

Annexe 1 : Programme scientifique du PICS

Logique linéaire et applications

1 Projet de recherche

1.1 Description et objectifs :

Mots-clés: *logique linéaire, programmation fonctionnelle, typage, complexité implicite, concurrence.*
(Les références dans le texte ci-dessous renvoient à la bibliographie de la Section 3.)

Ce projet concerne la logique linéaire et ses applications à différents aspects des langages de programmation : langages de programmation fonctionnelle; complexité implicite ; systèmes concurrents. Il s'appuie sur une collaboration bien ancrée entre différents sites italiens et français.

La logique linéaire est un système logique accordant une place explicite à la notion de ressource, introduite en théorie de la démonstration et utilisée en particulier pour l'étude de la programmation fonctionnelle (langage CAML), à travers le λ -calcul, le noyau de ces langages. Elle s'inscrit dans le cadre de la *correspondance de Curry-Howard* qui relie preuves formelles d'une part et programmes d'autre part : une procédure de réécriture des preuves (*normalisation*) correspond à l'exécution des programmes.

Notre projet comporte trois volets :

1. Logique linéaire et sémantique :

La sémantique dénotationnelle a ses origines dans les travaux de D. Scott et C. Strachey des années '60. Son objectif est de modéliser un langage de programmation, qui est usuellement présenté au moyen d'une syntaxe, au moyen de structures mathématiques plus abstraites, pour lesquelles on dispose d'un plus grand éventail d'outils et de techniques de preuve.

La correspondance de Curry-Howard a encouragé le développement de sémantiques dénotationnelles de systèmes logiques. Et c'est justement grâce à l'étude de certaines sémantiques dénotationnelles logiques que, vers 1986, Jean-Yves Girard a introduit la logique linéaire, laquelle en retour a apporté de nouvelles techniques pour l'étude du λ -calcul. Ce résultat a ainsi illustré l'interaction fructueuse entre logique et informatique.

Les *réseaux de preuves* sont l'un des outils les plus importants offerts à la théorie de la démonstration par la logique linéaire. Il s'agit d'un formalisme graphique pour représenter les preuves logiques ; par rapport à des formalismes plus traditionnels, comme le calcul de séquents, les réseaux permettent de représenter une preuve avec un plus haut degré de parallélisme.

L'étude de la dynamique des réseaux de preuve (*normalisation*) est fondamentale dans toutes les applications de la logique linéaire, en particulier pour la complexité implicite et la concurrence, dont nous parlerons ensuite. La sémantique dénotationnelle fournit des invariants de cette dynamique, et elle est donc le socle sur lequel reposent beaucoup de questions que nous souhaitons analyser dans notre collaboration. En particulier, il existe déjà des applications importantes de la sémantique à la complexité implicite, basées sur la sémantique relationnelle [5], la sémantique des jeux [21] et la géométrie de l'interaction [3].

Par ailleurs des travaux de sémantique dénotationnelle ont conduit Ehrhard et Régnier à introduire vers 2006 la *logique linéaire différentielle*, une extension de la logique linéaire pertinente pour l'étude de la concurrence. La sémantique dénotationnelle joue donc un rôle à la fois fondateur et fédérateur dans les recherches que nous poursuivrons au cours de notre collaboration.

2. Complexité implicite :

Ce domaine vise à définir des langages de programmation pour lesquels tous les programmes terminent avec une borne de complexité garantie en temps ou en espace, par exemple en temps polynomial (Ptime) ou en espace logarithmique (Logspace). Cette ligne de recherche a des applications potentielles dans deux domaines différents de l'informatique, la complexité computationnelle d'une part et la vérification statique des programmes d'autre part. Dans le premier domaine, les langages de programmation définis de cette manière peuvent servir à caractériser une classe de complexité: les fonctions définissables sont exactement celles qu'on peut calculer avec certaines limites de ressources. Dans le second domaine, on se sert de cette approche pour définir, dans le cadre d'un langage de programmation généraliste, des critères sur les programmes, qui peuvent être testés de manière statique et qui, dans le cas où ils sont satisfaits, garantissent une borne de complexité explicite sur le temps d'exécution du programme sur n'importe quelle entrée, ou sur l'espace mémoire nécessaire à l'exécution.

La logique linéaire a dans cet esprit permis la définition de systèmes logiques dits *light*, dont la normalisation a une complexité bornée. Plus précisément, des langages de programmation et des systèmes logiques dérivés de la logique linéaire ont été définis pour caractériser les fonctions calculables en espace logarithmique, en temps polynomial et en espace polynomial. Il s'agit de systèmes logiques où les programmes sont représentés par des réseaux de preuve ou des systèmes de types pour le λ -calcul. Les sémantiques de jeux et la géométrie de l'interaction fournissent des outils sémantiques pour l'étude de ces systèmes [21].

La complexité implicite a déjà produit des résultats remarquables. Toutefois, un certain nombre de problèmes restent ouverts. Dans ce projet, nous allons en explorer deux en particulier. Premièrement, les critères de complexité implicite pour les programmes ont souvent une faible expressivité *intensionnelle*: ils valident au moins un algorithme pour chaque fonction Ptime, mais souvent ce ne sont pas les algorithmes les plus courants. Par conséquent la recherche de critères de complexité implicite avec une bonne expressivité intensionnelle est une direction de recherche importante, notamment pour les applications. Deuxièmement, les compétences des groupes impliqués dans le projet permettront d'explorer si les techniques de la complexité implicite peuvent être utilisées dans d'autres contextes et en particulier pour garantir des bornes en temps et en espace dans l'extraction de programmes à partir de preuves formelles (développées avec un logiciel d'aide à la preuve) et les calculs de processus pour la concurrence (voir Section suivante).

3. Concurrence :

Des domaines comme le calcul mobile, les protocoles de communication ou les systèmes temps-réel ne peuvent être modélisés avec le λ -calcul et nécessitent d'autres formalismes, rendant compte du calcul concurrent : les calculs de processus, comme le π -calcul, sont l'analogue du λ -calcul pour l'analyse de systèmes concurrents.

Il est utile, en particulier, de disposer de méthodes pour garantir des propriétés portant sur l'exécution d'un processus concurrent. Différentes techniques ont été exploitées pour cela, et notamment l'utilisation de *systèmes de types*, c'est-à-dire de mécanismes qui permettent d'associer un *type* à certains processus. Ce mécanisme est conçu de façon à garantir que les processus typables jouissent de certaines propriétés, comme par exemple la terminaison [7, 8]. Une première direction de recherche consiste à enrichir et affiner ces techniques d'analyse (pour la terminaison, mais aussi, plus généralement, pour garantir des propriétés comportementales des processus) en appliquant les idées qui sous-tendent la logique linéaire aux systèmes de types pour les calculs de processus. Cela semble d'autant plus pertinent que des notions comme la linéarité, ou le contrôle explicite sur la réutilisation des ressources, ont déjà donné des applications fructueuses dans ce sens.

Une deuxième direction de recherche, plus ambitieuse encore, concerne l'application de la théorie de la démonstration à la modélisation elle-même du calcul concurrent. Dans le contexte du calcul déterministe, la *correspondance de Curry-Howard* a donné un fondement logique au développement de la programmation fonctionnelle ; depuis les années '60, logique et informatique ont connu des avancées

remarquables grâce à cette correspondance, qui permet à ces deux disciplines d’interagir et d’échanger de nombreuses idées et concepts. À l’heure actuelle, cette correspondance ne dispose pas d’équivalent dans le contexte du calcul concurrent. Un premier pas vers la construction d’une correspondance de Curry-Howard pour la concurrence est venu de la *logique linéaire différentielle*, introduite par Ehrhard et Regnier. Ehrhard et Laurent ont montré que les primitives fondamentales du π -calcul peuvent être exprimées en logique linéaire différentielle, autrement dit, celle-ci peut être vue comme un modèle du calcul concurrent. Toutefois, il reste encore un grand nombre de questions ouvertes concernant le rapport entre logique linéaire différentielle et concurrence : quelles sont exactement les primitives concurrentes données par la logique linéaire différentielle ? Comment peut-on les comparer aux primitives “standard” ? Qu’en est-il de la sémantique dénotationnelle de la logique linéaire différentielle une fois qu’on la considère comme modèle du calcul concurrent ? Autrement dit, quelles équivalences comportementales valide-t-elle, et quelle relation y a-t-il entre ces équivalences et celles déjà connues dans la théorie des calculs de processus ? C’est autour de ces questions, ou d’autres questions directement liées à celles-ci, que nous concentrerons notre réflexion au cours de notre collaboration.

1.2 Contexte international

La France et l’Italie sont leader dans le domaine de la logique linéaire, comme en attestent les publications dans cette thématique. Les principaux autres groupes travaillant sur ce sujet se situent au Canada, Japon et Grande-Bretagne. Dans le domaine de la complexité implicite, outre la France et l’Italie des travaux sont menés surtout en Allemagne, aux Etats-Unis et au Japon. Dans le domaine des systèmes concurrents la Grande-Bretagne est leader et des groupes sont actifs notamment en France, Italie, Allemagne . . .

La collaboration bi-nationale de ce projet permettra donc de tirer parti des points forts des groupes français et italiens, ainsi que de leurs complémentarités (Section 2) afin de consolider leur place en Europe et au niveau international sur des champs de recherche connexes à la logique linéaire (concurrence, complexité implicite).

2 Valeur ajoutée de la coopération

Au niveau national, dans chacun des deux pays partenaires, les sites impliqués disposent déjà de projets dans lesquels mener leur travaux en collaboration dans ce domaine (notamment le projet CONCERTO en Italie, et les projets ANR CHOCO et COMPLICE en France, voir Section 5) et qui permettent d’organiser des rencontres de membres des trois sites du pays. Cependant ces projets n’ont pas vocation (et ne disposent pas du financement nécessaire) à renforcer une collaboration binationale. De plus, étant donnés les liens thématiques entre ces projets et l’expérience de collaboration entre les sites des deux pays, un projet de coopération binationale permettrait de tirer parti des dynamiques en cours et d’établir une synergie fructueuse pour les recherches en commun.

Nos sites ont une expérience suivie de travaux en collaboration, comme on peut en juger par les articles en co-signatures de la Section 3 et les thèses de la Section 6. De plus, bien que partageant une même culture scientifique ils disposent de spécificités et de points forts qui les rendent complémentaires, et dont la mise en commun est nécessaire pour avancer sur les questions ouvertes : citons par exemple l’expérience de Turin dans le domaine des systèmes de types, de Bologne sur le sujet des systèmes concurrents et d’une part et la complexité implicite d’autre part, de Rome et de Paris 13 sur les réseaux de preuves de la logique linéaire, de Paris 7 et l’ENS Lyon sur les sémantiques de jeux . . .

Enfin, comme un certain nombre de collaborations entre chercheurs italiens et français sont déjà en place et ont donné lieu à plusieurs articles, les visites de recherche permettront de travailler directement ensemble (sans nécessiter une première phase de mise en place) et pourront donc conduire plus rapidement à des résultats et des productions d’articles. L’un des buts de ce projet est aussi que cette expérience de travail en collaboration se transmette à la génération des jeunes chercheurs (en particulier ceux formés en cotutelles, voir Section 6) , et pour cela un support permettant des missions dans le pays partenaire est indispensable.

3 Travaux déjà effectués

Nous citons dans la bibliographie ci-dessous les 27 articles publiés en co-signature croisée entre des membres des sites italiens et français.

References

- [1] Michele Abrusci, Christophe Fouqueré, and Jacqueline Vauzeilles. Tree adjoining grammars in a fragment of the lambek calculus. *Computational Linguistics*, 99(9):209–236, 1999.
- [2] Patrick Baillot, Paolo Coppola, and Ugo Dal Lago. Light logics and optimal reduction: Completeness and complexity. In *LICS*, 2007.
- [3] Patrick Baillot and Marco Pedicini. Elementary complexity and geometry of interaction. *Fundamenta Informaticae*, 45(1-2):1–31, 2001.
- [4] Arnaud Carayol, Daniel Hirschhoff, and Davide Sangiorgi. On the representation of mccarthy’s amb in the pi-calculus. *Theor. Comput. Sci.*, 330(3):439–473, 2005.
- [5] Daniel De Carvalho, Michele Pagani, and Lorenzo Tortora de Falco. A semantic measure of the execution time in linear logic. *Theoretical Computer Science*, 2009. special issue Girard’s Festschrift, to appear.
- [6] Mario Coppo and Daniel Hirschhoff. Incremental inference of partial types. In *ICTCS*, volume 2202 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 50–73. Springer, 2001.
- [7] Romain Demangeon, Daniel Hirschhoff, Naoki Kobayashi, and Davide Sangiorgi. On the complexity of termination inference for processes. In *proceedings of Trustworthy Global Computing, TGC 2007*, volume 4912 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2008.
- [8] Romain Demangeon, Daniel Hirschhoff, and Davide Sangiorgi. Static and dynamic typing for the termination of mobile processes. In *Proceedings of IFIP TCS 2008*, volume 273 of *IFIP*, pages 413–427. Springer, 2008.
- [9] Paolo Di Giamberardino and Claudia Faggian. Jump from parallel to sequential proof: Multiplicatives. volume 4207 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 319–333. Springer Berlin / Heidelberg, 2006.
- [10] Paolo Di Giamberardino and Claudia Faggian. Proof nets sequentialisation in multiplicative linear logic. *Annals of Pure and Applied Logic*, 155 (3):173–182, 2008.
- [11] Claudia Faggian and Mauro Piccolo. A graph abstract machine describing event structure composition. *ENTCS*, 175(4):21–36, 2007.
- [12] Claudia Faggian and Mauro Piccolo. Ludics is a model for the finitary linear pi-calculus. In *Proceedings of TLCA ’07*, volume 4583 of *LNCS*, pages 148–162, 2007.
- [13] Daniel Hirschhoff, Étienne Lozes, and Davide Sangiorgi. Separability, expressiveness, and decidability in the ambient logic. In *LICS*, pages 423–432. IEEE Computer Society, 2002.
- [14] Daniel Hirschhoff, Étienne Lozes, and Davide Sangiorgi. Minimality results for the spatial logics. In *FSTTCS*, volume 2914 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 252–264. Springer, 2003.
- [15] Daniel Hirschhoff, Étienne Lozes, and Davide Sangiorgi. On the expressiveness of the ambient logic. *Logical Methods in Computer Science*, 2(2), 2006.
- [16] Daniel Hirschhoff, Damien Pous, and Davide Sangiorgi. A correct abstract machine for safe ambients. In *COORDINATION*, volume 3454 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 17–32. Springer, 2005.
- [17] Daniel Hirschhoff, Damien Pous, and Davide Sangiorgi. An efficient abstract machine for safe ambients. *J. Log. Algebr. Program.*, 71(2):114–149, 2007.
- [18] Jean-Baptiste Joinet, Harold Schellinx, and Lorenzo Tortora de Falco. Strong normalization for all-style lk^{tq} . In *Proceedings of the conference Theorem proving with Analytic Tableaux and Related Methods, 5th International Workshop, TABLEAUX 96*, volume 1071 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pages 226–243. Springer, 1996.
- [19] Jean-Baptiste Joinet, Harold Schellinx, and Lorenzo Tortora de Falco. SN and CR for free-style LK^{tq} : linear decorations and simulation of normalization. *Journal of Symbolic Logic*, 67 (1):162–196, 2002.
- [20] Ugo Dal Lago and Patrick Baillot. On light logics, uniform encodings and polynomial time. *Mathematical Structures in Computer Science*, 16(4):713–733, 2006.

- [21] Ugo Dal Lago and Olivier Laurent. Quantitative game semantics for linear logic. In *Proceedings of CSL'08*, volume 5213 of *LNCS*, pages 230–245, 2008.
- [22] Olivier Laurent and Roberto Maieli. Cut elimination for monomial mall proof nets. In *Proceedings of the twenty-third annual IEEE symposium on Logic In Computer Science (LICS '08)*, 2008.
- [23] Olivier Laurent, Myriam Quatrini, and Lorenzo Tortora de Falco. Polarized and focalized linear and classical proofs. *Annals of Pure and Applied Logic*, 134, Issues 2-3:95–316, 2005.
- [24] Olivier Laurent and Lorenzo Tortora de Falco. Slicing polarized additive normalization. In Thomas Ehrhard, Jean-Yves Girard, Paul Ruet, and Philip Scott, editors, *Linear Logic in Computer Science*, volume 316 of *London Mathematical Society Lecture Note Series*, pages 247–282. Cambridge University Press, 2004.
- [25] Olivier Laurent and Lorenzo Tortora de Falco. Obsessional cliques: a semantic characterization of bounded time complexity. In *Proceedings of the twenty-first annual IEEE symposium on Logic In Computer Science (LICS '06)*, 2006.
- [26] Damiano Mazza and Michele Pagani. The separation theorem for differential interaction nets. In N. Dershowitz and A. Voronkov, editors, *Proceedings of the 14th International Conference on Logic for Programming, Artificial Intelligence and Reasoning (LPAR 2007)*, volume 4790 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pages 393–407. Springer, 2007.
- [27] Michele Pagani and Christine Tasson. The inverse taylor expansion problem in linear logic. In *Proceedings of LICS'09*. IEEE, 2009. To appear.

4 Plan de travail et étapes

- année 2010:
 - séminaire-rencontre : sur le modèle des rencontres organisées en France par les projets CHOCO et COMPLICE et en Italie par CONCERTO (voir Section 5), nous organiserons une rencontre bi-nationale de 2 jours pour les 6 partenaires du projet, dans l'un des trois sites italiens, et qui sera soutenue par ces trois projets. Ce sera l'occasion pour les participants de présenter leur travaux et de poser des jalons pour le déroulement du projet PICS. Ce séminaire-rencontre pourrait se tenir en Septembre ou Octobre 2010 et réunir environs 35 participants.
 - les missions de cette première année permettront de commencer les recherches en collaborations, et pour les jeunes chercheurs de se familiariser avec les sites partenaires;
- année 2011:
 - les missions seront l'occasion de rédiger les articles des premiers résultats obtenus, de poursuivre les travaux sur les questions plus difficiles, ainsi que d'entamer de nouvelles collaborations; on soumettra les premiers articles à des conférences et revues internationales.
- année 2012:
 - achèvement des travaux et rédaction et soumission des articles.

5 Partenariats et sources de financement extérieures

Projets nationaux italiens ou français en rapport avec le domaine, et dans lesquels sont impliqués les sites :

- France: projet ANR CHOCO (Curry-Howard pour la concurrence), 2008-2011 : <http://choco.pps.jussieu.fr/> (les 3 sites français sont impliqués)
- France: projet ANR COMPLICE (Complexité Implicite, Concurrence et Extraction), 2009-2012 : <http://www-lipn.univ-paris13.fr/compllice/spip.php?rubrique1> (les sites ENS Lyon et Paris 13 sont impliqués)
- France: projet ANR PARSEC (Parallélisme et sécurité): <http://moscova.inria.fr/~zappa/projects/parsec/parsec.html> (site Paris 7)

- Italie: projet MIUR CONCERTO : <http://www.cs.unibo.it/~martini/CONCERTO/> (les 3 sites italiens sont impliqués)

6 Formation par la recherche

Nos sites ont une forte expérience de collaboration dans la formation des jeunes chercheurs : plusieurs thèses ont été encadrées en co-tutelle ou avec des séjours dans le pays partenaire du doctorant; plusieurs docteurs formés dans nos sites ont ensuite effectué un post-doctorat dans un site du pays partenaire, et certains parmi eux ont été recrutés comme enseignant-chercheur à la suite. Cet investissement dans la formation par la recherche est étroitement lié à nos recherches en collaboration, et nous y attachons une importance particulière dans le cadre de ce projet. C'est pourquoi nous avons en particulier prévu des missions de doctorants et de postdoctorants parmi les visites mentionnées en Annexe 2. Pour certaines de ces missions les noms ne sont pas indiqués, car nous ne connaissons pas encore les noms de tous les doctorants et postdoctorants de nos sites pendant cette période de trois ans (même si l'expérience nous permet d'estimer leur nombre approximatif). Nous détaillons ci-dessous la liste des thèses en cotutelle, ainsi que des jeunes chercheurs ayant effectué un postdoctorat dans un site du pays partenaire :

- **Thèses en co-tutelle italo-française dans lesquelles sont ou ont été impliqués des sites du projet (7 soutenues et 3 en cours) :**

Damiano Mazza (soutenue en 2006, avant d'être recruté comme CR CNRS à Paris 13); Michele Pagani (soutenue en 2006); Gabriele Pulcini (soutenue en 2006); Marco Gaboardi (soutenue en 2007); Paolo Di Giamberardino (soutenue en 2008); Luca Fossati (soutenue en 2009); Paolo Tranquilli (soutenue en 2009, thèse bénéficiant d'un financement de l'Université italo-française, programme Vinci); Marco Romano (Roma Tre-Paris 13, thèse en cours); Mauro Piccolo (Turin-Paris 7, thèse en cours, bénéficiant d'un financement de l'Université italo-française, programme Vinci); Romain Demangeon (ENS Lyon-Bologne, thèse en cours, bénéficiant d'un financement de l'Université italo-française, programme Vinci).

- **Postdoctorants français des sites italiens (2 en cours) :**

Daniel De Carvalho (doctorat en France, Post-doc à Roma Tre depuis février 2009); Alexis Saurin (doctorat en France, Post-doc à Turin depuis octobre 2008).

- **Postdoctorants et ATER italiens des sites français (2 en cours et 2 passés) :**

Paolo Di Giamberardino (doctorat à Roma Tre, ATER à Paris 13 depuis septembre 2008); Paolo Tranquilli (doctorat à Roma Tre, ATER à Paris 7 depuis septembre 2008); passé : Michele Pagani (doctorat à Roma Tre, Post-doc à Paris 7 en 2007-08 suivi d'un ATER de 6 mois à Paris 7 en 2008-09, puis Post-doc à Turin en cours); passé : Ugo Dal Lago (postdoctorat à Paris 13 en mai-octobre 2006, puis à Paris 7 dans le cadre du programme Marie Curie de janvier à 2007-mars 2008, avant d'être recruté comme Ricercatore à Bologne).