

ALGORITHMIQUE NUMÉRIQUE ET PARALLÉLISME

Minoux Michel

Alt René
Chesneaux Jean-Marie
Encrenaz Emmanuelle¹
Flavigny Bruno
Jézéquel Fabienne
Lamotte Jean-Luc
Maille Michel
Morcrette Michèle
Vignes Jean

Professeur, UPMC

Professeur, UPMC
Professeur, UPMC
Maître de conférences, UPMC
Maître de conférences, UPMC
Maître de conférences, Université de Paris 2
Maître de conférences, UPMC
Maître de conférences, UPMC
Maître de conférences, UPMC
Professeur, UPMC

ITA/IATOS

Barrolet Gilbert²
Kurinckx Raymonde³
Palmeira Guy⁴
Perrichon Chantal⁵
Picard Françoise⁶
Saïd Clémentine⁷
Varenne Véronique⁸

Ingénieur d'études, CNRS
Technicienne, UPMC
Technicien, UPMC
Ingénieur d'études, CNRS
Ingénieur de recherche, CNRS
Secrétaire d'administration, UPMC
Adjoint administratif, UPMC

Personnel temporaire

Le Calvez Caroline

ATER, UPMC

Doctorants présents 80 % du temps au LIP6

Knippel Arnaud (Minoux M., 1998)

Leblond Éric (Alt R., 1999)

Doctorants présents moins de 80 % du temps au LIP6

Zeghal-Mansour Farah (Minoux M. 1999)

Associés au LIP6

Abadie Jean

Professeur associé, UPMC

Invités au LIP6

Markov Svetoslav

Professeur invité, Académie des Sciences de Sofia (Bulgarie)
(mai 1998, mai 1999, mai 2000)

Rukoz Marta

Professeur invité, (juin 1999)

Tuy H.

Professeur invité, Académie des Sciences (Vietnam) (mars 1998)

-
1. Détachée à mi -temps dans le thème ASIM
 2. Partagé entre l'UFR 922 et le thème ANP
 3. Partagée entre les thèmes ANP, RP et SRC
 4. Partagé entre les thèmes ANP, RP et SRC
 5. Partagée entre les thèmes ANP, RP, SRC et ASIM
 6. Partagée entre les thèmes ANP et RP
 7. Partagée entre les thèmes ANP et RP
 8. Partagée entre les thèmes ANP, RP et SRC



PROSPECTIVE

Le thème "Algorithmique Numérique et Parallélisme" regroupe les activités consacrées à la validation des logiciels numériques, au développement de logiciels numériques à hautes performances (en particulier pour l'utilisation de calculateurs parallèles ou massivement parallèles), au développement de modèles et d'algorithmes d'optimisation (continue ou discrète) et à la vérification de descriptions comportementales de systèmes logiciels-matériels.

Les principaux axes de développement du thème s'organisent autour de 5 projets de recherche :

- Projet VAN "Validation des Algorithmes Numériques" (responsables: R. Alt, J.-M. Chesneaux, J. Vignes)
- Projet PAN "Parallélisation des Algorithmes Numériques" (responsable: R. Alt, J.-L. Lamotte)
- Projet VISU "Visualisation des résultats de modélisations numériques" (responsable: J.-L. Lamotte)
- Projet MOS "Modélisation et Optimisation des Systèmes" (responsable: M. Minoux)
- Projet CLOVIS "Conception LOGicielle et Vérification Intégrée de Systèmes" (Responsables: E. Encrenaz, M. Minoux)

Projet VAN "Validation des Algorithmes Numériques"

Dans le domaine de la validité numérique (VAN), des versions du logiciel CADNA utilisable avec PVM et MPI ont été réalisées. Le nouveau logiciel CADNA-MP (CADNA-Message Passing) a été testé sur des problèmes de grande taille sur le CRAY-T3E (thèse de Marc Montagnac, 1999). Ces tests doivent être poursuivis sur la machine MPC du LIP6. De plus, une étude est menée sur la parallélisation synchrone de la méthode CESTAC sur machine à mémoire partagée et distribuée (J.-L. Lamotte).

Des évolutions importantes du logiciel CADNA sont en cours d'élaboration :

- des versions adaptées aux architectures vectorielles (CRAY-SV1 et NEC) qui doivent permettre de valider des simulations numériques très coûteuses en temps calcul (J.-M. Chesneaux, F. Jézéquel).
- une version dédiée à l'environnement MatLab (F. Jézéquel, C. Le Calvez).

Deux projets importants doivent démarrer prochainement. Le premier porte sur la réalisation d'outils d'implantation automatique (cadnatisation) de CADNA dans les codes scientifiques (langages Fortran C ou ADA). Ce travail, demandé par les industriels, doit être en partie financé par l'ANVAR. Le deuxième s'inscrit dans le cadre du programme RNTL en collaboration avec les sociétés Numeral Advance et Thompson. Ce projet a pour but de développer un mailleur 3D incluant le contrôle de la précision.

Des applications du logiciel CADNA vont être poursuivies :

- sur l'impact de la superposition d'un chaos numérique dans la simulation numérique des phénomènes physiques chaotiques. Etude de la théorie de Prigogine (J. Vignes). Ceci fait l'objet d'une collaboration avec M. Pichat à l'Université de Lyon 1.
- dans le domaine de la robotique dans le cadre du projet européen PACS, actuellement soumis (J.-M. Chesneaux). Ce travail fait l'objet d'une collaboration avec l'équipe CALFOR du LIP6.

Sur le plan théorique, la formalisation des concepts et l'étude des propriétés de l'arithmétique stochastique seront activement poursuivies (J.-M. Chesneaux, F. Jézéquel). Des travaux portant sur des algorithmes prouvés de maillage adaptés à l'arithmétique finie des ordinateurs viennent de démarrer dans le cadre d'une thèse (E. Leblond).

Des études sur la comparaison des propriétés théoriques et pratiques de l'arithmétique stochastique et de l'arithmétique d'intervalles (R. Alt) sont entreprises en collaboration avec S. Markov de l'Académie des Sciences de Bulgarie (projet CNRS n° 5360).

Une thèse sur la validation de la reconnaissance de cellules biologiques (sanguines, cancéreuses, etc) en présence de données bruitées est entreprise par Ousena Baya et dirigée par R. Alt.

Projet PAN "Parallélisation des Algorithmes Numériques"

Dans le domaine de la parallélisation d'algorithmes (PAN) les travaux concernent principalement le développement d'algorithmes nouveaux (C. Le Calvez) ou la parallélisation de méthodes connues dans le domaine de l'algorithmique numérique de manière à obtenir

des logiciels sûrs et efficaces adaptés aux supercalculateurs (C. Le Calvez, M. Montagnac). Pour chaque algorithme a été étudié le type de machine le mieux adapté et la complexité en temps et en espace.

Projet VISU "Visualisation des résultats de modélisations numériques"

Le troisième projet de recherche concerne la visualisation des résultats numériques. Le projet VISU est

le prolongement naturel des projets VAN et PAN qui s'attachent à améliorer les performances des applica-

tions scientifiques aussi bien du point de vue de la rapidité de calcul que de la précision des résultats. Afin d'avoir une vision synthétique, un grand nombre d'applications utilisent des logiciels de visualisation 2D ou 3D afin de visualiser et d'analyser les tableaux de résultats. Ces logiciels présentent cependant une lacune : ils ne permettent pas de visualiser sur le même graphique les résultats et leur qualité numérique. Un prototype d'outil de visualisation 2D ou 3D a été développé pour pallier cette lacune (J.-L. Lamotte). Un produit plus fini avec comme support principal OpenGL, doit prolonger les résultats prometteurs de l'actuel prototype.

Enfin, dans le prolongement des travaux concernant la validation et le contrôle des algorithmes de type

Krylov (thèse de M. Montagnac, 1999), un nouvel axe de recherche portant plus généralement sur les résolutions numériques des problèmes de l'algèbre linéaire de grande taille doit être développé. L'animation du séminaire PALM depuis octobre 1999 en collaboration avec le LAN de Paris 6 et l'ONERA s'inscrit dans cette voie. Une collaboration avec J. Erhel (INRIA) a débuté afin d'introduire une nouvelle technique de déflation dans la méthode du gradient conjugué (C. Le Calvez). De même, une collaboration avec Y. Saad (Université du Minnesota) se poursuit pour introduire de nouveaux préconditionneurs dans la résolution de systèmes linéaires creux (C. Le Calvez).

Projet MOS "Modélisation et Optimisation des Systèmes"

Dans le domaine de la modélisation et de l'optimisation des systèmes (projet MOS), il est prévu de poursuivre les recherches sur les problèmes de partitionnement de graphes de grandes dimensions, et leurs extensions possibles. Un des objectifs sera de généraliser les résultats obtenus (calculs de bornes, heuristiques) sur le partitionnement de graphes au cas du partitionnement d'hypergraphes. Les applications potentielles de ces travaux sont nombreuses en informatique (placement de tâches dans les systèmes multiprocesseurs, compilation d'applications parallèles) et en technologie (problèmes de placement dans les circuits VLSI). Se rattachent à cette problématique les travaux menés dans le cadre de la thèse (en cours) de D. Collard sur l'optimisation du placement dynamique de tâches dans les grands systèmes informatiques distribués (ces travaux s'inscrivent dans le cadre d'une collaboration avec le thème SRC : P. Sens et B. Folliot).

Un autre axe important de recherches futures pour le projet MOS concerne l'optimisation des grands

systèmes, en particulier la résolution de problèmes de multiflots à coût minimum avec fonctions de coût discontinues (avec applications aux réseaux de télécommunications). On cherchera à mettre en œuvre et à améliorer les nouvelles relaxations par programmation linéaire généralisée, précédemment définies pour résoudre des problèmes réels issus d'applications concrètes dans le domaine de l'optimisation des réseaux de télécommunications. On cherchera également à améliorer les performances des heuristiques primales afin d'obtenir de meilleures bornes supérieures, et des intervalles de confiance, de largeur aussi réduite que possible. L'amélioration de l'efficacité algorithmique des méthodes de résolution exactes, fondées sur la génération de contraintes et utilisant des techniques de combinatoire polyédrique, sera également étudiée, en particulier pour les problèmes de dimensionnement optimal de réseaux avec contraintes de sécurité.

Projet CLOVIS "Conception LOGicielle et Vérification Intégrée de Systèmes"

Dans le domaine de la vérification intégrée logiciel-matériel les résultats obtenus dans le cadre du projet CLOVIS ont permis de dégager de nombreuses perspectives de recherche. Cependant, l'analyse des besoins les plus importants des applications suggère l'extension de l'environnement de vérification actuel selon deux directions prioritaires :

- l'exploitation des paramètres décrivant le comportement temporel des systèmes (paramètres déjà inclus dans le modèle formel sous-jacent au système CLOVIS) afin de permettre la vérification automatique de propriétés temporelles quantitatives. La modélisation du temps conduit à un problème de représentation et de manipulation des entiers dans le domaine booléen. En effet, le temps

réel est une variable entière, et ses manipulations consistent principalement en des recherches de minimum parmi un nombre fini d'entiers et en des additions ou soustractions de nombres finis d'entiers. Transposer ce modèle dans le domaine booléen revient à rechercher une modélisation des entiers qui puisse être aisément manipulée par une structure de données étendant les BDD (Binary Decision Diagrams), pour les opérations de recherche de minimum et de somme. Un projet de recherche commun sur ce sujet avec le LABRI (Université de Bordeaux I) et la DGA vient de débiter (février 2000).

- la possibilité de traiter des systèmes de plus grande taille et/ou de plus forte complexité par la

décomposition du processus de vérification selon une méthodologie d'analyse modulaire. Les recherches envisagées sur ce sujet concernent, en particulier, les aspects suivants :

- la réduction a priori des différentes entités à composer; Il s'agit de proposer des algorithmes

efficaces permettant de construire des entités réduites préservant la propriété à vérifier et le mode de composition.

- L'interprétation des résultats de vérification obtenus sur le modèle réduit vers le modèle initial.



BILAN SYNTHÉTIQUE DES RECHERCHES

Les principaux résultats obtenus au cours de la période 1997-1999 sont les suivants :

Concernant la validation des algorithmes numériques, des versions du logiciel CADNA utilisable avec PVM et MPI ont été réalisées ainsi que pour des architectures vectorielles.

Un étude détaillée aboutissant à une nouvelle algorithmique pour le redémarrage des algorithmes de type Krylov a été finalisée (thèse de M. Montagnac, 1999).

L'action coopérative FIABLE de l'INRIA, à laquelle ont participé J.-M. Chesneaux et F. Jézéquel s'est terminée en septembre 1999. Deux stages de DEA portant sur la validation numérique d'un code d'inversion de matrices structurées (F. Kharroubi) et sur l'élaboration d'un mailleur 2D avec contrôle de la précision (E. Leblond) ont été faits dans ce cadre.

Concernant la parallélisation des algorithmes, on peut mentionner :

- l'étude d'une méthode de résolution de systèmes différentiels fondée sur la parallélisation en temps ;
- l'étude de problèmes de placement de tâches en collaboration avec la Société MATRA-MS2I dans le cadre du projet CAPITAN (thèse de D. Thibau, 1997).

Concernant la modélisation et l'optimisation des systèmes, les résultats obtenus concernent :

- l'étude de problèmes de partitionnement de graphes et d'hypergraphes de grandes dimensions : construction de nouvelles relaxations, réalisation d'un générateur de netlists et étude comparative d'algorithmes approchés pour la résolution de problèmes de très grandes tailles. Ces travaux se sont déroulés dans le cadre de la thèse de J. Pistorius (soutenue fin 99) et ont abouti à la réalisation d'un compilateur de netlists optimisé pour l'émulateur de circuits 'Celaro' de la Société Mentor Graphics (Division Metasystems) ;
- la mise au point d'un algorithme polynomial pour déterminer l'orientation optimale des cellules dans des circuits intégrés "Standard Cell" (1 article de revue internationale en collaboration avec l'université Rutgers, USA) ;
- l'étude de problèmes d'optimisation de réseaux de télécommunications avec fonctions de coût discontinues « en escalier » et la mise au point de nouvelles relaxations ainsi que d'un algorithme de

résolution exacte (1 rapport de recherche, 2 articles parus dans des revues internationales, 1 article en cours de soumission) ;

- L'étude de problèmes d'allocation de fréquences dans les réseaux de télécommunications (réseaux hertziens, réseaux cellulaires). De nouvelles approches pour le calcul de bornes pour le problème de satisfaction maximale de contraintes (MAX-CSP) ont été développées et expérimentées sur une série de problèmes-test difficiles provenant d'applications pratiques et de tailles importantes (plusieurs centaines de nœuds, plusieurs milliers de contraintes). (1 article à paraître dans 'Encyclopedia of Optimization', Kluwer).
- l'étude de propriétés combinatoires dans l'algèbre des semi-anneaux et des dioïdes (3 articles de revues internationales, 1 revue nationale, et 1 CRAS).

Concernant la vérification intégrée logiciel-matériel, un ensemble d'outils logiciels a été développé qui comprend, en particulier :

- un traducteur automatique de programmes VHDL en réseaux de Petri (outil VPN) ;
- un vérificateur de propriétés exprimées en logique CTL (outil VMC) ;
- un outil de vérification de l'équivalence de deux descriptions différentes d'un même système (outil PSM) ;
- un logiciel d'abstraction de composants simplifiant la vérification (outil MUST).

Ces réalisations ont donné lieu, sur la période 95 - 99, à trois thèses soutenues, et à 7 articles dans des actes de congrès internationaux. Elles ont d'ores et déjà permis de démontrer la faisabilité d'une approche alliant :

- une automatisation complète du processus de vérification ;
- l'intégration logicielle complète dans l'environnement standard de conception ;
- la transparence des modèles formels et des outils de vérification par rapport à l'utilisateur ;
- l'efficacité concrète des outils de vérification ;
- l'utilisation des méthodes formelles dans d'autres domaines connexes (évaluation de la consommation, synthèse haut niveau, synthèse comportementale, adaptation de protocoles de bus).



BILAN DÉTAILLÉ DES RECHERCHES

Projet VAN : Validation des Algorithmes Numériques

J. VIGNES, R. ALT, F. JÉZÉQUEL, J.-M. CHESNEAUX, J.-L. LAMOTTE, C. LE CALVEZ, E. LEBLOND.

Le contrôle et la validation des logiciels scientifiques consistent à faire, en cours d'exécution du programme :

- l'analyse de la propagation des erreurs d'arrondi,
- la détection des instabilités numériques en cours de programme,
- le contrôle des tests et des branchements,
- l'estimation de la précision de tout résultat de calcul,
- l'estimation de l'influence des incertitudes des données sur les résultats fournis.

Il existe actuellement deux façons d'aborder ce problème, à savoir : l'approche déterministe et l'approche stochastique.

L'approche déterministe conduit généralement à des évaluations trop pessimistes de l'erreur et à une sous-estimation importante de la précision. Par ailleurs, elle ne peut être facilement mise en œuvre que sur certaines classes d'algorithmes.

En revanche, l'approche stochastique est la seule qui permette de tenir compte de la compensation des erreurs d'arrondi et de donner une bonne estimation de la précision des résultats.

Dès 1974, J. Vignes et M. La Porte ont proposé les bases d'une méthode d'analyse des erreurs d'arrondi originellement connue sous le nom de méthode de permutation-perturbation et appelée maintenant méthode CESTAC (Contrôle et Estimation STochastique des Arrondis de Calcul). Cette méthode a donné lieu à de nombreuses études théoriques et pratiques et est actuellement source de développements importants.

L'implémentation synchrone de la méthode CESTAC a donné lieu récemment à la définition d'une nouvelle arithmétique appelée arithmétique stochasti-

que dont les propriétés sont actuellement en cours d'étude. Elle permet de retrouver, pour les nombres stochastiques, une grande partie des propriétés du corps des nombres réels, propriétés perdues dans l'ensemble des nombres en virgule flottante

Sous son aspect pratique, la méthode CESTAC a donné lieu à un logiciel appelé CADNA (Control of Accuracy and Debugging for Numerical Applications) qui implante la méthode CESTAC dans les programmes scientifiques écrits en Fortran, C, C++ et Ada. L'utilisation de ce logiciel et ses applications dans les trois classes d'algorithmes numériques (méthodes finies, méthodes itératives, méthodes approchées) est source de nombreux travaux actuels et à venir.

Par ailleurs pour les programmes parallèles, les nouveaux types définis par CADNA pour la validation des logiciels numériques, ont été ajoutés aux bibliothèques d'envoi de messages PVM et MPI. Ceci permet maintenant de valider numériquement les programmes parallèles (J.-L. Lamotte, M. Montagnac).

Le logiciel CADNA permettant de détecter en cours d'exécution d'un programme les instabilités numériques dues d'une part aux arrondis de calcul et d'autre part aux incertitudes de données, s'est avéré être un outil très intéressant pour étudier les systèmes dynamiques chaotiques. C'est ainsi qu'avec CADNA par exemple, la partie exacte de la trajectoire dynamique du système peut être très aisément déterminée, ainsi que les points de doublement de période et la périodicité de la trajectoire. CADNA permet donc de faire une étude qualitative et quantitative des systèmes chaotiques (J. Vignes, M. Pichat).

Projet PAN : Parallélisation des Algorithmes Numériques

R. ALT, F. JÉZÉQUEL, J.-L. LAMOTTE, C. LE CALVEZ, T. LEDUC, D. THIBAU

Ce projet consiste à développer des logiciels de calcul scientifique adaptés aux supercalculateurs parallèles ou distribués. Les principaux axes de ce projet sont :

- la parallélisation d'algorithmes existants,
- la proposition d'algorithmes nouveaux,
- l'étude de la complexité en nombre d'opérations et espace mémoire,
- l'étude du placement des tâches sur les processeurs et les possibilités de reconfiguration en vue d'une possible tolérance aux pannes.

- la précision et la fiabilité des résultats numériques obtenus.

Les principaux résultats obtenus dans ce domaine ont été :

- dans le domaine des systèmes différentiels, une adaptation d'une ancienne méthode, dite de collocation a été proposée pour la parallélisation en temps (R. Alt). Jusqu'à présent, la plupart des méthodes parallèles pour les systèmes différentiels utilisaient une parallélisation en espace. La parallélisation en temps proposée est basée sur une inter-

polution de la solution cherchée sur un grand nombre de points. L'utilisation et l'adaptation de ce type de méthode pour les équations d'évolution sont une partie de la thèse de F. Jézéquel;

- dans le cadre de la résolution de systèmes linéaires creux sur machines parallèles, une nouvelle méthode de Krylov, visant à pallier les pertes d'informations de GMRES redémarré, a été proposée. Cette méthode appelée IDGMRES (C. Le Calvez et B. Molina de l'université Centrale de Caracas) tire partie d'une technique de déflation (IRA) originellement utilisée dans le cadre de la résolution de valeurs propres, ce qui permet non seulement de réduire le nombre total d'itérations

mais également le coût d'une itération. Cette méthode est actuellement en cours de validation (J.-M. Chesneaux, F. Jézéquel et C. Le Calvez).

- dans un domaine différent mais toujours relié à la validation des méthodes implantées sur supercalculateurs, des recherches ont été menées sur les problèmes de tolérance aux pannes et de placement de tâches dans le cadre du projet Capitan (Calculateur Parallèle pour l'Imagerie, le Traitement du Signal et l'Analyse Numérique) développé par la Société MATRA MS2I. Ces problèmes sont particulièrement difficiles ici en raison de l'hétérogénéité du calculateur parallèle Capitan. (thèse de D. Thibau, 1997).

Projet VISU : VISualisation des résultats de modélisations numériques

M. MORCRETTE, J.-L. LAMOTTE, TH. LEDUC, R. ALT.

Pour valider les simulations parallèles discrètes du phénomène géotectonique, qui ont été étudiées par Thomas Leduc, ce dernier a eu recours à un traitement et un post-traitement graphique de ses résultats numériques. Ainsi, en ce qui concerne le traitement, un serveur (en l'occurrence, l'un des 256 processeurs de calcul du Cray T3E utilisé) se charge de collecter les portions d'images réparties sur chacun des clients. Ces clients, disposés selon une "topologie cartésienne" de processus, alimentent le serveur après calculs et à intervalle de temps réguliers, tandis que le serveur se charge de l'écriture sur disque des images reconstituées, au format SunRaster. Le post-traitement graphique s'effectue sur une Silicon Graphics quadri processeurs et consiste en la création d'un film au for-

mat MPEG à partir des fichiers SunRaster, en utilisant l'utilitaire "Convert" du logiciel "ImageMagick".

Il pourrait être intéressant, à terme, d'envisager un traitement conversationnel des résultats graphiques, c'est-à-dire, de faire en sorte que le serveur graphique restitue, en temps réel les images collectées et les fasse "défiler à l'écran".

Un premier prototype de logiciel de visualisation de tableau 2D de résultats obtenu avec CADNA a été réalisé. Ce programme a confirmé l'importance de la visualisation pour une analyse rapide des résultats et de leur qualité. Cependant, ce prototype présente des lacunes, notamment au niveau de l'interface graphique qui est peu conviviale.

Projet MOS: Modélisation et Optimisation des Systèmes

M. MINOUX, E. ENCRENAZ, V. GABREL, A. KNIPPEL, D. COLLARD

Les principaux objectifs poursuivis concernent le développement d'outils théoriques et algorithmiques nouveaux pour la résolution de problèmes d'optimisation discrète et continue, ainsi que leur application à des problèmes concrets issus de domaines variés tels que: systèmes informatiques (conception et optimisation d'architectures parallèles), réseaux de télécommunications, conception assistée en technologie, traitement algorithmique de l'information, aide à la décision (méthodes quantitatives), modèles de réseaux de Petri pour la vérification de systèmes, optimisation de la consommation de circuits VLSI.

Du point de vue théorique, les principaux domaines abordés concernent:

- la théorie des graphes, la résolution de problèmes combinatoires;
- la modélisation et l'analyse de systèmes dynamiques par réseaux de Petri;

- la programmation linéaire et non-linéaire (programmation mathématique);
- l'algorithmique numérique et non numérique.

Les recherches en cours sont orientées suivant deux axes principaux:

- la résolution de problèmes combinatoires appliqués à la technologie;
- l'optimisation de grands systèmes.

Les résultats obtenus concernent en particulier:

- La résolution de problèmes de placement et de routage dans les circuits intégrés. Une collaboration (en cours) avec l'Université Rutgers (USA) a conduit à la mise au point d'un algorithme polynomial pour l'orientation optimale des cellules afin de minimiser la surface d'un circuit en technologie « Standard Cell » à nombre borné de canaux (1 article de revue internationale).
- L'étude de problèmes de partitionnement de graphes et d'hypergraphes : construction de nouvelles

relaxations, réalisation d'un générateur de netlists et étude comparative d'algorithmes approchés pour la résolution de problèmes de très grandes tailles. Ces travaux se sont déroulés dans le cadre de la thèse de J. Pistorius (soutenue fin 99) et ont conduit à un ensemble de logiciels très efficaces implantés sur l'émulateur de systèmes 'Celaro' développé par Mentor-Graphics (Division Meta-systems). Les résultats obtenus ont permis de réduire de 10 à 20 % en moyenne les ressources matérielles nécessaires pour implémenter des netlists réelles de taille importante (jusqu'à une centaine de milliers de cellules). (1 article de conférence internationale avec actes et un article de revue internationale en cours de soumission).

- Dans le domaine de l'optimisation des grands systèmes, des travaux de recherche ont été menés sur la résolution de problèmes de multiflots à coût minimum avec fonctions de coût discontinues 'en escalier' qui apparaissent typiquement dans le contexte de l'optimisation des réseaux des télécommunications. Une famille de relaxations utilisant des modèles de programmation linéaire de grandes dimensions a été mise en évidence (V. Gabrel et M. Minoux). La résolution (exacte) des programmes linéaires relaxés peut être obtenue par une technique originale, combinant programma-

tion linéaire généralisée et programmation dynamique. Des résultats de calculs préliminaires sur des exemples réalistes ont montré que cette approche conduit à des évaluations par défaut (minorants) ne s'écartant pas de plus de 10 - 20 % des valeurs optimales exactes (inconnues). Par ailleurs on a pu mettre en évidence des améliorations significatives par rapport aux relaxations construites par convexification des fonctions de coût. Pour la résolution exacte de ces problèmes, un algorithme de génération de contraintes de type 'méthode de Benders' a été mis au point et expérimenté avec succès sur une série importante de problèmes-test réalistes, comprenant des réseaux jusqu'à 20 sommets et 30 à 40 arêtes. (1 rapport de recherche, 2 articles publiés dans des revues internationales).

- Une étude sur les propriétés combinatoires de l'algèbre des semi-anneaux, a conduit à une généralisation de plusieurs résultats classiques de la théorie des graphes : le « Matrix Tree Theorem » de Tutte et Borchart, le « All Minors Matrix Tree Theorem » de Chen (1976), et la caractérisation des valeurs propres et des fonctionnelles propres en analyse Min-Max (3 articles de revues internationales, 1 CRAS). Un article de synthèse sur la théorie et les applications des semi-anneaux a été également publié dans la Revue TSI.

Projet CLOVIS : Conception Logicielle et Vérification Intégrée de Systèmes

E. ENCRENAZ, R. BAWA, G. DECUQ, F. RAHIM, M. MINOUX

Ce projet vise à développer une méthodologie ainsi qu'un ensemble d'outils de vérification de systèmes matériels pouvant être utilisés dans les différentes phases de conception d'un système matériel, de la description comportementale à la description logique, en passant par la description au niveau « transfert de registres ».

Un premier prototype couvrant l'ensemble de la chaîne logicielle de vérification a été réalisé par E. Encrenaz et R. Bawa. Il comprend les modules suivants :

- VPN: traducteur automatique de programmes VHDL en réseaux de Petri, selon le modèle formel des réseaux de Petri interprétés et temporisés, défini dans la thèse d'E. Encrenaz (les réseaux obtenus sont préalablement réduits par l'application de règles de réduction préservant la sémantique du programme initial).
- VMC: vérification automatique de propriétés exprimées à partir des huit opérateurs de base de la logique CTL. Les algorithmes de vérification sont appliqués sur une représentation compacte des équations de transition symbolique préalablement extraites du réseau de Petri.
- PSM: vérification automatique de l'équivalence de deux descriptions différentes d'un même système

décrit en VHDL (les algorithmes de vérification étant, là encore, appliqués aux représentations compactes).

Bien que cet ensemble logiciel prototype ne présente pas encore toutes les commodités d'utilisation souhaitables dans un environnement de conception opérationnel, il démontre la faisabilité d'une approche répondant aux principaux objectifs suivants :

- Automatisation complète du processus de vérification à partir de la description comportementale familière aux ingénieurs concepteurs de systèmes matériels;
- Intégration logicielle complète des outils de vérification dans l'environnement standard de conception;
- Transparence complète des modèles formels et des outils de vérification par rapport à l'utilisateur : l'ingénieur concepteur n'a à intervenir à aucun moment dans le processus de vérification et peut ignorer totalement les représentations internes (les modèles) manipulées par les outils de vérification; il peut donc conserver son environnement et ses méthodes habituels de travail;
- Efficacité des outils de vérification : elle est obtenue, en particulier, grâce à une représentation compacte et bien adaptée des systèmes de transition

modélisant le comportement du système. Ainsi le prototype logiciel actuel a permis d'obtenir les premiers résultats de validation en mode « tout automatique », pour de nombreux exemples de la littérature: preuves de bon fonctionnement d'arbres de bus, de protocoles de communication; preuves de propriétés de stabilisation de systèmes rebouclés; preuves de l'équivalence de deux descriptions du contrôleur du processeur DLX (programme de plus de 1500 lignes de code VHDL, preuve obtenue en environ 15 secondes). Il a également été utilisé sur des systèmes réels, et a notamment permis de tester la non-régression d'une correction métal sur un circuit fondu développé au laboratoire (PCI-DDC FSM de 109 états avec 45 entrées et 56 sorties décrit en 1800 lignes de code VHDL). Ce test de non-régression n'aurait pu être effectué en simulation, car il survenait après deux heures de fonctionnement réel, ce qui aurait nécessité plusieurs années de simulation pour repositionner le modèle dans l'état défectueux puis corrigé...

Depuis 1997, les recherches se sont orientées vers la vérification modulaire de systèmes matériels : il s'agit alors de considérer le système comme une in-

terconnexion de composants plus élémentaires, et de réduire chaque composant avant de construire le système global. Les règles de réduction doivent préserver : (1) la propriété que l'on souhaite vérifier (exprimée en CTL); (2) la sémantique de composition des composants élémentaires. Ces travaux ont donné lieu à 1 rapport de recherche, 2 publications dans des conférences internationales et au développement d'un outil de réduction de chaque composant (outil MUST). Une étape importante concerne maintenant l'interprétation des résultats obtenus sur le modèle réduit : comment reconstruire, à partir d'un état défectueux du modèle réduit, un état défectueux et accessible dans le modèle initial ?

Parallèlement, d'autres études concernent la définition et l'expérimentation de structures de données étendant les diagrammes de décisions binaires pour pouvoir représenter simultanément des systèmes à variables booléennes et entières (éventuellement bornées, mais que l'on veut éviter de transposer dans le domaine booléen). Une première approche se fondant sur les DDD (diagrammes de décision de données) proposés par le LaBRI (Université de Bordeaux I), est en cours d'expérimentation.

PUBLICATIONS ANP

Livres

- (1) M. Soria, M. Morcrette, A. Brygoo, O. Palies : "Initiation à l'informatique par Word et Excel", ITP 97 (International Thomson Publishing Paris) ed: ITP-Vuibert, 1997.
- (2) J.-C. Bajard, O. Beaumont, J.-M. Chesneaux, M. Dumas, J. Erhel, D. Michelucci, J.-M. Muller, B. Philippe, N. Revol, J.-L. Roch, J. Vignes : "Précision des calculs sur ordinateur", Editions Masson Paris ed, 1997.

Articles de revues

- (1) N. C. Albertsen, J.-M. Chesneaux, S. Christiansen, A. Wirgin : "Comparison of four software packages applied to a scattering problem", Math. and Comp. in Sim., vol. 48, pp. 307-318, 1999.
- (2) R. Alt, J. Vignes : "Validation of results of collocation methods for ODEs with the CADNA library", Applied Numerical Mathematics, vol. 20, pp. 1-21, 1996.
- (3) E. Boros, P. L. Hammer, M. Minoux, D. Rader : "Optimal Cell-Flipping to Minimize Channel Density in VLSI Design and Pseudo-Boolean Optimization", Discrete Appl. Math, vol. 90, pp. 69-88, 1999.
- (4) J.-M. Chesneaux, F. Jezequel : "Dynamical control of computations using the Trapezoidal and Simpson's rules", Journal of Universal Computer Science, vol. 4, pp. 2-10, 1998.
- (5) V. Gabrel, A. Knippel, M. Minoux : "Exact Solution of Multicommodity Network Optimization Problems with General Step Cost Functions", Operations Research Letters, vol. 25, pp. 15-23, 1999.
- (6) V. Gabrel, M. Minoux : "LP Relaxations better than Convexification for Multicommodity Network Optimization Problems with Step Increasing Cost Functions", Acta Mathematica Vietnamica, vol. 22, pp. 123-145, 1997.
- (7) M. Gondran, M. Minoux : "Valeurs propres et fonctions propres d'endomorphismes à diagonale dominante en analyse Min-Max", C.R.A.S., vol. 325, pp. 1287-1290, 1997.
- (8) M. Gondran, M. Minoux : "Eigenvalues and Eigenfunctionals of Diagonally Dominant Endomorphisms in Min-Max Analysis", Linear Algebra and its Appl, vol. 282, pp. 47-61, 1998.
- (9) M. Gondran, M. Minoux : "Dioides et Semi-Anneaux : Algèbres et Analyses pour le XXIe siècle ?", Techniques et Science Informatique, 2000.
- (10) F. Jezequel : "A validated parallel across time and space solution of the heat transfer equation", Applied Numerical Mathematics, vol. 31, pp. 65-79, 1999.
- (11) J.-L. Lamotte, F. Delay : "On the Stability of 2D-interpolation algorithms with uncertain data", Maths. and Comp. in Simul, vol. 43, pp. 183-201, 1997.
- (12) C. Le Calvez, B. Molina : "Implicitly restarted and deflated GMRES", Numerical Algorithms, vol. 21, pp. 262-285, 1999.
- (13) C. Le Calvez, Y. Saad : "Modified Krylov acceleration for parallel environments", Applied Numerical Mathematics, vol. 30, pp. 191-212, 1999.
- (14) N. Maculan, M. Minoux, G. Plateau : "An $O(n)$ Algorithm for Projecting a Vector on the Intersection of a Hyperplane and R^n ", RAIRO-Recherche Opérationnelle, vol. 31, pp. 7-16, 1997.
- (15) M. Minoux : "Bideterminants, Arborescences and Extension of the Matrix-Tree Theorem to Semirings", Discrete Mathematics, vol. 171, pp. 123-145, 1997.
- (16) M. Minoux : "A Generalization of the All Minors Matrix Tree Theorem to Semirings", Discrete Mathematics, vol. 199, pp. 139-150, 1999.
- (17) M. Minoux, P. Mavrocordatos : "Relaxations and Upper Bounds for Maximum Constraint Satisfaction. Application to Large Frequency Assignment Problems", Encyclopedia of Optimization, Kluwer, 2000.
- (18) M. Montagnac, J.-M. Chesneaux : "Dynamic control of a BICGStab algorithm", Applied Numerical Mathematics, vol. 32, pp. 103-117, 2000.
- (19) M. Pichat, J. Vignes : "Validité des résultats numériques dans les processus à comportement chaotique. Un outil d'évaluation : le logiciel CADNA", C.R.A.S., vol. 322, pp. 681-688, 1996.

Communications avec actes

- (1) R. Alt and J. L. Lamotte, "On the Evaluation of functional Ranges using a random interval arithmetic," presented at Interval'96, Wuerzburg (Germany), 1996, pp. 11-13.
- [2] R. Alt, "On the optimal solution of collocation methods for ODEs," presented at CESA'96 Multiconference on computational engineering in systems and applications, Lille, 1996, pp. 1128-1133.
- [3] R. Alt and J. L. Lamotte, "Parallel Integration across time of initial value problems using PVM," presented at EuroPVM'96, Munich, 1996.
- [4] R. Alt, "Parameter identification with uncertain data and floating-point arithmetic," presented at Proceedings First Congress on Math. Models and Methods Approach to Biology and Medicine, Alicante (Spain), 1997.
- [5] R. Alt, "How to check the Accuracy of the solution of an iterative process," presented at Proceedings SCAN'98 congress, Budapest, 1998.

- [6] R. Bawa and E. Encrenaz, "Formal verification of VHDL descriptions by symbolic state space exploration applied to finite state machine," presented at VHDL International user forum, spring '96, Santa-Clara (USA), 1996.
- [7] R. Bawa and E. Encrenaz, "VMC : a tool for model-checking VHDL descriptions," presented at VHDL User Forum in Europe, SIG-VHDL spring'96 working conference, Dresde (Allemagne), 1996.
- [8] R. Bawa and E. Encrenaz, "A plate-form for the Formal Verification of VHDL Programs," presented at SMACD'96 (4th international workshop on symbolic methods and application in circuit design), Heverlee (Belgique), 1996.
- [9] R. Bawa and E. Encrenaz, "A Tool for translation of VHDL descriptions into a formal model and its application to formal verification and synthesis," presented at FTRTFT'96 (4th international symposium on formal techniques in real-time and fault-tolerance systems), Uppsala (Suède), 1996, pp. 11-35.
- [10] J.-M. Chesneaux and F. Jezequel, "Dynamical numerical validation of quadrature methods," presented at SCAN'97 Conference, Lyon, 1997, pp. 17-20.
- [11] J.-M. Chesneaux, "On the Probability of the Confidence Interval of the CESTAC Method," presented at XVth World IMACS Congress, Berlin, 1997.
- [12] F. Jezequel, "A time and space parallel algorithm for the heat equation : the implicit collocation method," presented at Euro-Par'96 Parallel Processing, Lyon, 1996, pp. 97-100.
- [13] F. Jezequel, "Propagation de l'erreur d'arrondi lors de la resolution de l'equation des ondes," presented at Real Numbers and Computers, Marseille, 1996, pp. 215-231.
- [14] J.-L. Lamotte and Y. Epelboin, "Study of the numerical stability of a X-RAY diffraction model," presented at Computational Engineering in Systems Applications, IMACS Multiconference, Tunisia, 1998.
- [15] J.-L. Lamotte, "a new approach for the study of surface interpolation with uncertain data using the CADNA software," presented at workshop Reliable Computations and Interval Algebra, Bulgaria, 1999.
- [16] C. Le Calvez and B. Molina, "Implicitly restarted and deflated Krylov methods," presented at ICNMPDE, Morocco, 1998.
- [17] C. Le Calvez and Y. Saad, "Modification du produit scalaire pour l'acceleration de FOM et GMRES sur architectures paralleles," presented at Troisième séminaire sur l'algorithmique numérique appliquée aux problèmes industriels, Rennes (France), 1999.
- [18] T. Leduc, "Parallelisation d'Automates Cellulaires uni- et bi-dimensionnels et application a la modelisation du processus de subduction-erosion en tectonique des plaques," presented at RenPar'10, Strasbourg, France, 1998.
- [19] T. Leduc, "A One-Dimensional Discrete Computer Model of the Subduction Erosion Phenomenon," presented at CESA'98 Conference, Tunisia, 1998.
- [20] M. Minoux, "Optimum Network Design Models and Algorithms in Transportation and Communication," presented at ICIL'99, St Petersburg, 1999.
- [21] M. Montagnac, "Dynamic restarting strategy for a BICGSTAB algorithm using discrete arithmetic stochastic," presented at SCAN'98, Budapest (Hungary), 1998.
- [22] M. Pichat and J. Vignes, "The numerical study of unstable fixed points in a chaotic dynamical system," presented at 15th IMACS World Congress on Scientific Computation, Berlin, 1997, pp. 341-346.
- [23] J. Pistorius, E. Legai, and M. Minoux, "Generation of Very Large Circuits to Benchmark the Partitioning of FPGAs," presented at IPSD99, Monterey (CA), 1999.
- [24] F. Rahim-Sarwary, E. Encrenaz, M. Minoux, and R. Bawa, "Modular Model-Checking of VLSI Design Described in VHDL," presented at Conf. On Computer and their Applications, U.S.A., 1998.
- [25] F. Rahim-Sarwary, R. Bawa, and A. Amara, "VHDL Based formal verification of 32 bit RISC Pipelined Processor," presented at IEEE/ACM Workshop on Logic Synthesis, U.S.A., 1998.

Autres publications

- (1) V. Gabrel, M. Minoux : "Large-scale LP relaxations for minimum cost multicommodity flow problems with step increasing cost functions and computational results", 17, RR-MASI, 1996 1996.
- (2) F. Jezequel, J.-M. Chesneaux : "Etude de la stabilite numerique du code OPA-version 8.0", Institut Pierre Simon Laplace, Paris 1998.
- (3) T. Leduc : "Modelisation par un systeme dynamique discret du processus de subduction-erosion en tectonique des plaques : premiere approche uni-dimensionnelle", LIP6, 1997 1997.
- (4) M. Minoux : "Résolution de systèmes linéaires dans les semi-anneaux et les dioïdes", Rapport LIP6 1998/051, Laboratoire d'Informatique de Paris 6 1998.
- (5) M. Minoux : "Propriétés combinatoires des matrices sur les (pré)-semi-anneaux", Rapport LIP6 1998/050, Laboratoire d'Informatique de Paris 6 1998.
- (6) M. Minoux : "Algèbre linéaire dans les semi-anneaux et les dioïdes", Rapport LIP6 1998/052, Laboratoire d'Informatique de Paris 6 1998.
- (7) F. Rahim-Sarwary, E. Encrenaz : "Property-dependant bisimulation for compositional model-checking", 028, LIP6, 1997 1997.
- (8) F. Terras : "Etude de la stabilite numerique du code ORCA", Institut Pierre Simon Laplace, Paris, 10/1999 1999.



FORMATION PAR LA RECHERCHE ANP

Thèses

- (1) R. K. Bawa : “Un environnement intégré pour la vérification formelle et l’analyse de programmes VHDL”, Thèse de Doctorat, Université Paris 6, 12/12/1996, encadrée par M. Minoux et E. Encrenaz.
- (2) F. Jezequel : “Parallélisation et distribution de résolution d’équations aux dérivées partielles”, Thèse de Doctorat, Université Paris 6, 28/11/1996, encadrée par R. Alt.
- (3) T. Leduc : “Modélisations par réseaux d’automates cellulaires et simulations parallèles du phénomène de subduction-érosion en tectonique des plaques”, Thèse de Doctorat, Université Paris 6, 05/07/1999, encadrée par R. Alt.
- (4) M. Montagnac : “Application aux équations de Navier-Stokes de l’algorithme CGS via les polynômes orthogonaux formels avec contrôle de la précision”, Thèse de Doctorat, Université Paris 6, 07/10/1999, encadrée par J.-M. Chesneaux.
- (5) J. Pistorius : “Partitionnement de très grandes netlists sur architectures hiérarchiques multi-niveaux”, Thèse de Doctorat, Université Paris 6, 16/11/1999, encadrée par M. Minoux.
- (6) F. Rahim-Sarwary : “Techniques symboliques pour la réduction d’automates d’états finis et application à la vérification formelle modulaire et l’optimisation de circuits séquentiels VLSI”, Thèse de Doctorat, Université Paris 6, 27/05/1999, encadrée par M. Minoux et E. Encrenaz.
- (7) S. Tricot : “Analyse comparative et mise en oeuvre numérique d’algorithmes de programmation quadratique sous contraintes linéaires.”, Thèse de Doctorat, Université Paris 6, 05/04/1996, encadrée par M. Minoux.



ANIMATION DE LA RECHERCHE ANP

Activités éditoriales

Vignes J.

- Editions Technip, Paris (Directeur de la collection Informatique)
- Applied Numerical Mathematics (Editorial Board)
- Mathematics and Computer in Simulation (Editorial Board)
- Numerical Algorithms (Editorial Board)
- Treatment in Signal (Comité de lecture)

Minoux M.

- Telecommunications Systems (Editorial Board)
- RAIRO-Recherche Opérationnelle (comité de rédaction)
- Operations Research (Editorial Board)
- Mathematics of Industrial Systems (Editorial Board)
- Ricerca Operativa (comité de rédaction)
- Investigación Operativa (comité de rédaction).
- SIAM Monographs on Discrete Mathematics (Editorial Board).
- Editeur d'un numéro spécial de la revue internationale 'Discrete Applied Mathematics' n° 90, 1999, Special Issue on VLSI (avec A.J. Hoffman et A. Vannelli).

Organisation scientifique de congrès et colloques

Chesneaux J.-M., Muller J.-M., Erhel J.

- Organisation de la Première Journée sur la Qualité Numérique des Logiciels, Université Pierre et Marie Curie, 3 avril 1997.

Vignes J., Chesneaux J.-M., Lamotte J.-L., Jézéquel F., Saïd C.

- Organisation du Congrès RNC3. Real Number and Computers N° 3, Paris, avril 1998.

Membres de Comité de Programme

Alt R.

- First Congress on Mathematical Models and Methods Applied to Biology and Medicine, Alicante, Espagne, 30 juin - 3 juillet 1997.
- SCI'97, Architecture tools algorithms for parallels and distributed computation, Caracas, juillet 1997.
- RNC3, Real Numbers and Computers, Paris, 27, 28, 29 avril 1998.
Minoux M.
- 4 th INFORMS, Telecommunication Conference, Boca Raton, Florida, March 8-11, 1998
- CESA'98 (IMACS-IEEE/SMCC Multiconference), Tunisie, 1-4 avril 1998.
- FRANCO II, Tunisie, 6-8 avril 1998.
Chesneaux J.-M.
- RNC3, Real Number and Computer N° 3, Paris, 27, 28, 29 avril 1998.
- RNC4, Real Number and Computers N° 4, Dagstuhl (Allemagne), 17 au 18 avril 2000.

Membre de comité scientifique

Vignes J.

- 16 th IMACS World Congress, Lausanne, Suisse, 21 au 25 août 2000, session : Computer arithmetic and validated numerics

Président de session

Vignes J.

- 15 th IMACS World Congress, Berlin, Allemagne, session: Error Analysis in Computing Validity of Numerical Software, 29 août 1997.
Alt R.
- CESA'98 IMACS Multiconference, session: Modelization of Physical Phénomena, Hammamet (Tunisie), 1998.

Organisateur et Président de session

Vignes J.

- CESA'96 IMACS Multiconference, session : Numerical Software Validation, Lille, 9-12 juillet 1996.

Alt R. et Vignes J

- 16 th IMACS World Congress, Lausanne, Suisse, 21 au 25 août 2000, session: Computer arithmetic and validated numerics

PROJETS ET CONTRATS

Contrats avec les établissements publics

Projet FIABLE

Responsable scientifique: Chesneaux J.-M., Jézéquel F.

- Etude d'algorithmes numériques fiables pour la résolution de problèmes de géométrie analytique, la détermination du signe d'expressions arithmétiques, la localisation de valeurs propres.

Partenaire(s): *INRISA-Rennes, INRIA-Nancy, INRIA-Sophia-Antipolis.*

DGA-DSP: Vérification de systèmes à données booléennes et entières

Responsable scientifique: Encrenaz Emmanuelle, durée: 28/02/2000 - 31/08/2001, financement 114 kF.

- Méthode de vérification de systèmes électroniques complexes utilisant les diagrammes de décision binaires étendus au traitement des types finis.

Partenaire(s): *LaBRI, Université Bordeaux I.*

Contrats industriels

METASYSTEMS

Responsable scientifique: Minoux Michel, durée: 1/10/1996 - 30/09/1999, financement 200 kF.

- Algorithmes de partitionnement pour la Meta Machine.

Validation numérique du code OPA 8.0 simulant la circulation océanique

Responsable scientifique: Chesneaux J.-M., Jézéquel F., durée: 1/09/1997 - 1/01/1998, financement 30 kF.

- L'étude portait sur l'évolution du nombre de chiffres significatifs dans le temps de certaines variables telles que la température, la vitesse des courants, la pression hydrostatique. Les instabilités numériques survenues lors de l'exécution du code ont également été analysées.

Partenaire(s): *Institut Pierre Simon Laplace.*

EDF

Responsable scientifique: Minoux Michel, durée: 1/02/2000 - 30/09/2000, financement 120 kF.

- Etude de synthèse sur les algorithmes de résolution de problèmes combinatoires.

Partenaire(s): *EDF.*

Activités internationales

ECOS NORD (Venezuela)

Responsable scientifique: Alt René.

- Modélisation numérique et résolution informatique de problèmes d'écoulements biphasiques dans des canalisations verticales ou obliques.

Partenaire(s): *Universidad Central de Venezuela.*

Académie des Sciences de Bulgarie

Responsable scientifique: Alt René.

- Fiabilité des logiciels numériques.

