

Rapport scientifique final sur le projet ANR 05-JCJC-0142

*Structures d'Ordre et Applications au Calcul
Parallèle, Distribué et Concurrent*

rédigé par Luigi Santocanale

le 30 avril 2009

D.1 Résumé

Les structures ordonnées apparaissent dans nombreux domaines de la recherche informatique : les systèmes dynamiques et les systèmes de réécriture, la sémantique des langages de programmation avec la théorie des domaines, la théorie de la concurrence et la théorie des traces. Une première finalité du projet SOAPDC était d'intégrer – et par conséquent d'approfondir – deux compétences présentes dans l'équipe Modélisation et Vérification du Laboratoire d'Informatique Fondamentale de Marseille : la théorie du calcul parallèle, distribué et concurrent, et le savoir mathématique sur les ensembles ordonnés. Le projet proposait d'entrelacer la réflexion théorique sur la combinatoire, l'algèbre et l'algorithmique des ensembles ordonnés avec l'implantation de deux outils de vérification par modèle.

Rappelons que le comportement d'un système informatique peut toujours, en principe, être modélisé comme un ensemble ordonné. Ce type de modélisation devient particulièrement attractif quand on considère les systèmes concurrents. C'est ainsi que plusieurs systèmes formels pour décrire les processus concurrents possèdent une sémantique à l'aide des ensembles ordonnés.

Un problème fondamental de l'informatique consiste à décrire des objets infinis à l'aide de moyens finis. Le comportement d'un système concurrent étant assimilé à un ensemble ordonné, nous proposons d'analyser les descriptions des ensembles ordonnés infinis par des formalismes finitaires. Nous avons abordé cette analyse en nous focalisant sur le pouvoir expressif des formalismes traditionnels d'origine de la théorie des automates et du formalisme plus récent des diagrammes de séquences.

Nous avons aussi étudié les structures d'événements, un modèle mathématique désormais traditionnel des calculs concurrents qui s'organise autour de la notion d'ordre. Nous avons recueilli nombreuses observations sur leur combinatoire, en ayant en perspective l'algorithmique des réductions d'ordre partiel. Le problème du bon étiquetage pour les structures d'événements a été le centre de notre activité de recherche.

Nous enfin profité du fait que l'ordre sur les états de certains systèmes de réécriture forme un treillis, pour développer une approche qualitative et algébrique à l'étude de la réécriture.

Ces réflexions de nature fondamentale ont accompagné le développement de deux outils de vérification par modèle, AMSC, Analyseur Marseillais de SCénarios, et POEM, « Partial Order Environment of Marseille ».

L'outil AMSC se concentre sur les diagrammes de séquences de haut-niveau, en permettant de les spécifier et de vérifier automatiquement certaines propriétés de l'ensemble de leurs exécutions.

La caractéristique de l'outil POEM est sa conception autour des techniques de réduction d'ordre partiel. Ces techniques, en s'appuyant sur la sémantique des processus concurrents par des ordres et sur la maîtrise des propriétés combinatoires des ordres, suggèrent comment parcourir efficacement les états d'un système fortement concurrent. Par conséquent, l'outil POEM se révèle très performant sur les processus concurrents comparé à d'autres outils similaires.

D.2 Mémoire

Rappel des objectifs du projet. La notion d'ensemble ordonné apparaît dans nombreux domaines de la recherche informatique : la théorie des systèmes dynamiques et des systèmes de réécriture, la théorie des domaines, la théorie de la concurrence et la théorie des traces. Une première finalité du projet SOAPDC était d'intégrer – et par conséquent d'approfondir – deux compétences présentes dans l'équipe Modélisation et Vérification du Laboratoire d'Informatique Fondamentale de Marseille : la théorie du calcul parallèle, distribué et concurrent, et le savoir mathématique sur les ensembles ordonnés. Le projet se proposait des objectifs techniques s'articulant autour de deux axes, la recherche fondamentale et les applications. Nous souhaitions strictement entrelacer la réflexion théorique sur la nature combinatoire, algébrique et algorithmique des ensembles ordonnés avec l'implantation de deux outils de vérification par modèle.

La recherche fondamentale. Le comportement d'un système informatique peut toujours, en principe, se modéliser par un ensemble ordonné : typiquement l'état initial est le plus petit élément et un état est plus grand qu'un autre s'il est accessible de cet autre. La relation d'accessibilité est, pour les systèmes séquentiels, un arbre dont le caractère simple et particulier ne justifie pas le recours à la théorie des ensembles ordonnés. La situation est différente pour les systèmes concurrents pour lesquels l'ensemble ordonné des états est bien plus complexe. Au début du projet, le recours aux outils de la théorie des ensembles ordonnés pour comprendre les calculs concurrents était déjà une réalité, apparaissant dans plusieurs travaux en littérature. Par ailleurs, il demeurait pour nous très prometteur, car seulement partiellement exploré et mis à l'épreuve. Nous nous proposons alors de focaliser la recherche fondamentale sur deux thèmes.

(A) *Présentation, par méthodes finies, de structures ordonnées infinies.* On retrouve, en concurrence, ce qui est un thème et un problème fondamental de l'informatique : décrire des objets infinis – calculs, fonctions, arbres, comportements – à l'aide de moyens finis. Quand le comportement d'un système est assimilé à un ensemble ordonné, le problème se traduit à décrire des ensembles ordonnés infinis par des méthodes finies. Les réseaux de Pétri et les automates concurrents sont des tels méthodes ; nous proposons de comprendre le pouvoir expressif des méthodes existantes et d'autres que nous nous préfixions de développer. Par exemple, en portant cet étude sur un plan plus abstrait, nous proposons de faire recours à la notion d'ordre circulaire.

(B) *Structures d'ordre finies : combinatoire et algèbre.* Les structures d'événements sont un modèle mathématique – fondé toujours sur la notion d'ordre – désormais traditionnel des calculs concurrents. Notre objectif était de recueillir plusieurs observations sur la combinatoire de ces structures, dans le cas finis. Cette réflexion sur la combinatoire était, à notre avis, une étape préliminaire et nécessaire avant une étude de l'algorithmique des structures d'événements motivé par l'implantation d'outils de vérification.

Nous souhaitions aussi développer une approche qualitatif à l'étude de certains systèmes dynamiques et de réécriture finis, en profitant du fait que l'ordre sur les états est un treillis. Le cadre algébrique de la théorie des treillis nous donnait les outils pour développer nos considérations.

Deux outils de vérification par modèle, à développer.

AMSC, un Analyseur Marseillais de SCénarios. Les diagrammes de séquence – MSC, de l'anglais « Message Sequence Charts » – sont des descriptions graphiques de scénarios de communication. Leur syntaxe est réglée par la norme Z.120 de l'ITU. La sémantique formelle des MSC, définie par la communauté scientifique, fait recours à une classe particulière d'ordres partiels. Un MSC de haut-niveau, HMSC, est un automate fini dont les états sont étiquetés par des MSC. On peut penser alors aux HMSC comme à un formalisme permettant de définir des ordres éventuellement infinis.

L'outil AMSC se focalise sur les HMSC, en permettant de les spécifier et de vérifier automatiquement certaines propriétés de l'ensemble d'exécutions d'un HMSC.

ELSE. Cet outil – renommé ensuite *POEM, Partial Order Environment of Marseille* – est un vérificateur par modèle versatile qui reconnaît les langages de modélisation d'autres outils similaires, SPIN, IF, UP-PAAL. Il se caractérise par la possibilité d'analyser des systèmes avec des contraintes de temps réel, et par sa conception autour des techniques de réduction d'ordre partiel. Ces techniques, en s'appuyant sur la sémantique d'ordre partiel des processus concurrents et sur l'étude de la combinatoire des ordres, suggèrent comment visiter de façon efficace les états d'un système fortement concurrent, en réduisant par conséquent

le coût de la vérification.

Composition et évolution de l'équipe. Le noyau de l'équipe se compose de chercheurs Marseillais, Paul Ruet de l'IML, Université de la Méditerranée, Emmanuel Godard, Peter Niebert, Rémi Morin et Luigi Santocanale du LIF, Université de Provence. La composition de l'équipe a évolué pendant le déroulement du projet, en s'enrichissant par les contributions d'autres collègues de Marseille, permanents et non. Rappelons d'abord l'apport de Nicolas Baudru qui, après avoir complété une thèse sous la direction de Rémi Morin, a été ensuite recruté à l'Université de la Méditerranée en tant que Maître de Conférences. Frederic Olive, MdC au LIF, Université de Provence, a rejoint le projet, pendant son dernière année, sur le thème de la combinatoire des ensembles ordonnés finis. Au même temps, Jérémie Chalopin, chercheur CNRS au LIF, il a collaboré avec Emmanuel Godard sur le calcul distribué et ses aspects combinatoires.

Entre les non-permanents, Hongyang Qu, chercheur postdoctorant au LIF pendant les premiers trois semestres du projet, s'est fortement investi autour de l'outil ELSE, en ce qui concerne la recherche mais aussi à son développement. Walid Belkhir, étudiant de doctorat sous la direction de Luigi Santocanale, a développé et complété une thèse dont le sujet est très proche du thème présentation des ensembles ordonnés infinis par méthodes finies.

Les ordres infinis : présentations, classifications. Nous parlerons d'abord de la fructueuse collaboration entre Rémi Morin et Nicolas Baudru, qui se décline dans le cadre de la théorie des traces de Mazurkiewicz, du formalisme des « Message Sequence Charts » et, en général, des systèmes communicants dont la sémantique s'exprime sous forme d'ordres partiels éventuellement étiquetés.

Un premier important résultat des deux chercheurs [2] est une nouvelle méthode de dépliage de spécifications rationnelles, qui donne à la fois une nouvelle construction d'un automate asynchrone (précisons, non-déterministe) reconnaissant un langage de traces donné. L'intérêt de cette construction est la taille de l'automate construit, qui est une fonction polynomiale de la taille de son entrée, la description du langage. Ce résultat a orienté leurs recherches suivantes vers trois objectifs : la réduction de la complexité de l'automate construit, la mise au point d'une construction d'un automate sans blocage, la mise au point d'une construction d'un automate déterministe.

Après avoir simplifié la preuve de leur résultat, Baudru et Morin abordent la question de l'absence de blocage dans les systèmes communicants par messages. Un résultat fondamental de la théorie des MSC assurait déjà que tout langage régulier de MSC peut être implémenté effectivement par un système de processus échangeant des messages. En [3] Nicolas Baudru et Remi Morin améliorent ce résultat avec une nouvelle construction qui permet d'implémenter n'importe quel langage régulier en un système ayant les trois qualités suivantes : (i) il n'y a pas de blocage, (ii) il n'y a jamais de messages résiduels dans les canaux, (iii) le système ne requière aucun superviseur global.

R. Morin a poursuivi sa recherche en explorant un nouveau paradigme de systèmes communicants dont la sémantique s'exprime avec les ordres partiels. Il s'agit des systèmes à mémoires partagées qui généralisent les automates asynchrones et les automates cellulaires asynchrones. Après avoir défini formellement la sémantique [17], Morin caractérise leur pouvoir d'expression en terme de langages d'ordres partiels étiquetés, dans le cas des systèmes déterministes, non-ambigus, ou non-déterministes. Contrairement au cas des systèmes communicants par synchronisation ou échange de messages, ces trois classes de systèmes définissent trois classes de langages distinctes, caractérisées par Morin en terme de définissabilité logique et de manière combinatoire [16]. Il a établi ainsi plusieurs extensions du théorème de Buchi liant la logique monadique à la notion de régularité.

Nous nous proposons aussi d'explorer la portée de la notion d'ordre circulaire en relation avec la définissabilité d'ordres infinis. Des résultat préliminaires de nature combinatoire ont été obtenus par Paul Ruet [12]. En collaboration avec Pierre Ille il a établi un lien entre la structure de variété d'ordres, qui généralise la notion d'ordre circulaire, et la théorie des ordres et des classes de forçage. Cette étude a permis de déterminer la complexité algorithmique de l'extensibilité cyclique des variété d'ordres.

En suivant ce parcours de recherche, nous avons découvert d'autres applications de la notion d'ordre circulaire – dans la théorie des groupes [28] – qui s'approchent de notre contexte théorique. Par ailleurs, nous nous sommes confrontés avec le travail [11] d'autres chercheurs qui avaient déjà exploré le même parcours

étant poussés par les mêmes motivations, l'étude de la concurrence.

Dans cette thématique nous situons aussi la collaboration entre Walid Belkhir et Luigi Santocanale : elle porte autour des treillis infinis spécifiés par les jeux de parité ; le résultat majeur concerne une hiérarchie – la hiérarchie des variables – qu'on montre être infinie [5]. Il s'agit, ici et encore une fois, d'étudier le pouvoir expressif d'un cadre formel pour modéliser la communication [13] dont la sémantique se fait par les treillis complets.

L'outil AMSC. Nous discutons ici le développement de cet outil qui, fait par l'intermédiaire de projets étudiants (TER), est strictement entrelacé avec le thème (A) de la recherche fondamentale. Le développement s'est focalisé sur l'extension de l'outil au modèle des MSC contextuelles introduites en [3]. Les algorithmes de détection de classes de spécifications particulières, qui s'appuient sur des propriétés classiques de connexité de graphes, ont été généralisée aux MSC contextuelles.

Ce travail d'implantation a porté à la découverte d'un algorithme nouvel et alternatif pour la détection de la divergence des canaux. Il a donc ouvert des nouveaux horizons à la recherche fondamentale, notamment car il oblige à se ré-interroger sur la complexité réelle du problème de la détection de la divergence des canaux.

Les structures d'événements et leur combinatoire. Ce thème a été développé par Santocanale qui, en suivant un chemin de recherche lui suggéré par Morin, s'est intéressé au problème du bon étiquetage des structures d'événements. Rappelons que ces structures – qui modélisent les calculs concurrents – sont de type relationnel et ne font pas recours à la notion d'alphabet ni à celle de monoïde partiellement commutatif. Le problème du bon étiquetage, en gros, demande de jeter un pont entre les modèles de la concurrence qui font recours aux ordres et ceux qui font recours aux monoïdes et aux automates. Il s'agit d'étiqueter, avec un nombre minimum de lettres, les événements d'une telle structure de façon à ce que le domaine de la structure devient un automate déterministe concurrent.

Au début du projet, le problème du bon étiquetage était résolu pour les structures d'événements de degré 2 [1]. Il était aussi résolu pour les structures d'événements sans conflit car, dans ce cas, le problème est équivalent au problème de recouvrir un ensemble ordonné fini par des chaînes [10]. Les efforts de Santocanale ont visé à étudier le problème pour les structures d'événements de degré 3 et supérieur. Les premières observations ont apparus dans [27], où l'on montre l'équivalence du problème avec un problème de coloriage pour des classes de graphes. Santocanale découvre que ces graphes possèdent des propriétés topologiques fort intéressantes, en ce qui concerne l'absence de disques et sphères sur les anti-chaînes. Ces observations ont été le fondement technique d'un résultat [22], très appréciés dans la communauté scientifique [24], qui résout le problème du bon étiquetage pour les structures d'événements de degré 3 qui sont arborescentes : elles possèdent toujours un étiquetage avec un alphabet de taille 3.

Ce résultat a porté Santocanale à collaborer avec Maurice Pouzet. Leurs travaux montrent que le résultat sur les structures d'événements arborescentes de degré 3 ne se généralise pas en degré supérieur : ils construisent une famille de structures d'événements, dont l'ordre de causalité est un arbre, et dont le rapport entre index (ou nombre chromatique de la structure d'événements, c.-à.d. la taille minimum de l'alphabet nécessaire pour un bon étiquetage) et degré s'accroît de façons exponentielle.

Systèmes de réécriture et treillis. La nécessité de développer ce thème s'imposait au début du projet comme un approfondissement de la recherche déjà abordée par Santocanale et publiée ensuite comme [23]. Il s'agit d'étudier des simples systèmes de réécriture en utilisant les concepts de la théorie des treillis. Ce type d'analyse – proposée à l'origine en [18, 6] – peut en principe s'appliquer à d'autres domaines de l'informatique tels que l'étude des systèmes dynamiques comme [15].

Notre analyse a préféré se focaliser sur des systèmes, les treillis des groupes de Coxeter finis [8], dont l'ordre est un treillis demi-distributif. Les résultats exposés en [21] montrent que les outils développés par Caspard, Barbut et Morvan pour étudier les treillis des groupes de Coxeter finis, se généralisent à tous les treillis demi-distributifs. Ces outils, dans leur formulation originale ainsi que dans [21], visent à comprendre la structure globale d'un treillis à partir de sa structure locale des recouvrements. Il s'agit d'outils dont l'origine peut aisément être repéré dans la théorie de la réécriture, par exemple la notion de *chapeau* de [8] est analogue et parallèle à celle de paire critique dans les systèmes de réécriture. Un point fort de [21]

est alors l'interprétation de la propriété d'un ordre d'avoir les « pushouts » en terme de la propriété de confluence d'un système de réécriture.

La collaboration entre Olive et Santocanale, mise en place pendant la dernière année du projet, a porté sur les treillis de biconvexes ; il s'agit d'une nouvelle abstraction et généralisation des treillis des groupes de Coxeter qui nous a été suggérée par Barbut, Caspard, et Crapo. Un résultat majeur – mais qui reste à approfondir et à exploiter – est la caractérisation de l'OD-graphe (aussi connu comme base directe minimale) des treillis des biconvexes des arbres, ce qui généralise les treillis de permutations. La compréhension de la notion de OD-graphe d'un treillis est d'ailleurs un chemin de recherche ouvert par le projet SOAPDC et un objectif que Santocanale se préfixe dans sa recherche la plus récente [26].

Rappelons enfin un important événement scientifique qui a eut lieu grâce au projet. Le projet a partiellement financé la rencontre « Treillis Marseillais », qui a eut lieu au Centre International de Rencontres en Mathématiques de Marseille, du 21 au 27 avril 2007. Le rencontre a regroupé plusieurs experts de la théorie de treillis pour la plupart en provenance de France.¹ Le but de la rencontre, prévue par le projet de l'origine, était de contacter et favoriser les échanges entre les groupes de recherche français qui s'intéressent aux thématiques proches de SOAPDC. Cette rencontre a eut une importante impacte sur le communauté française qui s'intéresse à la théorie des treillis : des rencontres similaires se sont ensuite enchaînés, d'abord à La Rochelle, puis à Montpellier, et enfin à Nancy. La rencontre a donné aux membres de l'équipe SOAPDC la possibilité d'étendre leurs compétences en élargissant leur réseaux scientifique. C'est ainsi que des collaborations se sont développés, par des visites reciproques entre chercheurs, d'abord entre Pouzet et Santocanale, et puis entre Barbut et Crapo, et Olive et Santocanale.

L'outils ELSE. La collaboration entre Peter Niebert et Hongyang Qu a visé à l'exploitation des ordres partiels et de la théorie des traces de Mazurkiewicz pour deviser des algorithmes de parcours d'états tel qu'on les utilise dans les outils de vérification et de planification. Deux approches majeures ont été poursuivies, la méthode « Local First Search » pour les systèmes discrets d'une part et les automates avec « event zones » pour des systèmes avec contraintes de temps d'autre part. Pour le « Local First Search », des critères de réduction plus forts que auparavant ont été conçus et évalués d'une façon expérimentale [14]. L'approche « event zones », qui donne des très bonnes réductions pour les automates temporisés, a été étendu pour intégrer des invariants d'états [19].

Ces deux approches ont été accompagnées par la mise en oeuvre dans l'outil « POEM ». Cet outil, qui gagne en maturité et remplace l'outil ELSE mentionné au début du projet, comprend, entre autre, une implantation des traces de Mazurkiewicz basée sur des opérations sur une forme normale, l'entrelacement le plus petit dans l'ordre lexicographique [20]. Cette mise en oeuvre des traces s'avère être suffisamment efficace par rapport aux heuristiques développés dans les deux approches, car son un apport en temps d'exécution demeure faible. Nos résultats expérimentaux montrent que, pour des applications qui profitent des réductions mentionnées ci-dessus, l'outil POEM est plus rapide que l'outil de référence Spin dans le cas discret et devance l'outil principal pour les automates temporisés, UPPAAL.

Le départ de Marseille de Hongyang Qu en juin 2007 a visiblement ralenti le développement de POEM et la recherche théorique plus directement apparentée à la mise en oeuvre de cet outil. Nous avons été contraintes aussi de renoncer à d'autres objectifs, tels que la publication du code source de POEM sous licence GPL.

D'autres apports au projet. E. Godard et plus récemment J. Chalopin ont apporté au projet leur compétence sur le calcul distribué. Même si leur activité de recherche se décline plutôt à travers des aspects topologiques du calcul distribué, ces deux aspects, topologie et ordre, sont souvent indiscernables, comme témoigné par exemple dans [27]. Les deux chercheurs ont organisé un groupe de travail sur la calculabilité distribuée qui a suscité le vif intérêt des membres SOAPDC et aussi d'autres chercheurs de Marseille. En [9] ils ont étudié la calculabilité des tâches distribués dans les réseaux fiables anonymes avec connaissance arbitraire. Plus précisément, ils considèrent tâches calculables avec terminaison locale et terminaison locale faible. Ils donnent une première caractérisation des tâches distribués calculables avec terminaison locale, forte et faible, et les tâches calculables en temps polynomial.

¹Détails sur les participants et sur le programme de la rencontre sont disponibles en ligne à la page <http://www.cmi.univ-mrs.fr/~lsantoca/TreillisMarseillais/>.

Rappelons, pour finir, que le projet a été aussi un cadre et un support pour la recherche de Walid Belkhir, étudiant de doctorat sous la direction de Luigi Santocanale; son travail a abouti à la thèse [4]. Aussi, l'activité de recherche de Santocanale autour du projet SOAPDC constitue le chapitre principal de sa récente Habilitation à Diriger les Recherches [25].

Quelques difficultés. Une première difficulté rencontrée concerne la logistique. À l'origine la plupart de l'équipe était concentrée sur le site nord du Laboratoire d'Informatique Fondamentale de Marseille. En septembre 2006, les recrutements de Nicolas Baudrus et Rémi Morin à l'Université de la Méditerranée coupent l'équipe en deux tronçons. L'organisation régulière de rencontres et discussions sur les thèmes du projet, qui avait eut lieu jusqu'à ce moment, devient alors assez problématique.

Une autre difficulté majeure concerne les outils : nous avons enregistré, trop souvent, des ralentissements et blocages dans le développement. À notre avis, ce type d'impasse est principalement du à la difficulté de recruter de la force travail qualifiée pour le développement. Dans notre demande de soutien nous envisagions d'employer un chercheur postdoctorant. Le soutien de l'Agence Nationale de la Recherche a été inférieur par rapport aux moyens financiers demandés, exactement en ce que les moyens finalisés à ce recrutement n'ont pas nous été accordés. Au cours du projet, nous avons essayé de contourner cet obstacle en demandant à l'ANR, par la voie des rapports semestriels, si c'était possible destiner une part des nos moyens au recrutement d'ingénieurs de recherche et ou stagiaires. Nous aurions du poser cette question par d'autres moyens.

Le projet AMSC, principalement porté par Rémi Morin et Nicolas Baudru, a été contrarié à plusieurs reprises. D'une part le recrutement de chacun d'eux dans une nouvelle université les a conduit à investir plus de temps à l'insertion dans une nouvelle équipe pédagogique et a rendu plus difficile le recrutement d'étudiants qualifiés pour le codage de l'outil. D'autre part, la publication par Bollig et al. [7] de l'outil concurrent MSCan, en de nombreux points similaire aux objectifs recherchés, a considérablement réduit l'intérêt et la motivation pour la poursuite du développement d'AMSC. Au total, un tel projet visant à illustrer rapidement des résultats fondamentaux obtenus nous semble à posteriori difficile sans l'assurance d'une main d'oeuvre technique de qualité.

Le projet ELSE/POEM a aussi rencontré des nombreuses difficultés. Rappelons d'abord que le projet a connus une première période très active qui a porté à des publications de qualité aussi sur des aspects de l'implantation [20]. POEM a reçu pendant cette période l'apport de Hongyang Qu, postdoctorant au LIF de Marseille sur un aide financier extérieur² au projet SOAPDC. Le départ de Qu de Marseille et de France, a signée un premier blocage du projet.

Afin de rendre complémentaire développement et recherche fondamentale, nous avons demandé au responsable de POEM de rendre publique à l'équipe SOAPDC le code source de cet outil. Cette demande s'est transformée en un objectif trop ambitieux, celui de rendre publique le code source de POEM sous licence GPL. L'objectif a échoué bien vite, nous croyons en raison de la difficulté de rendre publique un code qui a grossis en étant longtemps privé.

Nous remarquons enfin que l'activité autour du projet POEM a repris, depuis juin 2008, un élan remarquable, grâce à la présence de Janusz Malinowski, stagiaire. D'ailleurs, le manque des renseignements reçus à cet égard de la part du responsable POEM, conduit le responsable SOAPDC à penser que l'outil POEM est déjà projeté vers d'autres sources de financement, et à considérer que cette activité récente ne puisse pas raisonnablement s'inscrire dans le projet SOAPDC.

Conclusions. Nous considérons d'une très bonne qualité les résultats obtenus avec notre recherche de type fondamental. La projet et le financement de l'ANR ont contribué à obtenir ces résultats et à les diffuser. Nous avons aussi des objectifs et attentes assez importantes en relation avec nos activités d'implantation, qui ont été achevés seulement partiellement. À posteriori, les difficultés rencontrés ici se révèlent naturelles et prévisibles.

Des nouveaux projets de développement, que nous éventuellement proposerons à l'ANR, établiront des objectifs précis et surtout adéquats aux ressources, humaines et financières, disponibles.

²Financement d'origine Européen, projet AMETIST.

Bibliographie

- [1] M. R. Assous, V. Bouchitté, C. Charretton, B. Rozoy, Finite labelling problem in event structures, *Theoret. Comput. Sci.* 123 (1) (1994) 9–19, number theory, combinatorics and applications to computer science (Marseille, 1991).
- [2] N. Baudru, R. Morin, Unfolding synthesis of asynchronous automata., in : D. Grigoriev, J. Harrison, E. A. Hirsch (eds.), *CSR*, vol. 3967 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2006.
- [3] N. Baudru, R. Morin, Synthesis of safe message-passing systems, in : V. Arvind, S. Prasad (eds.), *FSTTCS*, vol. 4855 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2007.
- [4] W. Belkhir, Algebra and combinatorics of parity games, Ph.D. thesis, Université de Provence (Dec. 2008).
- [5] W. Belkhir, L. Santocanale, The variable hierarchy for the lattice μ -calculus, in : I. Cervesato, H. Veith, A. Voronkov (eds.), *LPAR 2008*, vol. 5330 of [Lecture Notes in Computer Science](#), Springer, 2008, proceedings of the 15th International Conference on Logic for Programming, Artificial Intelligence, and Reasoning, Doha, Qatar, November 22-27, 2008.
- [6] M. K. Bennett, G. Birkhoff, Two families of Newman lattices, *Algebra Universalis* 32 (1) (1994) 115–144.
- [7] B. Bollig, C. Kern, M. Schlütter, V. Stolz, Mscan - a tool for analyzing msc specifications, in : H. Hermanns, J. Palsberg (eds.), *TACAS*, vol. 3920 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2006.
- [8] N. Caspard, C. Le Conte de Poly-Barbut, M. Morvan, Cayley lattices of finite Coxeter groups are bounded, *Adv. in Appl. Math.* 33 (1) (2004) 71–94.
- [9] J. Chalopin, E. Godard, Y. Métivier, Local terminations and distributed computability in anonymous networks, in : G. Taubenfeld (ed.), *DISC*, vol. 5218 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2008.
- [10] R. P. Dilworth, A decomposition theorem for partially ordered sets, *Ann. of Math.* (2) 51 (1950) 161–166.
- [11] S. Haar, On cyclic orders and synchronisation graphs, Tech. Rep. RR-4007, INRIA (Oct. 2000).
- [12] P. Ille, P. Ruet, Cyclic extensions of order varieties, *Electr. Notes Theoret. Comput. Sci.* 212 (2008) 119–132.
- [13] A. Joyal, Free lattices, communication and money games, in : *Logic and scientific methods* (Florence, 1995), vol. 259 of *Synthese Lib.*, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 1997, pp. 29–68.
- [14] M. E. Kurbán, P. Niebert, H. Qu, W. Vogler, Stronger reduction criteria for local first search., in : K. Barkaoui, A. Cavalcanti, A. Cerone (eds.), *ICTAC*, vol. 4281 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2006.
- [15] M. Latapy, R. Mantaci, M. Morvan, H. D. Phan, Structure of some sand piles model, *Theoret. Comput. Sci.* 262 (1-2) (2001) 525–556.
- [16] R. Morin, Mso logic for unambiguous shared-memory systems, in : M. Ito, M. Toyama (eds.), *Developments in Language Theory*, vol. 5257 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2008.
- [17] R. Morin, Semantics of deterministic shared-memory systems, in : F. van Breugel, M. Chechik (eds.), *CONCUR*, vol. 5201 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2008.

- [18] M. H. A. Newman, On theories with a combinatorial definition of “equivalence.”, *Ann. of Math.* (2) 43 (1942) 223–243.
- [19] P. Niebert, H. Qu, Adding invariants to event zone automata., in : E. Asarin, P. Bouyer (eds.), *FORMATS*, vol. 4202 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2006.
- [20] P. Niebert, H. Qu, The implementation of mazurkiewicz traces in poem., in : S. Graf, W. Zhang (eds.), *ATVA*, vol. 4218 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2006.
- [21] L. Santocanale, Derived semidistributive lattices, accepted for publication in the journal *Algebra Universalis* (Jul. 2007).
- [22] L. Santocanale, A nice labelling for tree-like event structures of degree 3, in : L. Caires, V. Vasconcelos (eds.), *CONCUR 2007*, vol. 4703 of [Lecture Notes in Computer Science](#), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007, @Springer-Verlag.
- [23] L. Santocanale, On the join dependency relation in multinomial lattices, *Order* 24 (3) (2007) 155–179, @Springer.
- [24] L. Santocanale, Combinatorics from concurrency : the nice labelling problem for event structures, in : Y. Boudabbous, N. Zaguia (eds.), *ROGICS’08*, 2008, proceedings of the International Conference on Relations, Orders and Graphs : Interaction with Computer Science. 12-17 May, 2008, Mahdia, Tunisia.
- [25] L. Santocanale, Structures algébriques et d’ordre en logique et concurrence, *Habilitation à Diriger les Recherches*, Université de Provence (Dec. 2008).
- [26] L. Santocanale, A duality for finite lattices, to be presented at the conference *TACL 2009*, Amsterdam, Holland, july 7-11 2009 (Jan. 2009).
- [27] L. Santocanale, Topological properties of event structures, *Electr. Notes Theor. Comput. Sci.* 230 (2009) 149–160, *GETCO 2006*, Geometrical and Topological Methods in Concurrency, Bonn, August 26 2006.
- [28] B. Wiest, J. Crisp, E. Godelle, A linear time solution to the conjugacy problem in right-angled artin groups and their subgroups, to appear in *Journal of Topology*.