checking», *rapport de recherche*, Esprit Bra Concur2 deliverable, Septembre 1994.
- [12] C. RETORÉ, «A note on intersection types», *rapport de recherche n° à paraître*, Inria, Décembre 1994.

8 Abstract

The Meije project follows 3 main research topics. Advances in each domain during 1994 are:

Concerning semantics of concurrent systems, we focused on *higher-order* process calculi, where port names or even processes can be passed along communications. Such phenomena arise in mobile networks for instance.

Concerning the synchronous reactive language Esterel, we defined new compiling principles from a careful analysis of instantaneous causality relations amongst signals. This is a far-reaching result for its consequences in the domain of systems of boolean equations, a model of synchronous hardware circuits.

The software environment was upgraded, and interfaced with hardware synthesis tools for use of their optimisation functions (based on BDD manipulations). Large experiments were conducted, together with the Dassault aviation company acting as end-user, and DEC-PRL as developer of the TiGeR BDD package.

Concerning verification tools, we investigated efficient representations to improve space complexity of our techniques. Implicit (BDD) representation of networks and partial-order automata representations were studied in the context of bisimulation equivalence. Software prototypes are under way.

Table des matières

1	Composition de l'équipe	1
2	Présentation du projet	3
3	Actions de recherche	3
3.1	Sémantique des langages concurrents et fonctionnels . . .	3
3.1.1	Parallélisme vrai	4
3.1.2	Parallélisme et ordre supérieur.	4
3.2	Esterel et la programmation réactive synchrone	7
3.2.1	Le compilateur ESTEREL V4	7
3.2.2	Etude fine de la causalité	8
3.2.3	Interface avec les systèmes de synthèse et optimi- sation de circuits	8
3.2.4	Esterel et les systèmes distribués	9
3.2.5	Esterel et Ptolemy	9
3.2.6	Programmation par Objets Réactifs	10
3.3	Vérification et analyse de systèmes répartis	10
3.3.1	Vérification par méthodes implicites et BDD . . .	11
3.3.2	Vérification par automates d'ordre partiel	11
3.3.3	Bisimulation multi-transitions	11
3.3.4	PAC: compilateur d'algèbres de processus	12
3.3.5	Interfaces utilisateurs	12
4	Actions industrielles	13
4.1	Collaborations sur Esterel avec Dassault Aviation	13
4.2	Convention MESR Esterel-CRP	13
4.3	Contrat CNET: Objets Réactifs	14

5	Actions nationales et internationales	14
5.1	Actions nationales	14
5.2	Actions internationales	14
6	Diffusion des résultats	16
6.1	Enseignement	16
6.2	Participation à des conférences et colloques	16
6.3	Diffusion de produits	17
6.4	Autre	18
7	Publications	18
8	Abstract	19