

Rapport HCERES

I.3 - Les thématiques scientifiques et leurs enjeux (vision unité)

Contenu de la section

1	Introduction	2
2	Les Thèmes	
2.1	Complexité descriptive	4
2.2	Aspects calculateurs des théories mathématiques (ZFC, PA, Topos...)	6
2.3	Premiers et programmes	8
2.4	Droit du numérique	10
2.5	Modèles de calculs	11
2.6	Spécification de systèmes avec la méthode Event-B	14
2.7	Modèles et Méthodes pour l'analyse des systèmes dynamiques à événements discrets	19
2.8	Méthodes formelles pour les transductions	23
2.9	Parallélisme et calcul haute performance	25
2.10	Synthèse et vérification des systèmes informatiques	28
2.11	Logiques et modèles expressifs pour les systèmes multi-agents concurrents	33
2.12	Evaluation de performances	37
A	Les gens	42
A.1	Alexis Bès	42
A.2	Patrick Cégielski	43
A.3	Julien Cervelle	44
A.4	Laura Fontanella	45
A.5	Julien Grange	47
A.6	Florent Madelaine	48
A.7	Luidnel Maignan	50
A.8	Benoit Monin	53
A.9	Emmanuel Polonowski	56
A.10	Luc Pellissier	57
A.11	Antoine Spicher	59
A.12	Pascal Vanier	61
A.13	Pierre Valarcher	62
A.14	Serghei Verlan	63
A.15	Benoît Barbot	66
A.16	Damien Busatto-Gaston	67
A.17	Luc Dartois	67
A.18	Catalin Dima	68
A.19	Frédéric Gava	70
A.20	Frédéric Gervais	70
A.21	Régine Laleau	71
A.22	Adrien Le Coënt	72
A.23	Lynda Mokdad	72
A.24	Youssouf Oualhadj	74
B	Détails	75

1 Introduction

Le laboratoire LACL

Le LACL est spécialisé en informatique fondamentale et travaille dans les thématiques de la calculabilité, de la logique, des automates et de la vérification formelle. Le laboratoire LACL est composé d'une seule équipe au sens de l'HCERES, organisé par tradition selon 2 axes¹.

- (LCP) Logique Calcul et Programmation
- (SVS) Spécification et vérification de systèmes

Il y a des interactions entre les membres des deux axes, en particulier, tout le laboratoire se retrouve lors d'un séminaire hebdomadaire régulier, chaque lundi, bien suivi par ses membres, avec un bon équilibre entre exposés internes et exposés extérieurs.

Il y a une grande liberté scientifique au sein du laboratoire : les membres travaillent de façon autonome au sein de thèmes, et chacun est libre de travailler sur le domaine qui l'intéresse avec ou sans autres membres du laboratoire. Pour faciliter la lecture de ce compte-rendu de l'activité scientifique du laboratoire, nous avons articulé ce rapport selon 12 thèmes présentés en Section 2.

L'axe LCP compte 15 permanents, l'axe SVS compte 22 permanents sur la période de référence, avec 22 MCF et 15 PR dont 2 émérites.

- Les permanents sont basés sur plusieurs sites de l'UPEC, principalement les trois premiers listés ci-dessous.
- le département informatique de la faculté de sciences à Créteil (FST)
 - Le département informatique de l'IUT de Sénart Fontainebleau, principalement à Fontainebleau (IUT SF)
 - L'école d'ingénieur EPISEN à Créteil (EPISEN).
 - Le département MMI de l'IUT de Sénart Fontainebleau, à Sénart (IUT S)
 - La faculté de droit à Créteil (FD)
 - La faculté de Sciences Économiques et de Gestion à Créteil (FSEG)

Il est à noter que les sites de l'IUT de Sénart-Fontainebleau sont assez éloignés des autres sites, qui eux sont tous à proximité du Campus centre de l'UPEC à Créteil. Il faut compter entre 1 et 2 heures en transport en commun pour rejoindre le campus centre depuis l'IUT.

Les permanents sont listés Table 1, les non permanents Table 2 et les doctorants Table 3.

Panorama du laboratoire via ses deux axes et ses 12 thèmes

Avant de zoomer sur les membres principaux et l'activité présente et future de chaque thème en section 2, nous présentons ci-après un graphes pour mieux visualiser les liens entre ces thèmes et faciliter une lecture non linéaire du présent rapport.

¹le site du LACL et la plupart des membres du laboratoire utilisent le terme d'équipe plutôt que d'axe par habitude.

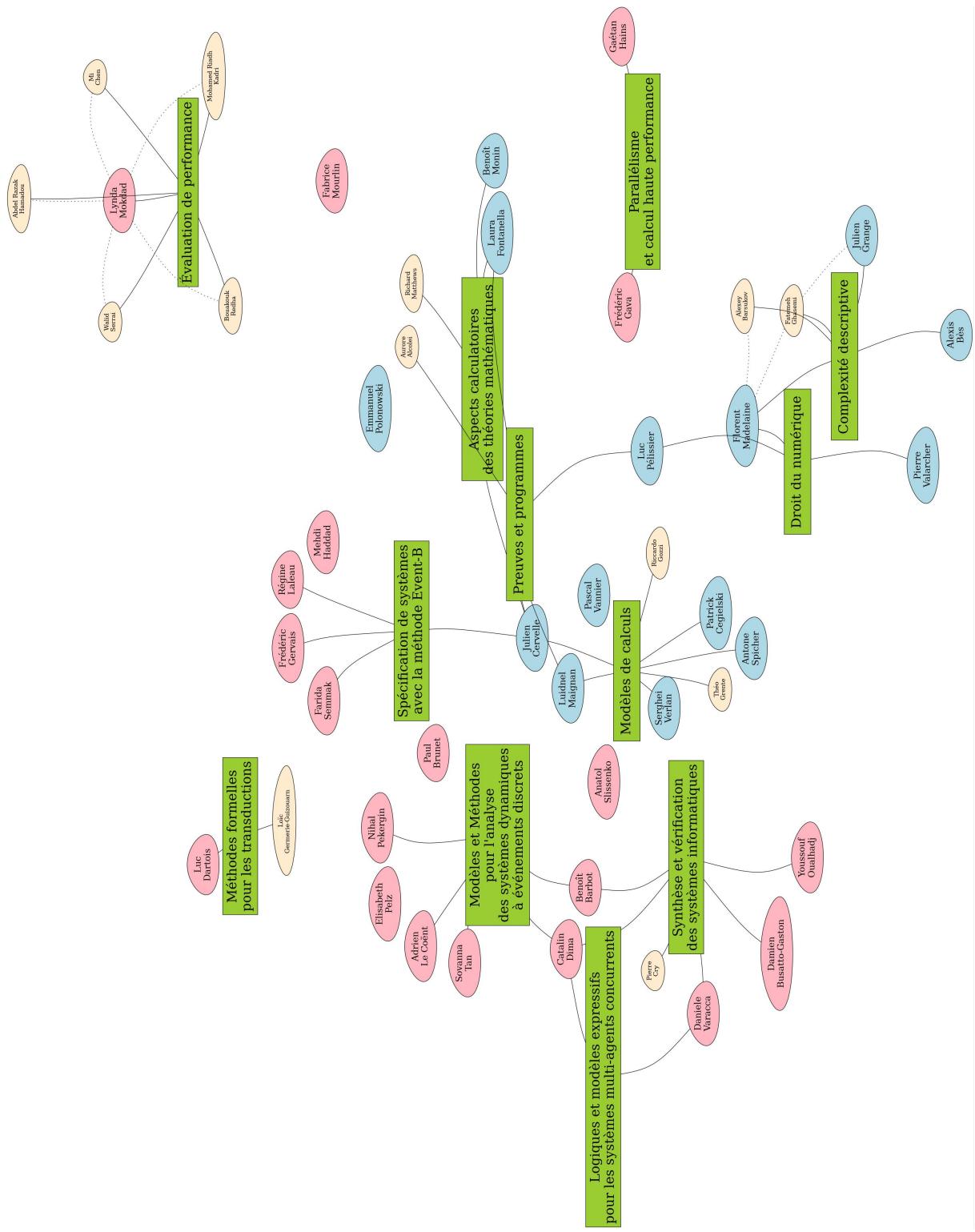


FIGURE 1 : Graphe global des personnes et des thèmes

2 Les Thèmes

2.1 Complexité descriptive

- Alexis Bès
- Julien Grange
- Florent Madelaine

Thématiques

Nous nous intéressons tous à ce qui est définissable dans divers logiques, souvent avec un aspect calculatoire explicite, que ce soit pour des aspects de décidabilité ou de complexité.

En ce qui concerne les objets d'études, nous travails plutôt sur des structures finies (JG et FM) ou non (AB). Alexis Bès travaille sur des mots infinis, dans un contexte d'arithmétique faible. Julien Grange travaille typiquement sur des graphes finis équipés de relations additionnelles comme un successeur ; Florent Madelaine travaille sur des structures relationnelles finies mais tous deux sont amenées à travailler sur des structures infinies sous-jacentes à l'étude des ces structures finies, par exemple des structures limites.

Ainsi Alexis Bès fournit une caractérisation de la définissabilité au premier ordre dans la théorie additive des réels, qui peut se re-formuler de manière effective pour une classe très générale de relations, en particulier pour les relations reconnaissables par automate. Une conséquence est la décidabilité de la question de savoir si une relation n -aire sur les réels qui est reconnaissable par automate est reconnaissable en toute base [BC22 ; BC21 ; BC20].

Julien Grange travaille sur un sujet typique de complexité descriptive, à savoir mieux appréhender des fragments ou extension de la logique du premier ordre qui sont définis par invariance. Par exemple, dans [Gra21], il montre que sur les classes de degré borné, l'ajout d'un successeur n'apporte pas de pouvoir d'expression à la logique du premier ordre (FO).

Cette notion d'invariance correspond au fait qu'en complexité descriptive on souhaite faire correspondre définissabilité dans une logique et calcul avec une certaine machine. Or typiquement l'entrée d'une machine de Turing est ordonnée, alors que le mot d'entrée représente un graphe qui lui ne l'est pas. Ainsi on a un ordre explicite dans le monde calculatoire mais le résultat du calcul doit être indépendant du choix spécifique de cet ordre. Pour des logiques plus expressives comme la logique existentielle du second ordre (ESO), on peut exprimer directement l'ordre pour éviter ce problème, comme par exemple dans la preuve du célèbre théorème de Fagin qui met en correspondance NP et ESO.

Julien Grange s'intéresse aussi à problème de synthèse sur les *data-words*, qui permettent de modéliser des systèmes distribués dont le nombre d'agents est non-borné. Celà revient à décider de l'existence d'une stratégie gagnante dans un jeu à 2 joueur sur des structures potentiellement infinies [GL23].

Florent Madelaine travaille également parfois sur des jeux, par exemple dans le cadre de l'étude systématique de la complexité des problèmes de contraintes quantifiées (QCSP), qu'on peut tous voir comme des problèmes de *model-checking* de fragments monotones de FO sur des structures finies fixées qui représentent les contraintes. Ce genre de caractérisation de la complexité s'inscrit dans la continuité des théorèmes de Zhuk et Bulatov qui ont démontré indépendamment la conjecture de la dichotomie de Feder et Vardi en 2017 : à savoir, que les problèmes de satisfaction de contraintes sont soit faciles à résoudre (dans P) soit difficiles (NP-complet). Ainsi Florent Madelaine obtient des résultats de tétrachotomie pour une extension de QCSP avec disjonction [MM18] et une analyse de la limite entre NP et Pspace-complet pour les QCSP [Car+23]. Dans les deux cas, on peut interpréter les résultats en terme de stratégies et de jeux qui correspondent dans le premier cas à une élimination brutale d'un ou des deux types de quantificateurs et dans l'autre à une limitation très forte de la stratégie du joueur universel.

Julien Grange et Florent Madelaine co-encadrent la thèse de Fatemeh Ghasemi depuis septembre 2023 toujours autour de cette notion d'invariance à une relation additionnelle de successeur à FO, dans l'espoir d'obtenir un problème de *model checking* de cette extension de FO qui soit presque polynomial voire linéaire en la taille de l'entrée, quitte à faire un pré-calcul qui est lui couteux mais ne dépend que d'un paramètre fixé (en jargon le problème est dans la classe de complexité FPT). Typiquement ce paramètre mesure la complexité de la formule.

- [Car+23] Catarina CARVALHO, Florent R. MADELAINE, Barnaby MARTIN et Dmitriy ZHUK. ‘The Complexity of Quantified Constraints : Collapsibility, Switchability, and the Algebraic Formulation’. In : *ACM Trans. Comput. Log.* 24.1 (2023), 5 :1-5 :26.
- [GL23] Julien GRANGE et Mathieu LEHAUT. ‘First order synthesis for data words revisited’. In : *CoRR* abs/2307.04499 (2023). arXiv : 2307.04499.

- [BC22] Alexis BÈS et Christian CHOFRUT. ‘Decidability of Definability Issues in the Theory of Real Addition’. In : *Fundam. Informaticae* 188.1 (2022), pages 15-39.
- [BC21] Alexis BÈS et Christian CHOFRUT. ‘Theories of real addition with and without a predicate for integers’. In : *Log. Methods Comput. Sci.* 17.2 (2021).
- [Gra21] Julien GRANGE. ‘Successor-Invariant First-Order Logic on Classes of Bounded Degree’. In : *Log. Methods Comput. Sci.* 17.3 (2021).
- [BC20] Alexis BÈS et Christian CHOFRUT. ‘ $\langle \mathbb{R}, +, <, 1 \rangle$ Is Decidable in $\langle \mathbb{R}, +, <, \mathbb{Z} \rangle$ ’. In : *Language and Automata Theory and Applications - 14th International Conference, LATA 2020, Milan, Italy, March 4-6, 2020, Proceedings*. Sous la direction d’Alberto LEPORATI, Carlos MARTÍN-VIDE, Dana SHAPIRA et Claudio ZANDRON. Tome 12038. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2020, pages 128-140.
- [MM18] Florent R. MADELAINE et Barnaby MARTIN. ‘On the Complexity of the Model Checking Problem’. In : *SIAM J. Comput.* 47.3 (2018), pages 769-797.

2.2 Aspects calculatoires des théories mathématiques (ZFC, PA, Topos...)

- Julien Cervelle
- Laura Fontanella
- Benoit Monin

Thématisques

Nous nous intéressons aux fondements informatiques des mathématiques. Cet axe comprends plusieurs directions de recherches qui mobilisent la calculabilité, les mathématiques à rebours, la réalisabilité et les topos élémentaires.

La calculabilité est une branche de la logique qui étudie les objets mathématiques sous le prisme de leur complexité calculatoire, c'est-à-dire de la manière dont ils se comportent vis-à-vis de la capacité de calcul théorique des ordinateurs. La calculabilité a connu des succès majeurs en servant de fondement mathématique à l'étude de certaines questions à saveur philosophique, notamment *théorie algorithmique de l'aléatoire* et les *mathématiques à rebours*. Nos recherches portent sur ces deux thèmes, ainsi que sur les calculabilités d'ordre supérieurs.

Conjointement avec Ludovic Patey, Benoit Monin a mené un travail de recherche sur le théorème de Ramsey qui a abouti à la résolution par l'affirmative d'un vieux problème du domaine, devenu ces dernières années un de ses sujets de recherche les plus actifs : "Est-ce que le théorème de Ramsey pour les pairs est strictement plus fort que sa version stable dans les ω -models ?" [MP21]. C'est sur ce sujet qu'il a soutenu son HdR en 2021.

Benoît Monin a aussi travaillé sur la théorie algorithmique de l'aléatoire dont le but est de donner un sens à l'idée intuitive d'objet aléatoire. Ainsi utilise-t-on les outils de calculabilité pour donner une définition formelle de ce qu'est une suite infinie de bits aléatoires, qui rejoigne l'intuition sur ce que l'on s'attend à obtenir en tirant à pile ou face indéfiniment. Benoît Monin a publié un article sur ce sujet [Gre+18], ainsi que trois autres sur les connexions entre l'aléatoire algorithmique et la calculabilité d'ordre supérieur [BGM21 ; MA19 ; Bie+18]. Il a également dressé un état de l'art de ces connections dans un chapitre de livre consacré à l'aléatoire algorithmique [FP20].

Julien Cervelle a poursuivi ce travail, toujorus en collaboration avec Ludovic Patey et leur doctorant William Gaudelier en étudiants différents énoncés mathématiques dérivés du "chain antichain theorem" qui indique que tout ordre sur un ensemble infini admet soit un chaîne soit une antichaîne infinie [CGP23].

La réalisabilité étudie le contenu computationnel des preuves mathématiques. En réalisabilité on établit une correspondance entre formules et programmes de manière à respecter les règles de déduction logique. Dans ce sens la réalisabilité est une extension de la célèbre correspondance Curry-Howard qui établit un isomorphisme entre preuves en logique intuitionniste et les termes du λ -calcul simplement typé. Les travaux de T. Griffin sur la typabilité de *call-cc* ont permis d'étendre la correspondance preuves-programmes à la logique classique. Grâce aux travaux de J.L. Krivine, la réalisabilité a évolué jusqu'à étendre la correspondance preuves-programmes à toute preuve mathématiques qui se base sur les axiomes de la théorie des ensembles de Zermelo Fraenkel, ZF. La méthode de Krivine fournit une technique pour construire des modèles de réalisabilité de la théorie des ensembles et extraire le contenu computationnel de ZF. Laura Fontanella continue cette reflexion pour étendre la réalisabilité à la théorie des ensembles ZFC ainsi que des axiomes de grands cardinaux.

Ces derniers sont des axiomes très puissants qui affirment l'existence de cardinaux satisfaisant des propriétés diverses combinatoires, modeles-théoriques, catégoriques et d'autres. En collaboration avec Guillaume Geoffroy et Richard Matthews, Laura Fontanella a montré que même les axiomes de grands cardinaux peuvent être réalisés par des termes du λ_C -calcul. Dans [FGM24] on construit des modèles de réalisabilité pour les cardinaux inaccessibles, les cardinaux Mahlo, les cardinaux mesurables et même pour les cardinaux de Reinhardt. Pour ces résultats nous nous sommes appuyés sur des re-formulations de ces grands cardinaux en théorie des ensembles intuitionniste.

- [FGM24] Laura FONTANELLA, Guillaume GEOFFROY et Richard MATTHEWS. 'Realizability Models for Large Cardinals'. In : *32nd EACSL Annual Conference on Computer Science Logic, CSL 2024, February 19-23, 2024, Naples, Italy*. Sous la direction d'Aniello MURANO et Alexandra SILVA. Tome 288. LIPIcs. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2024, 28 :1-28 :18.
- [CGP23] Julien CERVELLE, William GAUDELIER et Ludovic PATEY. 'The Reverse Mathematics of CAC for trees'. In : *The Journal of Symbolic Logic* (2023). 28 pages.
- [BGM21] Laurent BIENVENU, Noam GREENBERG et Benoit MONIN. 'Bad oracles in higher computability and randomness'. In : *Israel Journal of Mathematics* 241 (2021), pages 229-276.
- [MP21] Benoit MONIN et Ludovic PATEY. 'SRT22 does not imply RT22 in ω -models'. In : *Advances in Mathematics* 389 (2021), page 107903.

- [FP20] Johanna NY FRANKLIN et Christopher P PORTER. ‘Algorithmic Randomness : Progress and Prospects’. In : (2020).
- [MA19] Benoit MONIN et Paul-Elliott d’Auriac ANGLES. ‘Genericity and randomness with ITTMs’. In : *The Journal of Symbolic Logic* 84.4 (2019), pages 1670-1710.
- [Bie+18] Laurent BIENVENU, Santiago FIGUEIRA, Benoit MONIN et Alexander SHEN. ‘Algorithmic identification of probabilities is hard’. In : *Journal of Computer and System Sciences* 95 (2018), pages 98-108.
- [Gre+18] Noam GREENBERG, Joseph S MILLER, Benoit MONIN et Daniel TURETSKY. ‘Two More Characterizations of K-Triviality’. In : *Notre Dame Journal of Formal Logic* 59.2 (2018).

2.3 Preuves et programmes

- Julien Cervelle
- Laura Fontanella
- Luidnel Maignan
- Luc Pellissier

Thématiques

Les preuves et les programmes peuvent être considérés comme étant structurés par plusieurs opérations : à minima une opération de composition (d'une preuve de A et de $A \implies B$, on peut déduire une preuve de B) et une opération de réduction (un programme se réduit en son résultat). Il est remarquable que, au prisme de ces deux opérations, certains langages permettant de décrire des preuves sont isomorphes à des langages de programmation — c'est l'isomorphisme de Curry–Howard. C'est par exemple le cas des preuves de logique intuitionniste minimale en déduction naturelle et des programmes du λ -calcul simplement typé. Cette correspondance a donné lieu à des assistants de preuves tels que Coq où toute preuve est écrite et exécutée comme un programme.

Nous étudions des langages permettant de représenter ces opérations pour des constructions logiques et calculatoires de plus en plus expressives. Luc Pellissier a ainsi étudié des réseaux de preuve non-bien-fondées, un langage étendant le λ -calcul qui permet de représenter des programmes manipulant des structures de données infinies comme les flux [DPS21]. Il a aussi travaillé sur la correction (c'est-à-dire le fait qu'il est possible d'extraire de l'information en temps fini) de programmes écrits dans ce genre de langages [APS23 ; GPF22]. Ce travail est très fortement relié à celui de Laura Fontanella sur la réalisabilité classique, qui établit une correspondance entre les axiomes d'une théorie mathématique et les termes d'un langage de programmation étendant le λ -calcul. Il s'agit bien dans les deux cas de travailler à étendre ce qui est représentable comme une structure munie d'une composition et d'une réduction. Inventée par Kleene en 1945, la réalisabilité vise à extraire des programmes de toute preuve mathématique. Née dans le cadre des mathématiques constructives, la réalisabilité a évolué jusqu'à inclure la logique classique et même la théorie des ensembles. En effet il est possible de construire des modèles de réalisabilité pour la théorie des ensembles de Zermelo Fraenkel, ZF, pour ainsi extraire de toute preuve mathématique se basant sur les axiomes de ZF, des programmes formalisés dans le λ_C -calcul, une extension du λ -calcul qui exprime la programmation en Scheme. Laura Fontanella étudie davantage ces modèles. L'articles [FGM24] montre qu'il est possible de construire des modèles de réalisabilité pour la théorie ZF avec des versions faibles mais plus que dénombrables de l'axiome du choix. Dans [FG20] on montre qu'il est possible de réaliser même les axiomes de grands cardinaux par des termes du λ_C -calcul.

La correspondance entre preuves et programmes via les opérations de composition et réduction a un troisième aspect : en effet, on peut voir un tel langage comme une catégorie (une structure mathématique très générale). Plus précisément un terme de type $A \rightarrow B$ (c'est-à-dire selon le point de vue, un programme $A \rightarrow B$ ou une preuve $A \implies B$) sera vu comme une flèche $A \rightarrow B$ entre deux objets. Ainsi, les constructions sur les types/formules deviennent des constructions sur les objets d'une catégorie, offrant ainsi un autre point de vue complémentaire sur cette correspondance, avec des objets mathématiques comme les CCC (cartesian closed categories) ou les topos. [MPV18]. Les travaux de Luidnel Maignan l'ayant mené à étudier ce point de vue, mêlé à son intérêt pour la logique et le fondement des mathématiques, en particulier par l'informatique, il a contribué à un groupe de travail et on peut espérer que cette nouvelle collaboration portera ces fruits à moyen terme.

- [FGM24] Laura FONTANELLA, Guillaume GEOFFROY et Richard MATTHEWS. ‘Realizability Models for Large Cardinals’. In : *32nd EACSL Annual Conference on Computer Science Logic, CSL 2024, February 19-23, 2024, Naples, Italy*. Sous la direction d'Aniello MURANO et Alexandra SILVA. Tome 288. LIPIcs. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2024, 28 :1-28 :18.
- [APS23] Aurore ALCOLEI, Luc PELLISSIER et Alexis SAURIN. ‘The exponential logic of sequentialization’. In : *Proceedings of the 39th Conference on the Mathematical Foundations of Programming Semantics, MFPS XXXIX, Indiana University, Bloomington, IN, USA, June 21-23, 2023*. Sous la direction de Marie KERJEAN et Paul Blain LEVY. Tome 3. EPTICS. EpiSciences, 2023.
- [GPF22] Giulio GUERRIERI, Luc PELLISSIER et Lorenzo Tortora de FALCO. ‘Gluing resource proof-structures : inhabitation and inverting the Taylor expansion’. In : *Log. Methods Comput. Sci.* 18.2 (2022).
- [DPS21] Abhishek DE, Luc PELLISSIER et Alexis SAURIN. ‘Canonical proof-objects for coinductive programming : infinets with infinitely many cuts’. In : *PPDP 2021 : 23rd International Symposium*

- on Principles and Practice of Declarative Programming, Tallinn, Estonia, September 6-8, 2021.*
Sous la direction de Niccolò VELTRI, Nick BENTON et Silvia GHILEZAN. ACM, 2021, 7 :1-7 :15.
- [FG20] Laura FONTANELLA et Guillaume GEOFFROY. ‘Preserving cardinals and weak forms of Zorn’s lemma in realizability models’. In : *Math. Struct. Comput. Sci.* 30.9 (2020), pages 976-996.
- [MPV18] Damiano MAZZA, Luc PELLISSIER et Pierre VIAL. ‘Polyadic approximations, fibrations and intersection types’. In : *Proc. ACM Program. Lang.* 2.POPL (2018), 6 :1-6 :28.

2.4 Droit du numérique

- Florent Madelaine
- Luc Pellissier
- Pierre Valarcher

Thématiques

Les activités de recherche s'appuient principalement sur les interactions entre intervenants et étudiants du *Master Droit du Numérique* qui existent depuis une dizaine d'années, mais aussi du *Graduate Program Numérique, Politique, Droit - majeure Droit* depuis 2023-24.

Les étudiants sont en alternance ce qui permet d'avoir une idée assez précise des thématiques très concrètes qui se posent dans les administrations et dans le privé concernant le droit du numérique, avec en particulier les aspects RGPD bien connus mais aussi sur la transparence des traitements (CADA, AI act) ou encore sur le droit d'auteur qui s'applique au code source et la brevetabilité de programmes/d'algorithmes.

Les mémoires de M2 permettent aux étudiants de creuser un sujet parfois classique parfois plus exploratoire. Ces mémoires sont encadrés par un binôme composé d'un enseignant chercheur en droit et d'un enseignant chercheur en informatique, avec depuis 2 ans l'organisation d'une retraite dédié à l'écriture de ce mémoire pendant une semaine.

Le graduate program substitue l'alternance par un stage recherche en laboratoire et à pour but de préparer les étudiants qui le souhaitent à préparer une thèse.

À titre d'exemple, notons la thèse d'Éloi Barbier qui porte sur *le raisonnement juridique au prisme des algorithmes*, fruit d'un co-encadrement entre Noé Wagener (Droit) et Pierre Valarcher et Luc Pélissier. Il s'agit ici de classifier les programmes informatiques utilisés afin d'automatiser des raisonnements juridiques pour mieux les saisir dans leur ensemble en tant qu'objet d'étude. Cette classification permettra d'analyser l'impact de ces programmes informatiques sur le système juridique en fonction de leurs caractéristiques. Le but est de répondre aux questions suivantes : - Les programmes informatiques qui implémentent un raisonnement juridique illustrent-ils une nouvelle forme de 'logique juridique' ? - Les décisions juridiques prises avec des programmes informatiques peuvent-elles toujours être justifiées ? - Quel est le rôle de la motivation des décisions juridiques prises avec des programmes informatiques ?

Le recrutement de Luc Pélissier (MCF section 27) à la faculté de Droit en 2021-2022 a fortement accéléré les activités sur ces thématiques. Luc a déposé divers projets dont le projet ANR JCJC LAVERSE (*Law Versioning : Semantical and Executable — Versionnement des lois sémantique et exécutable*). C'est une forme de dual à la thèse d'Éloi puisqu'il s'agit ici d'étudier le processus d'écriture de la loi comme un objet calculatoire. En effet, de nombreux textes se présentent comme des *patchs* modifiant les textes précédents. Ces patchs peuvent être très différents (comparer «le troisième paragraphe de l'article L. 311-8 du code de l'éducation est remplacé par «...» à «toutes les mentions de «Pôle Emploi» sont remplacées par «France Travail» dans tous les textes où il apparaît») et n'ont pas la même complexité. Le projet cherche à définir un langage de programmation permettant d'exprimer ces patchs, donner la complexité des opérations élémentaires, et les structures de données nécessaires pour représenter ceci.

2.5 Modèles de calculs

- Patrick Cegielski
- Julien Cervelle
- Luidnel Maignan
- Antoine Spicher
- Pierre Valarcher
- Serghei Verlan

Thématiques

Transformations globales. Les langages par règle comme MGS (<https://www.spatial-computing.org/mgs/start>) permettent d'exprimer des modèles de calcul aussi divers que les automates cellulaires, les systèmes multi-agents, les systèmes de Lindenmayer, les systèmes de Paun, le calcul chimique, etc., l'étude d'un modèle de calcul sous-jacent n'a jamais été faite. C'est dans cette optique que Antoine Spicher et Luidnel Maignan ont formalisé une forme de réécriture topologique, les *transformation globale* (GT), qui capturent *tout système synchrone, local et déterministe* [FMS19].

La thèse d'Alexandre Fernandez, ancien étudiant de la double licence math-info de l'UPEC, a permis d'étoffer le cadre formel catégorique des GT, qui permet dorénavant de comprendre ces derniers à la lumières des extensions de Kan [FMS21b; FMS23] et de capturer les systèmes synchrones, locaux et déterministes ou non [FMS22]. Afin de rester proche de l'implémentation (tout comme le projet logiciel MGS permettait d'illustrer concrètement l'utilité du langage), un algorithme générique *online* d'applications de GT est proposé ; un prototype logiciel est en cours de développement à partir de technique de réécriture *online* novatrice [FMS21a].

Calcul naturel Serghei Verlan a travaillé sur plusieurs modèles de calcul ayant une inspiration biologique ou équivalents. L'objectif principal s'attache à comprendre leur puissance d'expression, dont des questions d'universalité et de réversibilité. Citons, les systèmes à insertion-effacement (ou grammaires d'insertion) [Alh+22a; IV21; VFK20], les réseaux de processeurs évolutionnaires [FRV19], les machines à registres [AVF18] et les systèmes à membranes (membrane computing) [Csu+21; Alh+18c; Alh+18b; Alh+18a; Alh+22b; Alh+21; Alh+22a].

Dans un second temps, Serghei Verlan et ses co-auteurs affinent ces résultats en se penchant sur la sémantique des systèmes à membranes et proposent un cadre formel pour les systèmes à membranes permettant de définir d'une manière non-ambiguë la sémantique de n'importe quel modèle de ce type (et d'une manière plus générale d'un modèle fondé sur la manipulation des vecteurs de nombres) [VZ23; Alh+23; Ver+20; Ver+19]. Cela permet de comparer les modèles correspondants à l'aide des bisimulations, ainsi que de préparer une bibliothèque d'ingrédients standards utilisés dans le domaine. De plus, l'approche utilisée permet de formaliser d'une manière uniforme les modèles de calcul similaires (réseaux de Petri, systèmes d'équations chimiques, machines à registre, automates cellulaires, systèmes d'équations en différences finies, circuits logiques etc.) et de transposer les idées, les outils et les problèmes d'un modèle à autre.

Plus récemment, Serghei Verlan s'intéresse à *l'implémentation matérielle* des modèles de calculs non-conventionnels, l'idée principale étant de trouver des modèles de calcul non-conventionnels parallèles qui peuvent s'implémenter d'une manière efficace sur des circuits logiques matériels reprogrammables (FPGA). Ceci permettrait de proposer un langage (et modèle) de programmation différent des paradigmes actuelles, tout en possédant une efficacité d'implémentation importante. Après plusieurs essais le choix s'est arrêté sur le modèle des systèmes à membranes numériques (NPS) qui est un modèle de calcul parallèle et distribué ayant des liens étroits avec le modèle des *équations en différences finies*. La proposition de restrictions théoriques permettant une implémentation efficace du modèle en matériel et la rédaction d'un premier compilateur qui transforme ces NPS en circuits FPGA est prometteuse : les premières résultats expérimentaux montrent une vitesse de 10^8 étapes de calcul/s (et une accélération de l'ordre 10^5 par rapport à une implémentation logicielle). Comme cadre de test le contrôle robotique a permis de conforter ces expériences (voir [Sha+23; Sha+21; Sha+19a; Sha+20; Zey19; Sha+19b] et l'article [Zha+20] dans *ACM Computing Surveys*). Une partie de ces travaux a été publié dans le livre [Zha+21]. Des partenaires chinois ont pu déposer des brevets nationaux liés à ce sujet de recherche.

ASM Julien Cervelle et Patrick Cégielski ont étudié la simulation pas à pas d'ASM (*Abstract State Machines* de Yuri Gurevich) [CC19].

Un cadre ressemblant à celui des ASM, celui des graphages, a été étudié par Luc Pellissier, qui a notamment exprimé des théorèmes de bornes inférieures de complexité sur les machines parallèles dans ce cadre. Avec Pierre Valarcher et son doctorant Hong-Linh Anh-ton Le, ils sont en train d'étudier la différence entre ce cadre et

celui des ASM.

- [Alh+23] Artiom ALHAZOV, Rudolf FREUND, Sergiu IVANOV et Sergey VERLAN. ‘Numerical networks of cells’. In : *Theor. Comput. Sci.* 958 (2023), page 113873.
- [FMS23] Alexandre FERNANDEZ, Luidnel MAIGNAN et Antoine SPICHER. ‘Cellular automata and Kan extensions’. In : *Nat. Comput.* 22.3 (2023), pages 493-507.
- [Sha+23] Zeyi SHANG, Zhe WEI, Sergey VERLAN, Jianming LI et Zhige HE. ‘An FPGA Architecture for the RRT Algorithm Based on Membrane Computing’. In : *Electronics* 12.12 (2023).
- [VZ23] Sergey VERLAN et Gexiang ZHANG. ‘A Tutorial on the Formal Framework for Spiking Neural P Systems’. In : *Natural Computing* 22.1 (2023), pages 181-194.
- [Alh+22a] Artiom ALHAZOV, Rudolf FREUND, Sergiu IVANOV et Sergey VERLAN. ‘Regulated Insertion-Deletion Systems’. In : *J. Autom. Lang. Comb.* 27.1-3 (2022), pages 15-45.
- [Alh+22b] Artiom ALHAZOV, Rudolf FREUND, Sergiu IVANOV et Sergey VERLAN. ‘Tissue P Systems with Vesicles of Multisets’. In : *Int. J. Found. Comput. Sci.* 33.3&4 (2022), pages 179-202.
- [FMS22] Alexandre FERNANDEZ, Luidnel MAIGNAN et Antoine SPICHER. ‘Non-Determinism in Lindenmayer Systems and Global Transformations’. In : *47th International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science, MFCS 2022, August 22-26, 2022, Vienna, Austria*. Sous la direction de Stefan SZEIDER, Robert GANIAN et Alexandra SILVA. Tome 241. LIPIcs. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2022, 49 :1-49 :13.
- [Alh+21] Artiom ALHAZOV, Rudolf FREUND, Sergiu IVANOV et Sergey VERLAN. ‘Variants of derivation modes for which catalytic P systems with one catalyst are computationally complete’. In : *Journal of Membrane Computing* 3.4 (2021), pages 233-245.
- [Csu+21] Erzsébet CSUHAJ-VARJÚ, Marian GHEORGHE, Alberto LEPORATI, Miguel Ángel MATÍNEZ-DEL-AMOR, Linqiang PAN, Prithwineel PAUL, Andrei PĂUN, Ignacio PÉREZ-HURTADO, Mario J. PÉREZ-JIMÉNEZ, Bosheng SONG, Luís VALENCIA-CABRERA, Sergey VERLAN, Tingfang WU, Claudio ZANDRON et Gexiang ZHANG. ‘Membrane Computing Concepts, Theoretical Developments and Applications’. In : *Alternative Computing*. Sous la direction d’Andrew ADAMATZKY. World Scientific, 2021, page 70.
- [FMS21a] Alexandre FERNANDEZ, Luidnel MAIGNAN et Antoine SPICHER. ‘Accretive Computation of Global Transformations’. In : *Relational and Algebraic Methods in Computer Science - 19th International Conference, RAMiCS 2021, Marseille, France, November 2-5, 2021, Proceedings*. Sous la direction d’Uli FAHRENBERG, Mai GEHRKE, Luigi SANTOCANALE et Michael WINTER. Tome 13027. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2021, pages 159-175.
- [FMS21b] Alexandre FERNANDEZ, Luidnel MAIGNAN et Antoine SPICHER. ‘Cellular Automata and Kan Extensions’. In : *27th IFIP WG 1.5 International Workshop on Cellular Automata and Discrete Complex Systems, AUTOMATA 2021, July 12-14, 2021, Aix-Marseille University, France*. Sous la direction d’Alonso CASTILLO-RAMIREZ, Pierre GUILLON et Kévin PERROT. Tome 90. OASIcs. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2021, 7 :1-7 :12.
- [IV21] Sergiu IVANOV et Sergey VERLAN. ‘Single semi-contextual insertion-deletion systems’. In : *Natural Computing* 20.4 (2021), pages 703-712.
- [Sha+21] Zeyi SHANG, Sergey VERLAN, Gexiang ZHANG et Haina RONG. ‘FPGA Implementation of Numerical P Systems’. In : *International Journal of Unconventional Computing* 16.2-3 (2021), pages 279-302.
- [Zha+21] G. ZHANG, M.J. PÉREZ-JIMÉNEZ, A. RISCOS NÚÑES, S. VERLAN, S. KONUR, Th. HINZE et M GHEORGHE. *Membrane Computing Models : Implementations*. Springer, 2021.
- [Sha+20] Zeyi SHANG, Ignacio PÉREZ-HURTADO, Sergey VERLAN et Gexiang ZHANG. ‘FPGA Architecture for Generalized Numerical P System Arranged Rapidly-Exploring Random Tree Algorithm’. In : *Preliminary proceedings of International Conference on Membrane Computing 2020*. 2020.
- [VFK20] Sergey VERLAN, Henning FERNAU et Lakshmanan KUPPUSAMY. ‘Universal insertion grammars of size two’. In : *Theoretical Computer Science* 843 (2020), pages 153-163.

- [Ver+20] Sergey VERLAN, Rudolf FREUND, Artiom ALHAZOV, Sergiu IVANOV et Linqiang PAN. ‘A Formal Framework for Spiking Neural P Systems’. In : *Journal of Membrane Computing* 2 (2020), pages 355-368.
- [Zha+20] Gexiang ZHANG, Zeyi SHANG, Sergey VERLAN, Miguel Á. MARTÍNEZ-DEL-AMOR, Chengxun YUAN, Luis VALENCIA-CABRERA et Mario J. PÉREZ-JIMÉNEZ. ‘An Overview of Hardware Implementation of Membrane Computing Models’. In : *ACM Computing Surveys* 53.4 (2020).
- [CC19] Patrick CÉGIELSKI et Julien CERVELLE. ‘Study of Stepwise Simulation Between ASM’. In : *Computing with Foresight and Industry - 15th Conference on Computability in Europe, CiE 2019, Durham, UK, July 15-19, 2019, Proceedings*. Sous la direction de Florin MANEA, Barnaby MARTIN, Daniël PAULUSMA et Giuseppe PRIMIERO. Tome 11558. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2019, pages 156-167.
- [FMS19] Alexandre FERNANDEZ, Luidnel MAIGNAN et Antoine SPICHER. ‘Lindenmayer Systems and Global Transformations’. In : *Unconventional Computation and Natural Computation - 18th International Conference, UCNC 2019, Tokyo, Japan, June 3-7, 2019, Proceedings*. Sous la direction d’Ian MCQUILLAN et Shinnosuke SEKI. Tome 11493. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2019, pages 65-78.
- [FRV19] Rudolf FREUND, Vladimir ROGOJIN et Sergey VERLAN. ‘Variants of Networks of Evolutionary Processors with Polarizations and a Small Number of Processors’. In : *International Journal of Foundations of Computer Science* 30.06n07 (2019), pages 1005-1027. eprint : <https://doi.org/10.1142/S0129054119400264>.
- [Sha+19a] Zeyi SHANG, Sergey VERLAN, Ion PETRE et Gexiang ZHANG. ‘Reaction Systems and Synchronous Digital Circuits’. In : *Molecules* 24.10 (2019).
- [Sha+19b] Zeyi SHANG, Sergey VERLAN, Gexiang ZHANG et Ignacio PÉREZ-HURTADO. ‘FPGA Implementation of Robot Obstacle Avoidance Controller based on Enzymatic Numerical P Systems’. In : *Pre-Proceedings of The 8th Asian Conference on Membrane Computing (ACMC2019), November 14-17, 2019, Xiamen, China*. Sous la direction de Gexiang ZHANG, Linqiang PAN et Xiangrong LIU. 2019, pages 184-214.
- [Ver+19] Sergey VERLAN, Rudolf FREUND, Artiom ALHAZOV et Linqiang PAN. ‘A Formal Framework for Spiking Neural P Systems’. In : *Proceedings of the 20th International Conference on Membrane Computing, CMC20, August 5-8, 2019, Curtea de Arges, Romania*. Sous la direction de G. PĂUN. 2019.
- [Zey19] Gexiang Zhang ZEYI SHANG Sergey Verlan. ‘Hardware Implementation of Numerical P Systems’. In : *Proceedings of the 20th International Conference on Membrane Computing, CMC20, August 5-8, 2019, Curtea de Arges, Romania*. Sous la direction de G. PĂUN. 2019, pages 463-474.
- [Alh+18a] Artiom ALHAZOV, Rudolf FREUND, Sergiu IVANOV, Marion OSWALD et Sergey VERLAN. ‘Chocolate P Automata’. In : *Enjoying Natural Computing - Essays Dedicated to Mario de Jesús Pérez-Jiménez on the Occasion of His 70th Birthday*. Sous la direction de Carmen Graciani DÍAZ, Agustín RISCOS-NÚÑEZ, Gheorghe PAUN, Grzegorz ROZENBERG et Arto SALOMAA. Tome 11270. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2018, pages 1-20.
- [Alh+18b] Artiom ALHAZOV, Rudolf FREUND, Sergiu IVANOV, Marion OSWALD et Sergey VERLAN. ‘Extended spiking neural P systems with white hole rules and their red-green variants’. In : *Natural Computing* 17.2 (2018), pages 297-310.
- [Alh+18c] Artiom ALHAZOV, Rudolf FREUND, Sergiu IVANOV et Sergey VERLAN. ‘Tissue P Systems with Point Mutation Rules’. In : *Membrane Computing - 19th International Conference, CMC 2018, Dresden, Germany, September 4-7, 2018, Revised Selected Papers*. Sous la direction de Thomas HINZE, Grzegorz ROZENBERG, Arto SALOMAA et Claudio ZANDRON. Tome 11399. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2018, pages 33-56.
- [AVF18] Artiom ALHAZOV, Sergey VERLAN et Rudolf FREUND. ‘Small Universal Reversible Counter Machines’. In : *Reversibility and Universality : Essays Presented to Kenichi Morita on the Occasion of his 70th Birthday*. Sous la direction d’Andrew ADAMATZKY. Cham : Springer International Publishing, 2018, pages 433-446.

2.6 Spécification de systèmes avec la méthode Event-B

- Julien Cervelle, PR, FST.
- Frédéric Gervais, MCF, IUT Sénart-Fontainebleau.
- Régine Laleau, PR, IUT Sénart-Fontainebleau.
- Meryem Afendi, étudiante en thèse.

Le cadre général des travaux du thème **Spécification de systèmes avec la méthode Event-B** concerne la spécification, la vérification et le développement de systèmes en utilisant des techniques formelles, principalement la méthode Event-B. Les principales caractéristiques de cette méthode sont l'utilisation de la théorie des ensembles et de la logique du premier ordre comme langage de modélisation, l'utilisation du raffinement pour représenter les systèmes à différents niveaux d'abstraction et l'utilisation des preuves mathématiques pour vérifier la cohérence des modèles et du raffinement. Plusieurs outils de modélisation et d'assistance à la preuve existent, les principaux étant l'AtelierB et Rodin.

Trois thématiques principales sont traitées : (1) Ingénierie des exigences – Modélisation de domaine ; (2) Construction formelle de systèmes industriels et (3) Définition de théories et réutilisation de preuves en B.

Doctorats : Thèses soutenues : Steve Tueno, Meryem Afendi, Racem Bougacha (thèse de Centrale Lille)
Thèses en cours : Amine Hamidi (inscrit à Centrale Lille)

Ingénierie des exigences – Modélisation de domaine

Les recherches sur ce thème ont démarré dans le cadre du projet ANR TACOS (2007-2010) et se sont poursuivies principalement dans le projet ANR FORMOSE (2014-2019). Dans TACOS, un travail de thèse a permis de générer le squelette d'une spécification formelle Event-B à partir d'un diagramme de buts SysML/KAOS [Lal+10]. Pour compléter cette spécification il est nécessaire de prendre en compte le domaine d'application. Ce fut le sujet de thèse de Steve Tueno, en co-tutelle avec l'université de Sherbrooke au Québec et soutenue en octobre 2019. La modélisation de domaine repose sur les ontologies, en particulier OWL et PLIB, qui sont ensuite traduites en Event-B. Les règles de traduction ont été spécifiées en Event-B et vérifiées par l'outil de preuve Rodin [Fot+18d ; Fot+18d ; Fot+18c ; Fot+18a ; Fot+18e ; Fot+19a ; Fot+19b].

Cette approche a été appliquée sur le standard "Hybrid ERTMS/ETCS Level 3" dans le cadre de l'étude de cas industrielle proposée lors de la conférence ABZ 2018. Ce standard ERTMS (Système de Gestion du Traffic Ferroviaire Européen) appartient à l'ensemble des standards définis pour la gestion et l'interopérabilité des systèmes de signalisation ferroviaire européens. Nous avons modélisé les exigences systèmes, les propriétés de domaine et les invariants de sûreté décrits dans le standard. 6 niveaux de raffinement ont été définis et environ 150 obligations de preuve ont été générées par Rodin, parmi lesquelles 15% ont été déchargées interactivement et donc 85% automatiquement. C'est avant tout un challenge intéressant qui a permis de tester le passage à l'échelle de la méthode SysML/KAOS [Fot+18b ; Fot+20].

La méthode SysML/KAOS a été implémentée dans l'outil FORMOD développé dans le projet FORMOSE.

Méthodes formelles pour les systèmes industriels

La construction de spécifications formelles est une activité difficile. Dans le domaine des systèmes d'information nous avons proposé une méthode qui combine les diagrammes UML avec la méthode B. Nos travaux les plus récents se sont focalisés sur les systèmes industriels qui ont des caractéristiques et des propriétés à vérifier bien différentes de celles des systèmes d'information.

Étude des combinaisons de paradigmes formels et graphiques. Le cadre de la thèse de Racem Bougacha (mai 2019 - juillet 2023) en collaboration avec l'IFSTTAR, se situe dans le domaine ferroviaire, plus précisément dans le projet Train de Fret Autonome conduit par l'IRT RAILENIUM. L'objectif de la thèse était de concevoir une méthode formelle de conception d'architectures de haut niveau de systèmes ferroviaires alignées avec le modèle abstrait des exigences. Nous avons développé une méthode basée sur une extension de SysML pour la modélisation graphique et Event-B pour la spécification formelle, avec des règles de traduction entre les deux formalismes [Bou+22b ; Bou+22a ; BLD23 ; Col+23].

Construction de spécifications de systèmes en Event-B. Nous avons développé en Event-B plusieurs études de cas proposées lors des conférences ABZ 2014, 2016, 2018, 2020 qui relèvent du domaine des systèmes aéronautique, ferroviaire, automobile et médical. L'objectif de ces travaux est d'étudier comment on peut construire une spécification Event-B, et en particulier la définition des étapes de raffinement, en étant guidé par des méthodes de conception semi-formelle comme celle de Parnas ou celle de SysML/KAOS [Fay+16 ; ML17 ; Mam+18 ; MFL20 ; Mam+20].

Spécification et vérification en Event-B de contrôleurs dans les systèmes cyber-physiques (SCP). L'architecture la plus commune d'un SCP est un contrôleur logiciel discret qui communique avec son environnement physique selon le schéma de la boucle fermée dans lequel les données provenant des capteurs sont traitées et les résultats sont fournis et communiqués à des actionneurs. Le projet ANR DISCONT, démarré en 2018, s'intéresse à la possibilité de modéliser et vérifier la correction de tels contrôleurs discrets en Event-B. Ces contrôleurs nécessitent une intégration correcte de modèles discrets, représentés par des machines à états ou des automates finis, et continus, représentés par des équations différentielles, ces dernières ne pouvant pas être spécifiées en Event-B classique par manque de théories sur les réels. L'approche de Platzer, basée sur la logique différentielle dynamique et l'outil KeYmaera [LP16 ; PQ08] permet de modéliser et prouver des programmes hybrides mais uniquement "à la main", ce qui est toujours source d'erreurs.

Nous avons développé une approche générique correcte par construction, basée sur le processus de raffinement de Event-B, qui utilise les outils de preuve automatique et interactif associés. Pour traiter les équations différentielles, nous avons interfacé l'outil RODIN de Event-B avec le solveur d'équations différentielles SageMath [Zim+18]. Ces travaux ont été menés dans le cadre de la thèse de Meryem Afendi (2018-2022) [ALM20 ; AML22 ; MAL22 ; AML23].

Définition de théories et réutilisation de preuves en B

La communauté des méthodes formelles B et Event-B a développé un outil appelé Theory Plugin qui permet de définir des théories dans le cadre des plateformes Rodin et Atelier B. L'idée est de définir un ensemble de théorèmes et de règles de preuves qui peuvent être réutilisés dans une modélisation B. Dans le cadre d'un groupe de travail interne au LACL et du projet ANR EBRP, nous avons commencé à définir des théories sur des modèles comme la théorie des ensembles ou bien un système de vote. Ces premières expérimentations ont permis d'identifier des bonnes pratiques pour l'utilisation du Plugin Theory. La modélisation de la théorie des ensembles ZFC a fait l'objet d'une première publication [CG23].

Futur

Les travaux futurs de la thématique s'orientent autour de quatre axes.

Ingénierie des exigences

L'objectif de cet axe est de poursuivre les travaux de thèse de Racem Bougacha pour prendre en compte des propriétés non-fonctionnelles, en particulier de sécurité, et d'étendre la méthode formelle de conception d'architectures de haut niveau alignées avec le modèle abstrait des exigences. Pour ce dernier, nous nous baserons sur les travaux de thèse de Abderrahman Matoussi [ML12 ; Ahm+18b ; Ahm+18a]. C'est le sujet de thèse de Amine Hamidi, co-encadrée avec Simon Collart-Dutilleul (COSYS/ESTAS, Université Gustave Eiffel, Villeneuve d'Ascq) dans le cadre du projet Flexmove (<https://ferromobile.fr>)

Combinaison de Event-B avec des outils de vérification automatique de propriétés liées au temps

La conception et vérification formelles de systèmes critiques exigent de considérer avec la même importance, dès le début, les exigences fonctionnelles et temporelles. Néanmoins, intégrer le temps sous toutes ses formes dans les assistants de preuves reste un défi majeur car le temps est souvent intégré tard, après plusieurs niveaux de raffinement et de manière manuelle et ad-hoc. D'un autre côté, il y a de nombreux modèles de temps riches et variés qui ont chacun leur expressivité et leurs limites mais qui intègrent peu ou pas les exigences fonctionnelles.

Notre objectif est de concevoir des outils et une méthodologie pour combiner Event-B à des outils de vérification automatique de propriétés liées au temps et promouvoir le temps comme un citoyen de premier niveau. Un projet ANR a été déposé sur cette thématique. Du côté LACL, il implique non seulement des membres de la thématique Event-B mais également des membres du thème **Synthèse**.

Définition de théories et réutilisation de preuves en B

Nous cherchons à définir une méthodologie qui s'appuie sur la réutilisation de théories pour enrichir les prouveurs. Le Theory Plugin permet naturellement d'ajouter de nouvelles théories (réels, calcul différentiel), de telle sorte qu'elles soient bien intégrées dans l'outil. Comme l'outil permet également de définir des règles de preuves, utilisables aussi bien dans les preuves interactives que par les prouveurs automatiques, il permet d'ajouter de la puissance à Rodin ou Atelier B et même sans ajouter de nouveaux axiomes. Dans ce dernier cas, on ajoute bien des tactiques de preuves, prouvées et réutilisables, aux outils. Il reste cependant à enrichir la sémantique du plugin afin de poursuivre cet objectif et cette étude fera également l'objet d'un futur travail.

Méthodes formelles pour le quantique

Un premier travail a été initié avec Marc Frappier et l’Institut Quantique de l’Université de Sherbrooke sur de possibles collaborations autour des méthodes formelles dans le quantique. Sherbrooke a l’avantage d’avoir accès à des ordinateurs quantiques opérationnels et en constante évolution. Par ailleurs il y a une équipe AlgoLab qui développe des programmes quantiques à l’Institut Quantique. Le projet serait de définir des méthodes de spécification formelle pour prouver ou vérifier des propriétés sur les programmes quantiques.

- [AML23] Meryem AFENDI, Amel MAMMAR et Régine LALEAU. ‘A Tool-Supported Approach for Modeling and Verifying Hybrid Systems using EVENT-B and the Differential Equation Solver SAGEMATH’. In : *Proceedings of the 18th International Conference on Software Technologies, ICSOFT 2023, Rome, Italy, July 10-12, 2023*. Sous la direction d’Hans-Georg FILL, Francisco José Domínguez MAYO, Marten van SINDEREN et Leszek A. MACIASZEK. SCITEPRESS, 2023, pages 71-83.
- [BLD23] Racem BOUGACHA, Régine LALEAU et Simon Collart DUTILLEUL. ‘Formal alignment of requirements models with high-level architecture models’. In : *27th International Conference on Engineering of Complex Computer Systems, ICECCS 2023, Toulouse, France, June 14-16, 2023*. IEEE, 2023, pages 216-225.
- [CG23] Julien CERVELLE et Frédéric GERVAIS. ‘Introducing Inductive Construction in B with the Theory Plugin’. In : *Rigorous State-Based Methods - 9th International Conference, ABZ 2023, Nancy, France, May 30 - June 2, 2023, Proceedings*. Sous la direction d’Uwe GLÄSSER, José Creissac CAMPOS, Dominique MÉRY et Philippe A. PALANQUE. Tome 14010. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2023, pages 43-58.
- [Col+23] Simon COLLART-DUTILLEUL, Philippe BON, Racem BOUGACHA et Régine LALEAU. ‘Engineering for Critical Systems : The Automatic Train Operation over European Train Control System for Freight Trains Use Case’. In : *International Journal of Transport - Development and integration* 7.4 (2023), pages 311-320.
- [AML22] Meryem AFENDI, Amel MAMMAR et Régine LALEAU. ‘Building Correct Hybrid Systems using Event-B and Sagemath : Illustration by the Hybrid Smart Heating System Case Study’. In : *26th International Conference on Engineering of Complex Computer Systems, ICECCS 2022, Hiroshima, Japan, March 26-30, 2022*. IEEE, 2022, pages 91-96.
- [Bou+22a] Racem BOUGACHA, Régine LALEAU, Philippe BON, Simon Collart DUTILLEUL et Rahma Ben AYED. ‘Modeling Train Systems : From High-Level Architecture Graphical Models to Formal Specifications’. In : *Risks and Security of Internet and Systems - 17th International Conference, CRiSIS 2022, Sousse, Tunisia, December 7-9, 2022, Revised Selected Papers*. Sous la direction de Slim KALLEL, Mohamed JMAIEL, Mohammad ZULKERNINE, Ahmed Hadj KACEM, Frédéric CUPPENS et Nora CUPPENS. Tome 13857. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2022, pages 153-168.
- [Bou+22b] Racem BOUGACHA, Régine LALEAU, Simon Collart DUTILLEUL et Rahma Ben AYED. ‘Extending SysML with Refinement and Decomposition Mechanisms to Generate Event-B Specifications’. In : *Theoretical Aspects of Software Engineering - 16th International Symposium, TASE 2022, Cluj-Napoca, Romania, July 8-10, 2022, Proceedings*. Tome 13299. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2022, pages 256-273.
- [MAL22] Amel MAMMAR, Meryem AFENDI et Régine LALEAU. ‘Modeling and proving hybrid programs with Event-B : An approach by generalization and instantiation’. In : *Sci. Comput. Program.* 222 (2022), pages 1-57.
- [ALM20] Meryem AFENDI, Régine LALEAU et Amel MAMMAR. ‘Modelling Hybrid Programs with Event-B’. In : *Rigorous State-Based Methods - 7th International Conference, ABZ 2020, Ulm, Germany, May 27-29, 2020, Proceedings*. Sous la direction d’Alexander RASCHKE, Dominique MÉRY et Frank HOUDEK. Tome 12071. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2020, pages 139-154.
- [Fot+20] Steve Jeffrey Tueno FOTSO, Marc FRAPPIER, Régine LALEAU et Amel MAMMAR. ‘Modeling the hybrid ERTMS/ETCS level 3 standard using a formal requirements engineering approach’. In : *Int. J. Softw. Tools Technol. Transf.* 22.3 (2020), pages 349-363.

- [Mam+20] Amel MAMMAR, Marc FRAPPIER, Steve Jeffrey Tueno FOTSO et Régine LALEAU. ‘A formal refinement-based analysis of the hybrid ERTMS/ETCS level 3 standard’. In : *Int. J. Softw. Tools Technol. Transf.* 22.3 (2020), pages 333-347.
- [MFL20] Amel MAMMAR, Marc FRAPPIER et Régine LALEAU. ‘An Event-B Model of an Automotive Adaptive Exterior Light System’. In : *Rigorous State-Based Methods - 7th International Conference, ABZ 2020, Ulm, Germany, May 27-29, 2020, Proceedings*. Sous la direction d’Alexander RASCHKE, Dominique MÉRY et Frank HOUDEK. Tome 12071. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2020, pages 351-366.
- [Fot+19a] Steve Jeffrey Tueno FOTSO, Régine LALEAU, Héctor Ruíz BARRADAS, Marc FRAPPIER et Amel MAMMAR. ‘A Formal Requirements Modeling Approach : Application to Rail Communication’. In : *Proceedings of the 14th International Conference on Software Technologies, ICSOFT 2019, Prague, Czech Republic, July 26-28, 2019*. Sous la direction de Marten van SINDEREN et Leszek A. MACIASZEK. SciTePress, 2019, pages 170-177.
- [Fot+19b] Steve Jeffrey Tueno FOTSO, Régine LALEAU, Marc FRAPPIER, Amel MAMMAR, Francois THIBODEAU et Mama Nsangou MOUCHILI. ‘Assessment of a Formal Requirements Modeling Approach on a Transportation System’. In : *Formal Methods and Software Engineering - 21st International Conference on Formal Engineering Methods, ICFEM 2019, Shenzhen, China, November 5-9, 2019, Proceedings*. Tome 11852. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2019, pages 470-486.
- [Ahm+18a] Manzoor AHMAD, Christophe GNAHO, Jean-Michel BRUEL et Régine LALEAU. ‘How to handle environmental uncertainty in goal-based requirements engineering’. In : *Proceedings of the 40th International Conference on Software Engineering : Companion Proceedings, ICSE 2018, Gothenburg, Sweden, May 27 - June 03, 2018*. Sous la direction de Michel CHAUDRON, Ivica CRNKOVIC, Marsha CHECHIK et Mark HARMAN. ACM, 2018, pages 368-369.
- [Ahm+18b] Manzoor AHMAD, Christophe GNAHO, Jean-Michel BRUEL et Régine LALEAU. ‘Towards a Requirements Engineering Approach for Capturing Uncertainty in Cyber-Physical Systems Environment’. In : *New Trends in Model and Data Engineering - MEDI 2018 International Workshops, DETECT, MEDI4SG, IWCFIS, REMEDY, Marrakesh, Morocco, October 24-26, 2018, Proceedings*. Sous la direction d’El Hassan ABDELWAHED, Ladjel BELLATRECHE, Djamel BENSLIMANE, Matteo GOLFARELLI, Stéphane JEAN, Dominique MÉRY, Kazumi NAKAMATSU et Carlos ORDONEZ. Tome 929. Communications in Computer and Information Science. Springer, 2018, pages 115-129.
- [Fot+18a] Steve Jeffrey Tueno FOTSO, Marc FRAPPIER, Régine LALEAU et Amel MAMMAR. ‘Back Propagating B System Updates on SysML/KAOS Domain Models’. In : *23rd International Conference on Engineering of Complex Computer Systems, ICECCS 2018, Melbourne, Australia, December 12-14, 2018*. IEEE Computer Society, 2018, pages 160-169.
- [Fot+18b] Steve Jeffrey Tueno FOTSO, Marc FRAPPIER, Régine LALEAU et Amel MAMMAR. ‘Modeling the Hybrid ERTMS/ETCS Level 3 Standard Using a Formal Requirements Engineering Approach’. In : *Abstract State Machines, Alloy, B, TLA, VDM, and Z - 6th International Conference, ABZ 2018, Southampton, UK, June 5-8, 2018, Proceedings*. Sous la direction de Michael J. BUTLER, Alexander RASCHKE, Thai Son HOANG et Klaus REICHL. Tome 10817. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2018, pages 262-276.
- [Fot+18c] Steve Jeffrey Tueno FOTSO, Marc FRAPPIER, Régine LALEAU, Amel MAMMAR et Michael LEUSCHEL. ‘Formalisation of SysML/KAOS Goal Assignments with B System Component Decompositions’. In : *Integrated Formal Methods - 14th International Conference, IFM 2018, Maynooth, Ireland, September 5-7, 2018, Proceedings*. Sous la direction de Carlo A. FURIA et Kirsten WINTER. Tome 11023. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2018, pages 377-397.
- [Fot+18d] Steve Jeffrey Tueno FOTSO, Marc FRAPPIER, Amel MAMMAR et Régine LALEAU. ‘From SysML/KAOS Domain Models to B System Specifications’. In : *CoRR abs/1803.01972* (2018). arXiv : 1803.01972.

- [Fot+18e] Steve Jeffrey Tueno FOTSO, Amel MAMMAR, Régine LALEAU et Marc FRAPPIER. ‘Event-B Expression and Verification of Translation Rules Between SysML/KAOS Domain Models and B System Specifications’. In : *Abstract State Machines, Alloy, B, TLA, VDM, and Z - 6th International Conference, ABZ 2018, Southampton, UK, June 5-8, 2018, Proceedings*. Sous la direction de Michael J. BUTLER, Alexander RASCHKE, Thai Son HOANG et Klaus REICHL. Tome 10817. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2018, pages 55-70.
- [Mam+18] Amel MAMMAR, Marc FRAPPIER, Steve Jeffrey Tueno FOTSO et Régine LALEAU. ‘An Event-B Model of the Hybrid ERTMS/ETCS Level 3 Standard’. In : *Abstract State Machines, Alloy, B, TLA, VDM, and Z - 6th International Conference, ABZ 2018, Southampton, UK, June 5-8, 2018, Proceedings*. Sous la direction de Michael J. BUTLER, Alexander RASCHKE, Thai Son HOANG et Klaus REICHL. Tome 10817. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2018, pages 353-366.
- [Zim+18] Paul ZIMMERMANN, Alexandre CASAMAYOU, Nathann COHEN, Guillaume CONNAN, Thierry DUMONT, Laurent FOUSSE, François MALTEY, Matthias MEULIEN, Marc MEZZAROBBA, Clément PERNET et al. *Computational mathematics with SageMath*. SIAM, 2018.
- [ML17] Amel MAMMAR et Régine LALEAU. ‘Modeling a landing gear system in Event-B’. In : *Int. J. Softw. Tools Technol. Transf.* 19.2 (2017), pages 167-186.
- [Fay+16] Thomas FAYOLLE, Marc FRAPPIER, Frédéric GERVAIS et Régine LALEAU. ‘Modelling a Hemodialysis Machine Using Algebraic State-Transition Diagrams and B-like Methods’. In : *Abstract State Machines, Alloy, B, TLA, VDM, and Z - 5th International Conference, ABZ 2016, Linz, Austria, May 23-27, 2016, Proceedings*. Sous la direction de Michael J. BUTLER, Klaus-Dieter SCHEWE, Atif MASHKOOOR et Miklós BIRÓ. Tome 9675. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2016, pages 394-408.
- [LP16] Sarah M. LOOS et André PLATZER. ‘Differential Refinement Logic’. In : *Proceedings of the 31st Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science, LICS ’16, New York, NY, USA, July 5-8, 2016*. Sous la direction de Martin GROHE, Eric KOSKINEN et Natarajan SHANKAR. ACM, 2016, pages 505-514.
- [ML12] Abderrahman MATOUSSI et Régine LALEAU. ‘Une approche pour la prise en compte des buts non fonctionnels dans les spécifications abstraites Event-B’. In : *Ingénierie des Systèmes d’Inf.* 17.3 (2012), pages 95-118.
- [Lal+10] Régine LALEAU, Farida SEMMAK, Abderrahman MATOUSSI, Dorian PETIT, Ahmed HAMMAD et Bruno TATIBOUËT. ‘A first attempt to combine SysML requirements diagrams and B’. In : *Innov. Syst. Softw. Eng.* 6.1-2 (2010), pages 47-54.
- [PQ08] André PLATZER et Jan-David QUESEL. ‘KeYmaera : A Hybrid Theorem Prover for Hybrid Systems (System Description)’. In : *Automated Reasoning, 4th International Joint Conference, IJCAR 2008, Sydney, Australia, August 12-15, 2008, Proceedings*. Sous la direction d’Alessandro ARMANDO, Peter BAUMGARTNER et Gilles DOWEK. Tome 5195. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2008, pages 171-178.

2.7 Modèles et Méthodes pour l'analyse des systèmes dynamiques à événements discrets

- Benoît Barbot, MCF, FST.
- Catalin Dima, PR, FST
- Adrien Le Coënt, MCF, FST.
- Nihal Pekergin, PR, FST
- Sovanna Tan, MCF, FST.
- Damien Busatto-Gaston, MCF, EPISEN.

Model checking statistique

Le modèle checking permet l'analyse d'un modèle stochastique. Pour ce faire, on génère un grand nombre de traces de ce système à l'aide de la méthode de Monte-Carlo, puis on teste la satisfaction de formules logiques sur ces traces. L'analyse statistique de ces simulations permet de calculer des grandeurs quantitatives et qualitatives sur le modèle stochastique.

Benoît Barbot et Nihal Pekergin ont développé le Model checker statistique Cosmos (<http://cosmos.lacl.fr>). Cosmos prend en entrée un réseau de Petri stochastique à distribution générale et une formule logique dans la logique HASL puis évalue la formule sur le modèle. L'activité de recherche sur ce sujet consiste d'une part à étendre le modèle checker Cosmos et d'une autre part à l'utiliser sur des études de cas.

Un exemple d'étude de cas est le papier [BB22] où les propriétés d'une variante du protocole Wi-Fi sont étudiées pour affiner le paramétrage de ces propriétés.

Une des extensions de Cosmos est la co-simulation de systèmes cyber physiques. Les systèmes cyber physiques permettent de modéliser un grand nombre de systèmes qui interagissent avec leur environnement. Ils sont généralement composés de trois composantes qui interagissent entre elles : le contrôleur qui est modélisé par un système à état discret, les grandeurs physiques qui sont modélisées par un système d'équations différentielles, l'environnement aléatoire qui est modélisé par un processus stochastique. Dans ce cadre, l'outil Cosmos a été étendu en intégrant la simulation d'équations différentielles. Le contrôleur et l'environnement sont modélisés dans le réseau de Pétri stochastique, les grandeurs physiques sont modélisées par des équations différentielles encodées dans un fichier Simulink. En définissant une sémantique formelle pour les systèmes Simulink et en spécifiant les interactions entre le système Simulink et le réseau de Pétri stochastique, il est possible de co-simuler ces deux systèmes. Cette approche a été appliquée à la vérification de modèles de conduite de véhicules autonome [Bar+18].

Falsification de systèmes cyber physiques

Une approche pour l'analyse de systèmes cyber physiques consiste à chercher les exécutions fautives du système. Dans cette approche le contrôleur et les grandeurs physiques sont vus comme une boîte noire déterministe. L'environnement interagit avec ce système en générant des signaux (fonctions réelles du temps) qui sont mis en entrée du système. Le système à son tour renvoie des signaux. On s'intéresse alors aux propriétés des signaux de sortie sous condition que les signaux d'entrée satisfassent certaines conditions. Quand les signaux d'entrée peuvent être modélisés par un automate temporel il est intéressant d'être capable d'échantillonner cet automate temporel pour générer des signaux qui « couvrent bien » l'espace des signaux possibles. La définition de « couvre bien » est basée sur la volumétrie des langages temporels. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre de l'ANR MAVeriQ. Dans un premier temps, cette génération était réalisée dans l'outil Cosmos. Depuis le logiciel Wordgen [BBD23 ; Bar] a été développé pour faire cette génération. Ces travaux ont donné lieu à plusieurs publications notamment [BB23 ; Bar+20 ; BBD19 ; BB23].

Analyse de réseaux biochimique

Les réseaux biochimiques sont généralement modélisés par des équations différentielles ordinaires (EDOs) qui décrivent l'évolution temporelle des concentrations des espèces en interaction pour des conditions initiales et valeurs de paramètres donnés. Les incertitudes de mesure sur les paramètres du modèle et les concentrations sont inévitables en raison de la variabilité biologique et du bruit. Il est donc nécessaire de prédire l'évolution des concentrations d'espèces pour des intervalles ou distributions de probabilité plutôt que pour des conditions initiales spécifiques et des valeurs de paramètres données. À cette fin, Benoît Barbot, Adrien Le Coënt et Nihal Pekergin proposent d'utiliser des réseaux bayésiens dynamiques (DBNs) pour approximer l'évolution de la concentration des espèces. Grâce aux méthodes de machine learning applicables sur ces modèles, cela permet de résoudre des problèmes tels que l'estimation de paramètres pour des systèmes de dimension bien supérieure à ce que les méthodes classiques telles que la régression permettent de faire. [Le +23]

Calcul de bande passante dans des automates temporisés

Les langages temporisés, modèles de systèmes temps-réel qui généralisent les langages formels, contiennent des séquences d'évenements discrets (lettres), séparés par des délais de temps réel. Les automates temporisés définissent une classe de langages temporisés qui généralise les langages réguliers ou rationnels classiques. Une notion de bande passante ("bandwidth") a été défini récemment dans [IDA22], dans le but de modéliser la transmission de l'information dans des canaux de communication en temps réel. À la différence des travaux plus anciens sur les automates temporisés, cette nouvelle notion calcule le taux de transmission de l'information, par unité de temps, sur un canal de communication modélisé par un automate temporisé. Cette notion se base sur une précision ϵ avec laquelle un observateur (qui se situe en réception) peut différencier deux mots temporisés transmis sur le canal. Dans l'article [Asa+23], nous montrons que les automates temporisés peuvent être regroupés en trois classes par rapport à leur bande passante : ils sont soit "maigres", soit "normaux", soit "obèses". Dans la première classe, l'information est envoyée de façon presque discrète et indépendante de la précision d'observation ϵ , dans la deuxième l'information est transmise avec un taux de $O(\log(1/\epsilon))$, alors que pour les langages temporisés "obèses", l'information est transmise avec une haute fréquence, en $O(1/\epsilon)$. Les critères de classification sont formulés à l'aide des morphismes entre le monoïde des chemins dans un automate temporisé et certains monoïdes finis qui étendent les graphes d'orbite proposés par Puri [Pur00] et les preuves se basent sur le théorème de factorisation de Simon [Sim90].

Interactions entre méthodes formelles et apprentissage automatique

Les langages définis par des automates finis sont très utilisé à la fois du point de vue théorique que du point de vue pratique avec les expressions régulières. Benoît Barbot s'est intéressé aux méthodes pour apprendre de tels langages à partir de données ou à partir d'autres modélisations de langages notamment à partir de réseau de neurones récurrent ou d'automates bruités [Khm+21 ; Bar+21 ; Khm+23].

Damien Busatto-Gaston a exploré les techniques issues des communautés intelligence artificielle et apprentissage automatique (Machine-Learning) pour la synthèse de stratégie optimale sur processus de décision markoviens (MDPs). Ces approches passent davantage à l'échelle que les approches plus standard de la communauté vérification, en exploitant des algorithmes probabilistes, des heuristiques, des réseaux de neurones etc. Il s'agira alors d'étudier les garanties formelles pouvant être obtenues pour ces techniques, ou encore d'utiliser des outils de méthodes formelles pour les améliorer [Cha+23]. Les techniques de recherche arborescente de Monte-Carlo (MCTS) peuvent ainsi être couplées à des solveurs SAT ou QBF, ou encore à un model-checker probabiliste, afin d'aiguiller une recherche de décision optimale dans un MDP. Les travaux [BCR20 ; Bus+21] étudient cette interaction, en cherchant à obtenir des garanties formelles sur le comportement à long terme de la recherche arborescente, et en appliquant ces techniques à un problème plus concret d'ordonnancement de processus. Enfin, ces méthodes peuvent être appliquées dans un cadre d'apprentissage par renforcement, afin d'obtenir un ensemble de données d'entraînement de haute qualité, qui soit représentatif des décisions à prendre dans un MDP avec un très grand espace d'état [Cha+23].

Encadrement stochastique pour l'analyse numérique des systèmes à événements discrets

La méthode d'encadrement stochastique consiste à étudier un modèle "simple" pour calculer des encadrements d'un modèle dont l'analyse est difficile, voire impossible. Pour que le modèle encadrant soit plus simple à résoudre que le modèle initial, il doit être soit plus régulier pour permettre une solution analytique, soit de taille plus petite pour contourner le problème de très grande taille d'espace d'états. L'ordre stochastique \leq_{st} permet d'obtenir des inégalités entre les distributions transitoires et stationnaires du modèle encadrant et celles du modèle initial.

Dans [PT21] nous avons appliqué cette méthode pour l'analyse des modèles des arbres d'attaque et de défense. La résolution de différents problèmes d'optimisation stochastique pour des instances de problèmes de taille réaliste ont été obtenue par cette approche dans [FPT20], [Ech+19].

Travaux futurs

Dans la thématique du model-checking statistique, on s'intéresse à la définition d'une notion d'abstraction/approximation discrète pour des systèmes continus. Dans ce sens, nous continuons les travaux sur les réseaux bayésiens, sur lesquels un article a été soumis en 2024 à Computers in Biology and Medicine. Un autre volet de recherche concerne l'approximation d'équations différentielles stochastiques (EDSs) par des chaînes de Markov, ce qui permettrait de faire de la vérification statistique sur des EDSs en utilisant l'outil Cosmos. Des travaux sont en cours sur ce sujet impliquant Adrien Le Coënt, Jonathan Vacher et Kenan Kergrene. Enfin, dans la même direction, on poursuit des travaux de vérification des propriétés pour des systèmes hybrides à équations aux

dérivées partielles basée sur de la réduction de modèles et de la simulation ensembliste. Sur ce thème, un article vient d'être soumis à CDC 2024, avec Adrien Le Coënt, Jonathan Vacher et Kenan Kergrene comme co-auteurs.

Dans la thématique du calcul de la bande passante, les travaux se poursuivent avec l'étude des automates temporisés classifiés comme "normaux" ou "obèses". Ces travaux nécessitent de généraliser la notion de graphe d'orbite sous une forme algébrique intégrant à la fois des semi-anneaux max-plus et le semi-anneau des nombres rationnels nonnégatifs qui permettrait de définir une notion de rayon spectral d'une matrice. Ces travaux seront aussi intégrés dans la suite du projet Maveriq.

- [Bar] Benoît BARBOT. *Wordgen*. <https://git.lacl.fr/barbot/wordgen>.
- [Asa+23] Eugene ASARIN, Aldric DEGORRE, Catalin DIMA et Bernardo Jacobo INCLÁN. 'Bandwidth of Timed Automata : 3 Classes'. In : *43rd IARCS Annual Conference on Foundations of Software Technology and Theoretical Computer Science, FSTTCS 2023, December 18-20, 2023, IIIT Hyderabad, Telangana, India*. Sous la direction de Patricia BOUYER et Srikanth SRINIVASAN. Tome 284. LIPIcs. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2023, 10 :1-10 :17.
- [BB23] Benoît BARBOT et Nicolas BASSET. 'Max-Entropy Sampling for Deterministic Timed Automata Under Linear Duration Constraints'. In : *Quantitative Evaluation of Systems*. Sous la direction de Nils JANSEN et Mirco TRIBASTONE. Cham : Springer Nature Switzerland, 2023, pages 188-204.
- [BBD23] Benoit BARBOT, Nicolas BASSET et Alexandre DONZE. 'Wordgen : a Timed word Generation Tool'. In : *Proceedings of the 26th ACM International Conference on Hybrid Systems : Computation and Control*. HSCC '23. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2023, pages 1-7.
- [Cha+23] Debraj CHAKRABORTY, Damien BUSATTO-GASTON, Jean-François RASKIN et Guillermo A. PÉREZ. 'Formally-Sharp DAgger for MCTS : Lower-Latency Monte Carlo Tree Search using Data Aggregation with Formal Methods'. In : *Proceedings of the 2023 International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS 2023, London, United Kingdom, 29 May 2023 - 2 June 2023*. Sous la direction de Noa AGMON, Bo AN, Alessandro RICCI et William YEOH. ACM, 2023, pages 1354-1362.
- [Khm+23] Igor KHMELNITSKY, Daniel NEIDER, Rajarshi ROY, Xuan XIE, Benoît BARBOT, Benedikt BOLLIG, Alain FINKEL, Serge HADDAD, Martin LEUCKER et Lina YE. 'Analysis of recurrent neural networks via property-directed verification of surrogate models'. In : *Int. J. Softw. Tools Technol. Transf.* 25.3 (2023), pages 341-354.
- [Le +23] Adrien LE COËNT, Benoît BARBOT, Nihal PEKERGIN et Cüneyt GÜZELIS. 'Bayesian Networks as Approximations of Biochemical Networks'. In : *Computer Performance Engineering and Stochastic Modelling - 19th European Workshop, EPEW 2023, and 27th International Conference, ASMTA 2023, Florence, Italy, June 20-23, 2023, Proceedings*. Sous la direction de Mauro IACONO, Marco SCARPA, Enrico BARBIERATO, Salvatore SERRANO, Davide CEROTTI et Francesco LONGO. Tome 14231. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2023, pages 216-233.
- [BB22] Paolo BALLARINI et Benoît BARBOT. 'Cosmos : Evolution of a Statistical Model Checking Platform'. In : *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review* 49.4 (2022), pages 65-69.
- [IDA22] Bernardo Jacobo INCLÁN, Aldric DEGORRE et Eugene ASARIN. 'Bounded Delay Timed Channel Coding'. In : *Formal Modeling and Analysis of Timed Systems - 20th International Conference, FORMATS 2022, Warsaw, Poland, September 13-15, 2022, Proceedings*. Sous la direction de Sergiy BOGOMOLOV et David PARKER. Tome 13465. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2022, pages 65-79.
- [Bar+21] Benoît BARBOT, Benedikt BOLLIG, Alain FINKEL, Serge HADDAD, Igor KHMELNITSKY, Martin LEUCKER, Daniel NEIDER, Rajarshi ROY et Lina YE. 'Extracting Context-Free Grammars from Recurrent Neural Networks using Tree-Automata Learning and A* Search'. In : *Proceedings of the 15th International Conference on Grammatical Inference, 23-27 August 2021, Virtual Event*. Sous la direction de Jane CHANDLEE, Rémi EYRAUD, Jeff HEINZ, Adam JARDINE et Menno van ZAANEN. Tome 153. Proceedings of Machine Learning Research. PMLR, 2021, pages 113-129.
- [Bus+21] Damien BUSATTO-GASTON, Debraj CHAKRABORTY, Shibashis GUHA, Guillermo A. PÉREZ et Jean-François RASKIN. 'Safe Learning for Near-Optimal Scheduling'. In : *Quantitative Evaluation*

of Systems - 18th International Conference, QEST 2021, Paris, France, August 23-27, 2021, Proceedings. Sous la direction d'Alessandro ABATE et Andrea MARIN. Tome 12846. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2021, pages 235-254.

- [Khm+21] Igor KHANELNITSKY, Daniel NEIDER, Rajarshi ROY, Xuan XIE, Benoît BARBOT, Benedikt BOLLIG, Alain FINKEL, Serge HADDAD, Martin LEUCKER et Lina YE. ‘Property-Directed Verification and Robustness Certification of Recurrent Neural Networks’. In : *Automated Technology for Verification and Analysis - 19th International Symposium, ATVA 2021, Gold Coast, QLD, Australia, October 18-22, 2021, Proceedings*. Sous la direction de Zhe HOU et Vijay GANESH. Tome 12971. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2021, pages 364-380.
- [PT21] Nihal PEKERGIN et Sovanna TAN. ‘Quantitative Analysis of Attack Defense Trees’. In : *Performance Evaluation Methodologies and Tools - 14th EAI International Conference, VALUETOOLS 2021, Virtual Event, October 30-31, 2021, Proceedings*. Sous la direction de Qianchuan ZHAO et Li XIA. Tome 404. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering. Springer, 2021, pages 207-220.
- [Bar+20] Benoît BARBOT, Nicolas BASSET, Thao DANG, Alexandre DONZÉ, James KAPINSKI et Tomoya YAMAGUCHI. ‘Falsification of Cyber-Physical Systems with Constrained Signal Spaces’. In : *NASA Formal Methods*. Sous la direction de Ritchie LEE, Susmit JHA, Anastasia MAVRIDOU et Dimitra GIANNAKOPOULOU. Lecture Notes in Computer Science. Cham : Springer International Publishing, 2020, pages 420-439.
- [BCR20] Damien BUSATTO-GASTON, Debraj CHAKRABORTY et Jean-François RASKIN. ‘Monte Carlo Tree Search Guided by Symbolic Advice for MDPs’. In : *31st International Conference on Concurrency Theory, CONCUR 2020, September 1-4, 2020, Vienna, Austria (Virtual Conference)*. Sous la direction d'Igor KONNOV et Laura KOVÁCS. Tome 171. LIPIcs. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2020, 40 :1-40 :24.
- [FPT20] Jean-Michel FOURNEAU, Nihal PEKERGIN et Sovanna TAN. ‘Stochastic Bounds For Some Stochastic Optimisation Problems’. In : *VALUETOOLS 2020 : 13th EAI International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools, Tsukuba, Japan, May 18-20, 2020*. ACM, 2020, pages 112-119.
- [BBD19] Benoît BARBOT, Nicolas BASSET et Thao DANG. ‘Generation of Signals Under Temporal Constraints for CPS Testing’. In : *NASA Formal Methods*. Sous la direction de Julia M. BADGER et Kristin Yvonne ROZIER. Lecture Notes in Computer Science. Cham : Springer International Publishing, 2019, pages 54-70.
- [Ech+19] Loubna ECHABBI, Jean-Michel FOURNEAU, Oussama GACEM, Houda LOTFI et Nihal PEKERGIN. ‘Stochastic Bounds for the Max Flow in a Network with Discrete Random Capacities’. In : *Tenth International Workshop on the Practical Application of Stochastic Modelling, PASM 2019, Milan, Italy, November 2019*. Sous la direction de Matthew FORSHAW, Marco GRIBAUDO, William J. KNOTTENBELT et Nigel THOMAS. Tome 353. Electronic Notes in Theoretical Computer Science. Elsevier, 2019, pages 77-105.
- [Bar+18] Benoît BARBOT, Béatrice BÉRARD, Yann DUPLOUY et Serge HADDAD. ‘Integrating Simulink Models into the Model Checker Cosmos’. In : *Application and Theory of Petri Nets and Concurrency - 39th International Conference, PETRI NETS 2018, Bratislava, Slovakia, June 24-29, 2018, Proceedings*. Sous la direction de Victor KHOMENKO et Olivier H. ROUX. Tome 10877. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2018, pages 363-373.
- [Pur00] Anuj PURI. ‘Dynamical Properties of Timed Automata’. In : *Discrete Event Dynamic Systems* 10.1-2 (2000), pages 87-113.
- [Sim90] Imre SIMON. ‘Factorization Forests of Finite Height’. In : *Theoretical Computer Science* 72.1 (1990), pages 65-94.

2.8 Méthodes formelles pour les transductions

- Luc Dartois, MCF, IUT Sénart-Fontainebleau.
- Charles Peyrat, Stagiaire, 2020 et 2024.
- Loïc Germerie-Guizouarn, ATER, 2023-2024.

L'étude des langages réguliers et leur correspondance avec les automates et différents formalismes logiques ont été appliquées avec succès à la vérification de programmes. On peut citer par exemple les Logiques Temporelles, implémentées dans des outils tels que UPPAAL ou SPOT. Le fil directeur du thème **Méthodes formelles pour la transduction** est l'extension de ces réussites vers le formalisme des transductions, i.e. des transformations de langages formels modélisés par des automates à sortie appelés transducteurs.

Ainsi, la classe des fonctions régulières s'est imposée comme une classe robuste et expressive permettant de modéliser les transformations de mots. Les fonctions régulières sont ainsi définies de façon équivalentes par les transducteurs bidirectionnels [EH01], les MSO-Transductions [Cou94], les *Streaming String Transducers* [AČ10] ou les expressions rationnelles de transduction [AFR14].

Les contributions de ce thème visent à établir des procédures robustes pour l'utilisation des transducteurs comme modèle de transformations de données. Elles renforcent les liens entre théorie des automates, logique et expressions régulières, avec l'objectif de développer une trame pour la vérification formelle d'algorithme de transformations de données.

Contributions

Transformations de langages XML Les langages à pile visible forment une extension réussie des langages formels à des modélisations d'arbres, via la linéarisation XML des arbres. Dans [DFT19], nous avons considéré les automates de Parikh à pile visible, qui sont des automates à compteurs, dont l'acceptation dépend d'une formule existentielle de Presburger sur les valeurs finales des compteurs. Décider le vide du langage accepté par ces machines est coNP-complet. Si l'on autorise la tête de lecture à bouger de façon bidirectionnelle, le vide devient indécidable. Néanmoins, si l'on restreint l'incrémentation des compteurs selon la position, décider le vide devient coNExpTime-complet. Comme application, ce modèle de calcul permet alors de décider des problèmes sur les transductions d'arbres vers mots tels que l'équivalence.

Expressions sans étoiles de transformations de mots Les expressions sans étoiles sont des expressions rationnelles remplaçant l'étoile de Kleene par la complémentation. Un résultat célèbre de Schützenberger [Sch65] a prouvé l'équivalence entre langages sans étoiles et langages apériodiques. Ce fragment correspond également aux langages définissable par la logique du premier ordre (ou par la logique linéaire temporelle LTL). Une collaboration avec Paul Gastin (LMF, Paris-Saclay) et Shankara Narayanan Krishna (IIT Bombay) [DGK21] a abouti à la caractérisation des transductions apériodiques par des expressions rationnelles de transduction dites SD (ou code préfixe à délai de synchronisation borné), généralisant ainsi une caractérisation rationnelle des langages sans étoile ne dépendant pas de la complémentation.

Construction efficace de transducteurs réversibles Construire efficacement une machine à partir d'une spécification est un problème fondamental de la vérification. Dans [Dar+22], il est établi une procédure efficace pour construire, à partir d'une spécification donnée par une expression rationnelle de transduction, une machine donnée par un transducteur bidirectionnel réversible. Les transducteurs bidirectionnels réversibles sont des machines déterministes et codéterministes, ayant le même pouvoir d'expréssivité que les transducteurs bidirectionnel déterministes, et qui ont l'avantage de proposer une composition de complexité polynomiale, permettant une approche modulaire des transformations de mots.

Transducteurs réversibles de mots infinis De récents travaux [Dar+24] ont étudié l'expréssivité des transducteurs réversibles évoqués plus haut pour les transformations de mots infinis. Il est prouvé que cette classe de transformation définit des fonctions continues réalisables par des machines de Turing, ayant la même expréssivité que les machines déterministes. Ces machines profitent également d'une procédure de composition directe et peu coûteuse, ouvrant la voie à des procédures de modularisation des transformations de mots infinis.

Direction du thème

Dans [DFL18], il a été défini une logique de spécification pour les transformations, avec le but affiché de fournir un cadre pour la vérification de transformations de mots. Luc Dartois se propose d'encadrer une thèse visant à développer des méthodes pratiques et efficaces pour la spécification et la synthèse des transformations. Partant de la logique à origine définie dans [DFL18], le but est d'obtenir un ensemble d'outils permettant d'équilibrer

l'expressivité de la logique et la complexité de la synthèse d'automates associés. Le projet comprend également le développement de modèles automatiques adaptés et l'intégration des résultats connus.

- [Dar+24] Luc DARTOIS, Paul GASTIN, Loïc GERMERIE-GUIZOUARN, R. GOVIND et Shankara Narayanan KRISHNA. ‘Reversible Transducers over Infinite Words’. submitted. 2024.
- [Dar+22] Luc DARTOIS, Paul GASTIN, R. GOVIND et Shankara Narayanan KRISHNA. ‘Efficient Construction of Reversible Transducers from Regular Transducer Expressions’. In : *LICS '22 : 37th Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science, Haifa, Israel, August 2 - 5, 2022*. Sous la direction de Christel BAIER et Dana FISMAN. ACM, 2022, 50 :1-50 :13.
- [DGK21] Luc DARTOIS, Paul GASTIN et Shankara Narayanan KRISHNA. ‘SD-Regular Transducer Expressions for Aperiodic Transformations’. In : *36th Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science, LICS 2021, Rome, Italy, June 29 - July 2, 2021*. IEEE, 2021, pages 1-13.
- [DFT19] Luc DARTOIS, Emmanuel FILIOT et Jean-Marc TALBOT. ‘Two-Way Parikh Automata with a Visibly Pushdown Stack’. In : *Foundations of Software Science and Computation Structures - 22nd International Conference, FOSSACS 2019, Held as Part of the European Joint Conferences on Theory and Practice of Software, ETAPS 2019, Prague, Czech Republic, April 6-11, 2019, Proceedings*. Sous la direction de Mikolaj BOJANCZYK et Alex SIMPSON. Tome 11425. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2019, pages 189-206.
- [DFL18] Luc DARTOIS, Emmanuel FILIOT et Nathan LHOTE. ‘Logics for Word Transductions with Synthesis’. In : *Proceedings of the 33rd Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science, LICS 2018, Oxford, UK, July 09-12, 2018*. Sous la direction d'Anuj DAWAR et Erich GRÄDEL. ACM, 2018, pages 295-304.
- [AFR14] Rajeev ALUR, Adam FREILICH et Mukund RAGHOTHAMAN. ‘Regular combinator for string transformations’. In : *Joint Meeting of the 23rd EACSL Annual Conference on Computer Science Logic (CSL) and the 29th Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS), CSL-LICS '14, Vienna, Austria, July 14 - 18, 2014*. Sous la direction de Thomas A. HENZINGER et Dale MILLER. ACM, 2014, 9 :1-9 :10.
- [AC10] Rajeev ALUR et Pavol ČERNÝ. ‘Expressiveness of streaming string transducers’. In : *30th International Conference on Foundations of Software Technology and Theoretical Computer Science, FSTTCS 2010*. Tome 8. LIPIcs. Leibniz Int. Proc. Inform. Schloss Dagstuhl. Leibniz-Zent. Inform., Wadern, 2010, pages 1-12.
- [EH01] Joost ENGELFRIET et Hendrik Jan HOOGEBOOM. ‘MSO definable string transductions and two-way finite-state transducers’. In : *ACM Transactions on Computational Logic 2.2 (2001)*, pages 216-254.
- [Cou94] Bruno COURCELLE. ‘Monadic second-order definable graph transductions : a survey [see MR1251992 (94f :68009)]’. In : *Theoret. Comput. Sci. 126.1 (1994). Seventeenth Colloquium on Trees in Algebra and Programming (CAAP '92) and European Symposium on Programming (ESOP) (Rennes, 1992)*, pages 53-75.
- [Sch65] Marcel-Paul SCHÜTZENBERGER. ‘On finite monoids having only trivial subgroups’. In : *Information and Control 8.2 (1965)*, pages 190-194.

2.9 Parallélisme et calcul haute performance

- Frédéric Gava, MCF puis PR à partir de 2022, EPISEN.
- Gaétan Hains, PR, FST.
- Julien Tesson, MCF, départ pour Tezos en 2018.

Le thème Programmation parallèle de haut-niveau et axé sur la conception de *langages de haut-niveau* pour la **programmation parallèle**, le design d’algorithmiques distribués et leur **vérification** (sûreté et preuves de correction des programmes) et l’utilisation du **calcul haute-performance** (HPC) pour le model-checking, la sécurité, le **Big-Data**, l’**IA** (machine learning) ou les environnements de type cloud. Nos travaux sont donc orientés vers la **sécurité** et la **sûreté** des systèmes massivement parallèles (notamment les machines distribuées hiérarchiques). Cela s’effectue donc naturellement dans la continuité de nos anciens travaux sur la programmation parallèle de « haut-niveau », le *meta-* et *grid-computing*.

Projet ANBLIC ((2018–2022)) Frédéric Gava a été **responsable UPEC** du projet **ANBLIC**. Gaétan Hains en a été l’investigateur. C’est un financement FUI, <https://www.anblic.eu/> et <https://lejournaldeleco.fr/pole-systematic-paris-region>. Le projet, à l’UPEC, a été doté d’un **financement d’environ 150k d’euros** pour le financement de 2 années de post-doc + matériel + frais de mission (non utilisés à cause de la crise du Covid). Ce projet a pour objectif l’utilisation de la *cryptographie homomorphe* dans un cadre industriel. La cryptographie homomorphe permet à des fournisseurs d’environnement “cloud” d’exécuter des programmes avec des données cryptées tout en garantissant la confidentialité des calculs, c’est-à-dire l’impossibilité pour un fournisseur “trop curieux” de connaître quels sont les calculs réellement effectués. L’inconvénient de cette technologie est qu’elle est très coûteuse et encore mal maîtrisée. Le projet ANBLIC avait pour but de fournir des outils pour une exécution sûre et efficace de scénarios pour la manipulation de données médicales. Les partenaires industriels étaient : Wallix (main manager, <https://www.wallix.com/en/>), Ingenico (<https://www.ingenico.com/fr>), Sogeti (<https://www.fr.sogeti.com/>), Bull/Atos (<https://atos.net/fr>). Les académiques sont : INRIA/ENS-Ulm (<https://www.di.ens.fr/laboratory>), CEA-LIST (<http://www-list.cea.fr/>), LACL (<https://www.lacl.fr>). Une publication dans une conférence a été effectuée [GB22].

Quelques éléments de publications :

- [GAT22] (Programming BSP and Multi-BSP algorithms in ML). Dans cet article, nous rappelons la programmation avec des 2 langages fonctionnels (à la ML) que nous avions développés et qui sont dédiés aux algorithmes BSP et multi-BSP. Puis, nous développons une *méthodologie de comparaison* (mesurer les “profits et pertes”) des 2 langages : pour quelques cas applicatifs, nous examinons les *performances* obtenues, mais aussi la complexité d’écriture des codes ; typiquement, les codes multi-BSP sont plus efficaces, mais plus complexes. Pour l’équipe, cette étude “termine” un cycle sur la programmation fonctionnelle BSP et multi-BSP ; pour continuer ce travail, il faudrait étendre les modèles (calculs et programmation) pour prendre en compte d’autres éléments architecturaux, par exemple les GPUs. Travail en association avec un ancien doctorant de l’équipe (Victor Allombert depuis chez Tezos). Des travaux sur la prédiction des performances de Multi-ML [AGT18] ont aussi été publiés dans ainsi que sur l’implantation du langage dans [AG18] et le typage [GAT22] ;
- [MG19] (Axiomatization and characterization of BSP algorithms). Dans cet article, nous nous sommes intéressés à la *définition formelle* des algorithmes BSP puis à leur *équivalence algorithmique* avec des langages de programmation impératifs BSP usuels. Pour ce faire, nous avons étendu pour BSP les précédents travaux sur l’algorithmique séquentielle avec notamment leur *définition axiomatique* et ce qui est appelé les ASMs (abstract state machines) : celles-ci servent à *caractériser* (faire le lien entre langages et modèles) les algorithmes séquentiels. Ce travail est plus théorique que certains précédents travaux de l’équipe, mais répondait à plusieurs de nos interrogations : qu’est-ce que réellement, formellement, un algorithme BSP. En effet, si nous avions travaillé sur la conception d’un langage fonctionnel pour la programmation des algorithmes BSP, il fallait bien à un moment les caractériser (formellement), c’est-à-dire quels objets mathématiques les représentent. Travail en collaboration avec un post-doctorant de l’université de Rennes (Yoann Marquer, actuellement à l’université du Luxembourg) ; Ce travail étant 2 articles de conférence : [MG18b] et [MG18a] ;
- [GM20] (Axiomatization and Imperative Characterization of Multi-BSP Algorithms : A Q&A on a Partial Solution). Dans cet article, nous étendons les résultats de [MG19] pour le modèle multi-BSP qui est une extension de BSP pour machines à mémoires hiérarchiques (grappes de multiprocesseurs de multi-coeurs). Nous donnons aussi quelques limites de l’approche.

Sur le thème de l'informatique parallèle, nous avons lancé un nouveau projet de recherche intitulé "Mathematics of Arrays (MoA)" dont l'objectif est de produire automatiquement du code parallèle à partir d'expression algébriques sur les tableaux multidimensionnels (alias "tenseurs") et de paramètres matériels comme la taille des caches, multicoeurs, multinoeuds etc. Ce projet est un partenariat avec L. Mullin de l'Université d'Albany (NY, USA). Nous utilisons des ressources de calcul intensif fournies par le LACL, la DSI, et les centres de calcul CRIANN (Normandie) et Ookami (U. Stony-Brook, NY, USA).

Big Data et indexation de données Ces travaux portent sur la collecte de données issues de serveurs applicatifs pour les injecter dans un pipeline Big Data. Au sein de ce pipeline les données sont stockées dans une base NoSQL adaptée à l'architecture Big Data mise en place. L'indexation de ces données est effectuée par un moteur distribué supportant notre propre stratégie d'analyse et de requêtage. En fin de ce pipeline les données stockées sont utilisées pour la construction d'un modèle SVM (Support Vector Machine). L'objectif final est la prédiction d'opération de maintenance suite à l'analyse des log multi sources. Le verrou scientifique majeur est la relation entre le process d'indexation données, le workflow Big Data, l'utilisation du modèle SVM. [DMM19 ; Don+19]. Ce travail d'indexation a également été utilisé pour gérer la séparation entre stockage des données et des index. Nous avons mis en oeuvre une architecture distribuée pour assurer l'accès aux données issues de data sources distinctes à partir d'index calculé depuis des postes mobiles. Nous avons construit un modèle temporel de notre architecture afin d'établir des propriétés cruciales pour la recherche de données en cours de mobilité du requêteur [MF19 ; MM19].

Parallélisation de modèle IA Les grands modèles de langage (LLM) formés sur des dizaines de milliards de paramètres montrent l'importance cruciale de la parallélisation des modèles. Différentes techniques existent pour distribuer les réseaux neuronaux profonds, mais elles sont difficiles à mettre en œuvre. Le coût de l'entraînement des architectures basées sur le GPU devient également prohibitif. Nous avons travaillé sur une approche distribuée plus facile à mettre en œuvre où les données et le modèle sont distribués dans des unités de traitement hébergées sur un cluster de machines basées sur des CPU ou des GPU. La communication se fait par passage de messages. Le modèle est distribué sur le cluster et stocké localement ou sur un datalake. Nous avons prototypé cette approche en utilisant des bibliothèques open source et nous avons obtenu des avancées notoires en utilisant les propriétés de nos graphes de réseau de neurones illustrés via notre implémentation [LMP].

- [LMP] Ernesto LEITE, Fabrice MOURLIN et Pierre PARADINAS. ‘Fully Distributed Deep Neural Network : F2D2N’. In : *Mobile, Secure, and Programmable Networking - 9th International Conference, MSPN 2023, Paris, France, October 26-27, 2023, Revised Selected Papers*. Sous la direction de Samia BOUZEFRANE, Soumya BANERJEE, Fabrice MOURLIN, Selma BOUMERDASSI et Éric RENAULT. Tome 14482. Lecture Notes in Computer Science. Springer, pages 222-236.
- [GAT22] Frédéric GAVA, Victor ALLOMBERT et Julien TESSON. ‘A type system to avoid runtime errors for Multi-ML’. In : *21st International Symposium on Parallel and Distributed Computing, ISPDC*. IEEE, 2022, pages 41-48.
- [GB22] Frédéric GAVA et Léa Marziyah BAYATI. ‘A scalable algorithm for homomorphic computing on multi-core clusters’. In : *21st International Symposium on Parallel and Distributed Computing, ISPDC*. IEEE, 2022, pages 57-64.
- [GM20] Frédéric GAVA et Yoann MARQUER. ‘Axiomatization and Imperative Characterization of Multi-BSP Algorithms : A Q&A on a Partial Solution’. In : *Int. J. Parallel Program.* 48.4 (2020), pages 626-651.
- [Don+19] Junior DONGO, Ludovic FOLTETE, Charif MAHMOUDI et Fabrice MOURLIN. ‘Distributed Edge Solution for IoT based Building Management System with NDN’. In : *Global Information Infrastructure and Networking Symposium, GIIS 2019, Paris, France, December 18-20, 2019*. IEEE, 2019, pages 1-5.
- [DMM19] Junior DONGO, Charif MAHMOUDI et Fabrice MOURLIN. ‘Elastic Gigabit NDN Forwarder for Big Data Applications’. In : *Global Information Infrastructure and Networking Symposium, GIIS 2019, Paris, France, December 18-20, 2019*. IEEE, 2019, pages 1-5.
- [MM19] Charif MAHMOUDI et Fabrice MOURLIN. ‘A Language for Controller-Less Internet of Things Orchestration Based on Label Forwarding’. In : *16th IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, AICCSA 2019, Abu Dhabi, UAE, November 3-7, 2019*. IEEE Computer Society, 2019, pages 1-7.

- [MG19] Yoann MARQUER et Frédéric GAVA. ‘Axiomatization and characterization of BSP algorithms’. In : *J. Log. Algebraic Methods Program.* 109 (2019).
- [MF19] Fabrice MOURLIN et Jean-Marc FARINONE. ‘Cloud Mobile Storage for Mobile Applications’. In : *Int. J. Interact. Mob. Technol.* 13.3 (2019), pages 13-28.
- [AG18] Victor ALLOMBERT et Frédéric GAVA. ‘An ML Implementation of the MULTI-BSP Model’. In : *2018 International Conference on High Performance Computing & Simulation, HPCS*. IEEE, 2018, pages 500-507.
- [AGT18] Victor ALLOMBERT, Frédéric GAVA et Julien TESSON. ‘Toward Performance Prediction for Multi-BSP Programs in ML’. In : *Algorithms and Architectures for Parallel Processing - 18th International Conference, ICA3PP Part III*. Sous la direction de Jaideep VAIDYA et Jin Li. Tome 11336. LNCS. Springer, 2018, pages 159-174.
- [MG18a] Yoann MARQUER et Frédéric GAVA. ‘Algorithmic Completeness for BSP Languages’. In : *2018 International Conference on High Performance Computing & Simulation, HPCS*. IEEE, 2018, pages 740-747.
- [MG18b] Yoann MARQUER et Frédéric GAVA. ‘An Axiomatization for BSP Algorithms’. In : *Algorithms and Architectures for Parallel Processing - 18th International Conference, ICA3PP Part III*. Sous la direction de Jaideep VAIDYA et Jin Li. Tome 11336. LNCS. Springer, 2018, pages 72-88.

2.10 Synthèse et vérification des systèmes informatiques

- Benoît Barbot, MCF, FST.
- Damien Busatto-Gaston, MCF, EPISEN.
- Catalin Dima, PR, FST.
- Youssouf Oualhadj, MCF, FST.
- Daniele Varacca, PR, FST.
- Léo Tible, Étudiant en thèse.

La création des systèmes cybers-physiques est une tâche complexe, ceci est d'autant plus vrai quand il s'agit de systèmes critiques. Par exemple, une erreur logicielle dans le régulateur de vitesse d'une voiture pourrait avoir des conséquences désastreuses. Ainsi, des garanties fortes d'absence d'erreurs sont requises. En plus de l'aspect humain (erreur due au développeur logiciel), un système critique doit faire face aux comportements imprévus de l'environnement avec lequel il interagit. Afin de garantir l'absence d'erreurs humaines et garantir la bonne réactivité du système, la synthèse fournit les fondements théoriques pour générer automatiquement un système correct à partir d'une spécification donnée.

Le mathématicien *Alonzo Church* a proposé une formalisation mathématique du problème de la synthèse connue sous le nom de *problème de Church*. Dans ce problème, une relation d'entrée-sortie \mathcal{R} est donnée, le but est de décider s'il existe un programme qui représente cette relation. D'un point de vue pratique, la relation modélise le comportement désiré d'un système complexe, réactif ou critique. Si la réponse au problème de Church est positive, alors nous pouvons implémenter un logiciel qui force le système à adopter le bon comportement.

La première solution au problème de Church a été présentée par Büchi et Landweber en 1969. Connue à présent comme le théorème Büchi-Landweber, ce théorème résout le problème de Church dans les cas où la relation peut être définie par un transducteur régulier de mots infinis (ce formalisme peut être représenté comme un graphe étiqueté). Différentes solutions du problème ont été présentées par la suite. Ces solutions généralisent ou raffinent l'approche de Büchi et Landweber. Dans une quête perpétuelle de rendre les modèles étudiés plus expressifs, afin qu'ils puissent représenter des problématiques réelles, affirmer qu'un système est contrôlable ou pas peut paraître une approche restrictive. En effet, certains systèmes dépendent intrinsèquement de paramètres quantifiables, par exemple des durées, ou plus simplement, des ressources énergétiques. C'est avec cette motivation que le problème de la synthèse quantitative a été introduit. Dans ce contexte, les modèles étudiés sont des graphes enrichis avec des variables pour représenter des notions temporelles ou plus généralement une ressource. La problématique de construire un contrôleur correct a elle aussi évolué et a pris des saveurs d'optimisation. En effet, le but du problème est devenu de construire un contrôleur qui exhibe des garanties vis-à-vis de spécifications quantitatives, ainsi on parle de *contrôleur optimal*. Nous parlons alors de *synthèse quantitative*.

Jeux à deux joueurs sur des graphes finis L'étude algorithmique de l'existence de contrôleurs optimaux pour une spécification donnée a pour but de pouvoir obtenir, de manière automatisée, des programmes corrects pour le contrôle de systèmes complexes. L'algorithme le construisant, un défi à ne pas négliger est de réaliser l'implémentation du contrôleur obtenu. Une caractéristique intéressante à étudier dans un contrôleur est son besoin en terme de mémoire. En effet, un contrôleur qui nécessite une mémoire de taille non bornée ne peut être implémenté. Dans les travaux présentés dans [Bou+23 ; Bou+22 ; Bou+21 ; Bou+20], Youssouf Oualhadj a pris part des travaux dans lesquels on s'intéresse à cette problématique. Ces résultats caractérisent toutes les spécifications dans lesquelles des contrôleurs optimaux et à mémoire finie et indépendante existent. Cette caractérisation répond à un problème ouvert soulevé par Gimbert et al. en 2007. Intuitivement, ces stratégies correspondent à des contrôleurs qui utilisent un espace mémoire *fini* et *indépendant de la taille de système*. Outre la caractérisation, on fournit aussi des outils formels permettant l'étude d'un système afin de savoir s'il répond à ces critères ou pas.

Processus de décision markovien Dans processus de décision markovien, l'environnement n'est plus considéré comme une entité maléfique mais est modélisé par comportement probabiliste. Dans ce modèle on essaye de construire un contrôleur qui maximise les chances de garantir une spécification donnée. Bien que cette idéalisations mathématique exhibe une structure qui facilite l'étude du système, elle peut conduire dans certains cas à la construction de solutions pour le contrôle qui ne sont pas réalistes. Dans des contextes où l'on s'intéresse à des comportements infinis, le contrôle peut garantir un résultat qui ne sera correct qu'à la limite et qui ne peut jamais être atteint en un temps fini. Dans les résultats obtenus dans l'article [Bri+19 ; Bri+20], Youssouf Oualhadj introduit et résout une notion de robustesse pour éviter de recourir à ces comportements irréalistes. **Ces résultats ont été récompensés par le prix du meilleur article CONCUR 2019.** Un autre aspect de ce modèle est lié au fait que plusieurs contrôleurs optimaux peuvent exister. Dans [Bus+23], Damien Busato-Gaston a participé à

des travaux dans lesquels des critères qui permettent de classifier les contrôleurs optimaux et en choisir un meilleur sont introduits. Ces critères sont représentés comme une composition d'objectifs. Dans [Bor+22], Damien Busatto-Gaston a pris part à des travaux dans lesquels la spécification est décrite dans une logique temporelle probabiliste.

Fragments efficaces des logiques temporelles Youssouf Oualhadj et Daniele Varacca encadrent ensemble la thèse de Léo Tible dont le but est d'étudier et d'identifier des fragments efficaces dans la logique temporelle pLTL pour le problème du model-checking. La logique pLTL est une extension quantitative de la logique LTL (Linear Temporal Logic). Dans [OTV22], des fragments de pLTL sont identifiés qui possèdent des propriétés algorithmiques intéressantes. En particulier, un des fragments identifié possède la propriété d'avoir un problème de model-checking probabiliste plus facile que son vis-à-vis déterministe.

Systèmes temps-réel Dans ce cadre là, le modèle est enrichi avec des variables qui permettent de représenter des contraintes temporelles. Quand on considère le problème la synthèse de stratégie optimale sur un formalisme temporisé, on peut souhaiter que le contrôleur obtienne une stratégie robuste aux imprécisions de ces variables temporelles (petites variations non contrôlables présentes dans tout système cyber-physique). Dans [Bus+19], une approche symbolique qui permet des implémentations efficaces est présentée. Dans [BMR18 ; BMR23], le cas où le système possède à la fois des variables temporelles et des variables de ressources est étudiée.

Contrôle parcimonieux de systèmes multi-agents Dans les formalismes étudiés et présentés précédemment, le système représente une interaction compétitive entre un système et son environnement. Cette modélisation ne prend pas en compte toutes les autres situations où l'environnement ne présente pas d'antagonisme particulier. Dans un cadre plus général, on vise à contrôler un système composé de plusieurs agents qui n'évoluent pas en compétition mais dont chacun possède un objectif qui lui est propre. Dans ce cadre, néanmoins, ces multiples agents utilisent souvent une ressource commune (l'électricité ou autre ressource naturelle) et le comportement d'un agent impacte le comportement des autres vis-à-vis de cette ressource. D'où la nécessité pour les agents de mélanger coopération et égoïsme dans leur comportement. Dans [Con+21 ; Con+23], on présente une nouvelle définition de la coopération qui prend en compte le concept de ressource commune. Ce type de modèle est très intéressant pour les problèmes de planification dans les systèmes multi-agents. Dans [Con+22], on a étendu les résultats de [Con+21] à un cadre multi-ressources.

Travail au sein de l'ANR MaVeriQ L'analyse des systèmes modernes pilotés par des logiciels, y compris les systèmes cyber-physiques (comme le contrôle automobile) et les systèmes distribués (comme les réseaux d'anonymat, le réseau défini par logiciel, les blockchains, etc.), exige de nouvelles techniques d'évaluation des performances (y compris l'efficacité énergétique), de la sécurité et de la sûreté. Au-delà de la question binaire de savoir si un système donné est absolument efficace/robuste/sûr/sécurisé, un défi émergent consiste à déterminer quantitativement à quel point le système est efficace/robuste/sûr/sécurisé.

Malheureusement, la vérification quantitative est connue pour être extrêmement difficile : déjà la question de modéliser un système et de formuler le problème de vérification est complexe. Pour y remédier, différents types de propriétés quantitatives ont été introduits : probabilités de violation des spécifications, valeurs de jeux de simulation, sémantique quantitative des logiques de spécification, mesures de robustesse, entropie comme mesure d'information, et taux d'entropie de l'ensemble des comportements indésirables. En ce qui concerne le calcul de ces propriétés, les approches classiques de model-checking ont été complétées par diverses techniques quantitatives, à la fois classiques et nouvelles : programmation linéaire, approches basées sur la théorie des jeux, équations différentielles et intégrales, etc. Ainsi, répondre à des questions quantitatives sur différents systèmes pilotés par des logiciels nécessite autant d'approches quantitatives ad hoc.

Cette diversité pose plusieurs problèmes. Tout d'abord, le développement de techniques appropriées peut être long et fastidieux, et il est donc indésirable de le faire pour chaque critère. De plus, pour un praticien, choisir la technique la plus pertinente parmi celles déjà existantes n'est guère plus facile : il est difficile de dire, pour deux techniques données, quels aspects sont similaires. De plus, des choix de terminologie incohérents rendent ces questions encore plus difficiles. De plus, outre la diversité, une autre difficulté vient de la nécessité de mélanger le raisonnement combinatoire discret avec le raisonnement sur les nombres (analyse numérique et fonctionnelle) : les deux nécessitent des compétences différentes issues de cultures différentes.

Le projet MaVeriQ cherche à atténuer ces problèmes en développant des cadres unifiés pour la vérification quantitative des systèmes temporisés, hybrides et stochastiques. Une telle unification est possible, car des motifs communs, souvent déguisés, sont utilisés dans de nombreux cas.

Le projet MaVeriQ regroupe plusieurs laboratoires français : l'IRIF de l'université de Paris, Le LMF de l'université de Paris-Saclay, INRIA Rennes, le VERIMAG de l'université Grenoble Alpes et le LACL pour qui

Benoît Barbot est le coordinateur local.

Le travail sur l'article [Bar+24] représente une partie d'un Work Package dans le projet Maveriq.

Projet de recherche dans le thème synthèse

Dans un souci permanent de définir des approches formelles utiles pour des applications industrielles, le but de cet axe est d'étudier et améliorer le passage à l'échelle dans le problème de la synthèse de contrôleur en améliorant techniques d'abstractions existantes. Cet axe s'articule autour de trois volets :

- La première partie sur les systèmes stochastiques a pour but d'étudier des notions d'abstraction entre des systèmes probabilistes (les processus de décision markoviens par exemple). Le but de ces abstractions n'est pas d'être fidèles ou correctes, mais elles doivent fournir des garanties. Une notion de garantie peut être imaginée comme une distance entre un système et son abstraction, l'objectif de cette partie est de permettre le passage à l'échelle pour de tels systèmes. En effet, on pourrait imaginer que le système à étudier est suffisamment grand pour ne pas être représentable en machine. On pourrait alors étudier l'abstraction et transposer ensuite les résultats obtenus à travers l'abstraction sur le système initial. La notion de distance qui permet de quantifier « l'éloignement entre l'abstraction et le système » servirait alors de d'outil formel pour garantir des bornes d'erreurs sur le résultat final.
- Dans ce volet, je m'intéresse aux systèmes multi-agents. Encore une fois, l'objectif général est le passage à l'échelle à travers des abstractions. Dans ces modèles, la solution recherchée est une solution qui modélise une certaine notion de rationalité, par exemple les équilibres de Nash. De manière générale, les approches par bisimulation ne préservent pas les équilibres de Nash. Dans cette partie de mon projet, je souhaite étudier les limites de ces approches. Cette partie est la plus exploratoire du projet.

Systèmes probabilistes Afin de présenter cette partie du projet, rappelons l'objectif principal du projet qui est d'améliorer les techniques de la synthèse de contrôleur afin rendre possible l'utilisation des approches formelles dans les applications industrielles donc de grandes taille. Commençant pour nous placer dans le contexte suivant ; un système modélisé par un processus de décision Markovien \mathcal{M} , une spécification Φ . On souhaite calculer un contrôleur telle que la probabilité que Φ soit satisfaite est maximale. Bien que ce problème soit très bien étudié d'un point de vu algorithmique et que l'on dispose d'outils formels adaptés, il n'est néanmoins pas envisageable d'utiliser ces techniques dans un contexte industriel car les approches formelles développées jusqu'à présent ne passent pas à l'échelle. Une technique classique utilisée dans ces cas de figure consiste à calculer une abstraction $\widehat{\mathcal{M}}$ de \mathcal{M} . Un tel objet permet en général de répondre à la question initial et dans le cas où il est plus petit permet de passer à l'échelle. Malheureusement il n'existe pas de bornes sur la taille possible de $\widehat{\mathcal{M}}$. Cela est du au fait que la correction d'une telle construction est basée sur le fait qu'il existe une bisimulation entre \mathcal{M} et $\widehat{\mathcal{M}}$. Un tel lien permet de garantir l'exactitude des calcul sur $\widehat{\mathcal{M}}$. En effet, l'existence d'une bisimulation permet de garantir l'existence d'un transfert entre un contrôleur optimal calculé sur $\widehat{\mathcal{M}}$ et un contrôleur optimal sur \mathcal{M} .

Objectifs L'objectif de cette partie du projet est de développer des techniques formelles qui fournissent des résultats approchés mais avec des garanties sur l'erreur permise. Afin d'avancer vers cet objectif, j'envisage d'organiser les travaux dans cette partie selon les deux tâches suivantes :

1. Développer une méthodologie formel pour obtenir une abstraction du système \mathcal{M} qui puisse être paramétrée selon les deux paramètres suivants : *i.* la taille, *ii.* l'erreur possible. Le premier paramètre permet de contrôler la taille de l'abstraction afin d'obtenir des systèmes suffisamment petit. Le second paramètre permet de tronquer le calcul d'un contrôleur optimal tout en gardant un contrôle sur l'erreur maximale permise.
2. Afin de permettre une telle approche, il faut développer des notions de distances compatibles avec ce genre techniques. De telles distances doivent pouvoir garantir une certaine robustesse dans le sens suivant : *si deux systèmes sont proches alors leurs contrôleurs optimaux seront eux aussi proches*. Une telle notion de continuité peut s'avérer utile dans le cas où l'abstraction est calculée de manière « ad hoc ». Par exemple dans certains cas d'utilisation, le designer du système construit « à la main » une abstraction et il souhaiterait connaître à quel point cette abstraction candidate est correcte. Le développement d'une distance tel que expliqué précédemment permettait de développer des méthodes de raffinement d'abstraction. Par conséquent la tâche suivante est une piste naturelle.

3. Développer des critères formels garantissant la continuité des système vis-à-vis de leurs contrôleurs optimaux.

Les Tâches 1. et 2. peuvent être étudiées de manière simultanée alors que la tâche 3. nécessite des avancées notable dans les tâches 1. et 2., actuellement je co-dirige, avec Mickaël Randour (UMONS, Belgique), Nicolas Lecomte une thèse sur des thématiques liées aux tâches 1. et 2. Le but de cette thèse est d'étudier différentes distances et abstractions et développer une approche formelle pour le calcul approché dans des chaînes de Markov de grandes tailles.

Systèmes multi-agent Dans les parties précédentes, le problème de la synthèse visait à construire un contrôleur qui garantit une certaine spécification contre tous les comportements d'un environnement. Cet environnement est supposé antagoniste. Dans un système multi-agent, les différentes entités qui composent le système possèdent chacune une spécification à garantir sans pour autant vouloir nuire aux autres agents. Dans de tels systèmes le problème de la synthèse se formalise par la question suivante : Est-il possible de définir une politique d'interaction pour le système qui soit acceptée par tous les agents ? Cette notion de politique d'interaction est appelée *concept de solution*. Ce concept de solution formalise une interaction rationnelle entre les agents. Un des concepts les plus populaires est l'*équilibre de Nash*. Encore une fois les techniques actuelles souffrent d'explosion combinatoire qui empêche le passage à l'échelle. Malheureusement les approches classiques pour la réduction d'états comme la bisimulation ne préservent pas l'existence de solution.

Objectifs Les objectifs de cette partie sont destinés d'une part à développer des techniques de réduction d'états tout en garantissant la préservation de solutions, et d'autre part développer des techniques d'approximations basées sur une notion de distance pour obtenir des techniques d'approximation.

1. Revoir la notion de bisimulation pour garantir le transfert des solutions.
2. Étudier la limite de la préservation de solutions pour différentes notions d'abstractions et pour d'autres concepts, voir même d'autres notions de la synthèse.
3. Tendre vers l'approximation pour les systèmes multi-agent vue à travers le prisme de la distance.

- [Bar+24] Benoît BARBOT, Damien BUSATTO-GASTON, Catalin DIMA et Youssouf OUALHADJ. *Controller Synthesis in Timed Büchi Automata : Robustness and Punctual Guards*. 2024. arXiv : 2404.18584 [cs.GT].
- [Bou+23] Patricia BOUYER, Youssouf OUALHADJ, Mickael RANDOUR et Pierre VANDENHOVE. ‘Arena-Independent Finite-Memory Determinacy in Stochastic Games’. In : *Log. Methods Comput. Sci.* 19.4 (2023).
- [Bus+23] Damien BUSATTO-GASTON, Debraj CHAKRABORTY, Anirban MAJUMDAR, Sayan MUKHERJEE, Guillermo A. PÉREZ et Jean-François RASKIN. ‘Bi-objective Lexicographic Optimization in Markov Decision Processes with Related Objectives’. In : *Automated Technology for Verification and Analysis - 21st International Symposium, ATVA 2023, Singapore, October 24-27, 2023, Proceedings, Part I*. Sous la direction de Étienne ANDRÉ et Jun SUN. Tome 14215. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2023, pages 203-223.
- [BMR23] Damien BUSATTO-GASTON, Benjamin MONMEGE et Pierre-Alain REYNIER. ‘Optimal controller synthesis for timed systems’. In : *Log. Methods Comput. Sci.* 19.1 (2023).
- [Con+23] Rodica CONDURACHE, Catalin DIMA, Youssouf OUALHADJ et Nicolas TROQUARD. ‘Synthesis of Resource-Aware Controllers Against Rational Agents’. In : *Proceedings of the 2023 International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS 2023, London, United Kingdom, 29 May 2023 - 2 June 2023*. Sous la direction de Noa AGMON, Bo AN, Alessandro RICCI et William YEOH. ACM, 2023, pages 775-783.
- [Bor+22] Benjamin BORDAIS, Damien BUSATTO-GASTON, Shibashis GUHA et Jean-François RASKIN. ‘Strategy Synthesis for Global Window PCTL’. In : *49th International Colloquium on Automata, Languages, and Programming, ICALP 2022, July 4-8, 2022, Paris, France*. Sous la direction de Mikolaj BOJANCZYK, Emanuela MERELLI et David P. WOODRUFF. Tome 229. LIPIcs. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2022, 115 :1-115 :20.

- [Bou+22] Patricia BOUYER, Stéphane Le ROUX, Youssouf OUALHADJ, Mickael RANDOUR et Pierre VANDENHOVE. ‘Games Where You Can Play Optimally with Arena-Independent Finite Memory’. In : *Log. Methods Comput. Sci.* 18.1 (2022).
- [Con+22] Rodica CONDURACHE, Catalin DIMA, Madalina JITARU, Youssouf OUALHADJ et Nicolas TROQUARD. ‘Careful Autonomous Agents in Environments With Multiple Common Resources’. In : *Proceedings of the Second Workshop on Agents and Robots for reliable Engineered Autonomy, AREA@IJCAI-ECAI 2022, Vienna, Austria, 24th July 2022*. Sous la direction de Rafael C. CARDOSO, Angelo FERRANDO, Fabio PAPACCHINI, Mehrnoosh ASKARPOUR et Louise A. DENNIS. Tome 362. EPTCS. 2022, pages 3-14.
- [OTV22] Youssouf OUALHADJ, Léo TIBLE et Daniele VARACCA. ‘Fairness and promptness in Muller formulas’. In : *CoRR* abs/2204.13215 (2022). arXiv : 2204.13215.
- [Bou+21] Patricia BOUYER, Youssouf OUALHADJ, Mickael RANDOUR et Pierre VANDENHOVE. ‘Arena-Independent Finite-Memory Determinacy in Stochastic Games’. In : *32nd International Conference on Concurrency Theory, CONCUR 2021, August 24-27, 2021, Virtual Conference*. Sous la direction de Serge HADDAD et Daniele VARACCA. Tome 203. LIPIcs. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2021, 26 :1-26 :18.
- [Con+21] Rodica CONDURACHE, Catalin DIMA, Youssouf OUALHADJ et Nicolas TROQUARD. ‘Rational Synthesis in the Commons with Careless and Careful Agents’. In : *AAMAS ’21 : 20th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, Virtual Event, United Kingdom, May 3-7, 2021*. Sous la direction de Frank Dignum, Alessio LOMUSCIO, Ulle ENDRISS et Ann NOWÉ. ACM, 2021, pages 368-376.
- [Bou+20] Patricia BOUYER, Stéphane Le ROUX, Youssouf OUALHADJ, Mickael RANDOUR et Pierre VANDENHOVE. ‘Games Where You Can Play Optimally with Arena-Independent Finite Memory’. In : *31st International Conference on Concurrency Theory, CONCUR 2020, September 1-4, 2020, Vienna, Austria (Virtual Conference)*. Sous la direction d’Igor KONNOV et Laura KOVÁCS. Tome 171. LIPIcs. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2020, 24 :1-24 :22.
- [Bri+20] Thomas BRIHAYE, Florent DELGRANGE, Youssouf OUALHADJ et Mickael RANDOUR. ‘Life is Random, Time is Not : Markov Decision Processes with Window Objectives’. In : *Log. Methods Comput. Sci.* 16.4 (2020).
- [Bri+19] Thomas BRIHAYE, Florent DELGRANGE, Youssouf OUALHADJ et Mickael RANDOUR. ‘Life Is Random, Time Is Not : Markov Decision Processes with Window Objectives’. In : *30th International Conference on Concurrency Theory, CONCUR 2019, August 27-30, 2019, Amsterdam, the Netherlands*. Sous la direction de Wan J. FOKKINK et Rob van GLABBECK. Tome 140. LIPIcs. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2019, 8 :1-8 :18.
- [Bus+19] Damien BUSATTO-GASTON, Benjamin MONMEGE, Pierre-Alain REYNIER et Ocan SANKUR. ‘Robust Controller Synthesis in Timed Büchi Automata : A Symbolic Approach’. In : *Computer Aided Verification - 31st International Conference, CAV 2019, New York City, NY, USA, July 15-18, 2019, Proceedings, Part I*. Sous la direction d’Isil DILLIG et Serdar TASIRAN. Tome 11561. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2019, pages 572-590.
- [BMR18] Damien BUSATTO-GASTON, Benjamin MONMEGE et Pierre-Alain REYNIER. ‘Symbolic Approximation of Weighted Timed Games’. In : *38th IARCS Annual Conference on Foundations of Software Technology and Theoretical Computer Science, FSTTCS 2018, December 11-13, 2018, Ahmedabad, India*. Sous la direction de Sumit GANGULY et Paritosh K. PANDYA. Tome 122. LIPIcs. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2018, 28 :1-28 :16.

2.11 Logiques et modèles expressifs pour les systèmes multi-agents concurrents

- Catalin Dima, PR, FST.
- Daniele Varacca, PR, FST.
- Youssouf Oualhadj, MCF, FST.
- Régine Laleau, PR, IUT Sénat-Fontainebleau.
- Mariem Hammami, étudiante en thèse.
- Bogdan Prelipcean, étudiant en thèse.

La spécification et la vérification des propriétés des systèmes multi-agents se heurte à des barrières de complexité, voire même d'indécidabilité, car le problème de model-checking pour beaucoup de logiques de stratégies multi-agents est soit indécidable (dans le cas de l'information imparfaite [DT11]), soit nonélémentaire (dans le cas de la Strategy Logic [Mog+14]). Le cas de la logique ATL avec information parfaite, avec son problème de model-checking en temps polynomial [AHK02] est un cas à part, mais cette logique ne permet pas d'exprimer des propriétés intéressantes comme l'existence d'équilibres de Nash ou d'autres propriétés stratégiques relatives à l'existence des objectifs multiples pour des joueurs différents. La généralisation à des aspects quantitatifs comme des logiques du temps réel se heurte aussi à des questions de complexité ou de décidabilité. Les travaux dans ce thème se concentrent en conséquence, d'une part, sur l'identification des fragments de la logique SL qui ont un problème de model-checking décidable en temps élémentaire, et d'autre part, sur des techniques de réduction de l'espace d'états qui préservent les propriétés stratégiques. Dans ce sens, on étudie des propriétés de simulation et/ou bisimulation préservant les propriétés stratégiques des agents. Cette partie du travail nécessite de généraliser les notions de (bi)simulation pour prendre en compte l'aspect multi-agent et multi-objectif, de formuler et prouver des propriétés de type Hennessy-Milner pour identifier les fragments des logiques dont la satisfaisabilité est préservée par la notion de simulation définie, d'étudier les propriétés algorithmiques ou des techniques de preuve pour ces bisimulations, d'identifier des fragments de logiques pour lesquelles de telles bisimulations permettent de réduire le problème de model-checking à des cas décidables ou à complexité plus faible, et enfin d'appliquer ces techniques à des cas d'étude – ou à contrario de s'inspirer des cas d'étude afin de définir des fragments de logique ou des sous-classes de modèles avec des bonnes propriétés algorithmiques.

Expressivité et complexité des logiques multi-agents Une série de résultats lancée en 2017 concerne de l'expressivité de ces logiques, soit par comparaison sur des classes de modèles communs, soit à travers des notions de simulation ou d'autres types d'équivalence observationnelle, via des théorèmes de type Hennessy-Milner. Cette série a commencé avec la proposition d'une notion de bisimulation pour ATL avec information imparfaite, publié d'abord dans les actes de la conférence AAMAS, puis en version étendue dans [Bel+21]. Dans cet article nous avons montré que ces notions de bisimulation préservent la satisfaisabilité des formules dans les différents fragments de ATL et de SL étudiés. Dans le cas de ATL avec information imparfaite, l'une de ces variantes de bisimulation permet d'avoir aussi la propriété duale, à savoir le fait que toute classe de modèles bisimilaires peut être définie par une formule dans une version de ATL employant une sémantique de type common-knowledge pour les opérateurs de coalition [Bel+20]. Nous avons aussi appliqué cette notion de bisimulation pour réduire l'espace d'état d'un modèle de protocole de vote électronique sans chiffrement paramétré par le nombre de participants, ce qui nous a permis de réduire l'espace d'état et appliquer des outils de model-checking pour vérifier des propriétés d'anonymat et de coercion-freeness pour des instances de ces problèmes pour lesquelles les outils ne pouvaient pas donner de réponse dans un intervalle de temps raisonnable. Nous avons aussi montré dans [Bel+19] que, dans le cas où les agents possèdent une visibilité limitée mais flexible de l'état d'autres agents dans les systèmes multi-agents de type Concurrent Game Structures à information imparfaite, le problème de model-checking est 2-EXPTIME-complet, similaire au cas avec information parfaite, ce qui montre que ces systèmes ne sont pas plus difficiles à vérifier que les systèmes à information parfaite. Nous appliquons ce résultat à une étude de cas en sécurité, les "Terrorist Fraud Attacks" (TF). Plus précisément nous montrons que le protocole Distance Bounding de Hancke & Kuhn, qui est sujet à une attaque de type TF, peut être modélisé en tant que *A*-cast vCGS et que la propriété d'existence d'une attaque de type TF est exprimable en ATL avec information imparfaite, ce qui permet d'appliquer notre algorithme de décision du problème de model-checking. On note aussi que la propriété d'existence d'un attaque TR est la première propriété de sécurité nécessitant des opérateurs de coalition imbriqués.

Un autre travail [DMP18] nous a permis de montrer une différence entre l'expressivité de ATL et des logiques modales épistémiques employant des opérateurs de point fixe, travail basé aussi sur l'emploi des bisimulations pour les logiques modales. Dans cet article, nous avons étudié la possibilité de généraliser le résultat fondamental de D. Janin et I. Walukiewicz qui montre que le μ -calcul est expressivement complet par rapport à la logique monadique du second ordre (MSO) modulo bisimulation. Le cadre de la généralisation est celui des logiques

temporelles épistémiques, c'est à dire, du μ -calcul épistémique et de l'extension de la logique MSO avec des prédicts binaires interprétés sur la base du prédict binaire *même niveau*.

Nous avons aussi proposé dans [BDM18] des notions de bisimulation pour des fragments de la logique *Strategy Logic* (SL). Les bisimulations sont données pour la version de SL où les agents interagissent à l'aide des stratégies avec mémoire. Nous montrons que les (bi)simulations conservent la satisfaisabilité des fragments considérés, c.à.d. si une arène G simule une autre arène G' et une formule φ est satisfaite dans G' , alors elle sera satisfaite dans G (ce qui représente l'implication directe dans des théorèmes de type Hennessy-Milner). Nous prouvons aussi que l'un des fragments nouvellement introduit, le SSL^- , est équivalent en expressivité avec la logique ATL_{sc} , l'Alternating-time Temporal Logic avec des contextes de stratégie.

Plus récemment nous avons proposé [DJ23] une notion de patron de stratégie qui peut s'appliquer à chaque membre d'une classe de structures multi-agents. De tels patrons de stratégie sont définis par une classe de machines de Turing (ou autre dispositif calculatoire équivalent) dont la complexité est paramétrée par une classe de complexité. Les sources d'inspiration sont la formalisation de la puissance d'un attaquant contre un système cryptographique qui, tout en possédant une mémoire potentiellement non-bornée, doit satisfaire à des contraintes de complexité calculatoire. Nous avons montré que la hiérarchie définie par les classes de complexité NP et EXPTIME est stricte, ainsi le fait que le problème de synthèse de patron de stratégie pour une classe de structures de jeux multi-agents à information imparfaite est indécidable. Nous avons aussi proposé des restrictions sur les classes de structures de jeu et la structure de l'information des agents pour lesquelles le problème de model-checking devient décidable.

Équivalences observationnelles et simulations de processus L'article [AV22] propose une nouvelle approche pour étudier les équivalences entre programmes – en particulier dans le cadre des algèbres de processus pour le calcul concurrent. Cette approche clarifie la distinction qui est trop souvent laissée implicite entre les rôles du programmeur et du testeur. Il aide à mieux comprendre des problèmes préexistants qui touchent les algèbres de processus tel le π -calcul. L'approche consiste à subdiviser la notion de processus en trois entités conceptuellement séparées, que nous appelons termes, processus (achevés) et tests, et en soulignant l'importance de formaliser la compléition des termes de processus et l'instrumentation qui résulte de la mise en place d'un processus (achevé) dans un test. Alors que le rôle de ce qui peut être observé et les subtilités dans les définitions des congruences ont été étudiés de manière intensive, le fait que tous les termes ne peuvent pas être testés et que le testeur devrait avoir accès à un ensemble d'outils différent de celui du programmeur est souvent laissé de côté, et ce travail comble cette lacune.

L'article [DDV23], inspiré des travaux en algèbre de processus sur les fondements sémantiques de la notion de simulation entre deux processus, propose deux notions de préordre observationnel sur les Alternating Transition Systems, la première basée sur le fait de forcer (par synthèse de stratégie) la satisfaisabilité d'une propriété, l'autre sur une interprétation des stratégies en tant que contextes. On montre alors que la simulation alternante d'Alur & al est une technique de preuve correcte pour le premier préordre observationnel et complète pour le préordre contextuel.

Systèmes temps réel Dans cette thématique, on s'intéresse aux systèmes à temps réel, plus précisément les *systèmes hybrides*. Ce formalisme se présente sous forme de systèmes discrets (des automates finis par exemple) dotés d'un ensemble fini de variables appelées *horloges*. Le comportement de ces horloges est régi par des équations différentielles ordinaires. Le problème de la synthèse dans ces systèmes est indécidable. Il est par contre décidable pour une classe restreinte connue sous le nom d'*automates temporisés*. Une technique utilisée avec succès pour identifier des sous classes plus large et décidable de systèmes hybrides consiste à utiliser des approches par bisimulation. Cette approche permet de construire à partir d'un système hybride un automate temporisé. Les deux systèmes ainsi obtenus sont *bisimilaires*. Ce lien permet d'obtenir la décidabilité, et ainsi construire des contrôleurs pour des spécifications temporelles e.g. données en *LTL*.

L'objectif dans cette partie est d'étendre cette technique à des spécifications temporisées (données en Timed Linear Temporal Logic *TLTL* par exemple). Trois objectifs ont été fixés :

1. Définir une notion de bisimulation entre automates temporisés qui préserve le contrôle pour des spécifications temporisées et étudier ces limites d'un point de vue algorithmique.
2. Identifier une classe de systèmes hybrides qui soient bisimilaires (avec cette nouvelle relation) avec des automates temporisés.
3. Affaiblir la notion de bisimulation et ainsi obtenir des techniques non approchées pour élargir la classe des systèmes manipulés.

Les deux premières tâches sont actuellement étudiés dans le cadre de la thèse de Mariem Hammami, co-dirigée par Youssouf Oualhadj, Catalin Dima et Régine Laleau. Une autre piste qui pourrait émaner des travaux de cette thèse consisterait à affaiblir la relation qui lie un système hybride à l'automate temporiser. Cette piste pourrait aider à développer des techniques d'approximations, les résultats attendus de dans cette thèse pourront alors nourrir les reflexions pour la troisième tâche. On essayera aussi développer des notions de distances entre système hybride et automates temporisés (dans le même esprit que la partie précédente du projet) pour obtenir des techniques de raffinement d'abstraction.

Travail de thèse de Bogdan Prelipcean Le but de la thèse de Bogdan est de garantir la "conformité" entre des spécifications d'attaques décrites à l'aide des *arbres d'attaque* et des modèles de détection d'attaques décrits sous forme de systèmes de transition, produits à partir d'un langage de description des détections nommé *Generic Thread Detection Language* (GTDL) développé en interne chez BitDefender. Ce lien est fait via une version symbolique de la *(bi)simulation faible* : nous voulons vérifier que l'arbre d'attaque simule, ou est simulé, ou est (faiblement) bisimilaire au système de transition étiquetée correspondant au modèle de détection des attaques. Dans sa thèse, Bogdan propose une sémantique opérationnelle structurée au langage GTDL, puis propose une méthodologie de traduction des spécifications de détection en GTDL et des arbres d'attaque dans le langage de spécification Lotos NT (LNT) utilisé dans la suite logicielle CADP développée à l'INRIA Grenoble, afin de vérifier le lien de simulation faible (directe, inverse ou bisimulation) ou d'inclusion de traces entre les deux modèles. Bogdan a appliqué des études de cas modélisant des attaques documentées sur <https://attack.mitre.org/> avec des résultats prometteurs.

Un autre volet de son travail concerne la génération automatique de spécifications de détection d'attaques à partir d'arbres d'attaques. Bogdan propose dans sa thèse un algorithme de traduction, sous la forme de la construction d'un terme dans l'algèbre de processus dans laquelle la sémantique de GTDL est donnée, à partir d'un terme dans l'algèbre de processus des arbres d'attaque, et prouve sa correction. L'étape d'implémentation de cet algorithme et de ses applications industrielles sera abordée dans la suite de la thèse.

Projet de recherche dans le thème Logique et systèmes multi-agents

Nous nous proposons d'aborder systématiquement des problèmes de mechanism design à travers leur expression en tant que problèmes de synthèse rationnelle. Pour cela, nous allons étudier des extensions de logiques temporelles épistémiques en proposant des sémantiques à mémoire non-bornée ou des opérateurs de croyance (quatitatifs), en étudiant la frontière de la décidabilité et, le cas échéant, la complexité du model-checking par codage en théorie des automates d'arbres et/ou jeux à deux joueurs. Pour retrouver des cas décidables, nous allons limiter à des sémantiques à mémoire finie et nous inspirer des hypothèses de type "rationnalité bornée" existantes dans la théorie des jeux épistémiques. La reformulation d'un large enventail de concepts de solution (au delà des équilibres de Nash) sera étudiée, y compris inspirés de la théorie des jeux coopératifs.

La complexité bien connue du problème de vérification des propriétés stratégiques dans les systèmes multi-agents limite grandement l'utilisation des techniques basées sur des formulations de type synthèse ou model-checking des propriétés dans diverses versions de la Strategy Logic à observation imparfaite. Des techniques de réduction de l'espace d'états sont alors nécessaires, rendant possible la synthèse de profils de stratégie pour des modèles plus petits puis, par raffinement, leur extension au système initial. L'utilité d'une telle approche basée sur des notions de type simulation a déjà été montrée dans notre article [Bel+21]. Nous comptons poursuivre ce travail dans le sens suivant : en nous inspirant des approches existantes en algèbres de processus, nous allons étudier des réductions de l'espace d'états pour des modèles de jeux basés sur des primitives d'interaction entre les agents, ainsi que les propriétés de préservation de la satisfaisabilité des formules que ces réductions engendrent. Pour cela, une extension du travail autour des notions de bisimulation pour des fragments de la Strategy Logic est nécessaire, couplé avec des techniques de preuve de simulation de type *up-to* existantes en algèbres de processus.

Le troisième volet du projet de recherche concerne la poursuite du travail autour de la notion de patrons de stratégies bornés par une classe de complexité. Pour cela, nous comptons identifier des problèmes de synthèse de patrons de stratégie pour des classes de structures de jeu paramétrées concrètes, telles que des structures de jeu à compteurs. Notons au passage que le problème de synthèse à étudier sera différent du problème de synthèse dans des systèmes paramétrés, car le but est de montrer l'existence d'un patron de stratégie (définissable par un transducteur paramétré) qui, utilisé pour n'importe quel instance de paramètre, permettra de satisfaire la propriété temporelle épistémique désirée.

On notera que les objectifs de ce thème et ceux du thème de la synthèse devraient créer les prémisses d'une émulation au sein de l'équipe SVS, les derniers fournissant un certain nombre d'outils, de techniques et de

résultats pour le premier thème. Toutefois, le but du thème Logique et systèmes multi-agents restera centré autour des problèmes algorithmiques en logiques multi-agents.

- [DDV23] Romain DEMANGEON, Catalin DIMA et Daniele VARACCA. ‘Observational Preorders for Alternating Transition Systems’. In : *Multi-Agent Systems - 20th European Conference, EUMAS 2023, Naples, Italy, September 14-15, 2023, Proceedings*. Sous la direction de Vadim MALVONE et Aniello MURANO. Tome 14282. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2023, pages 312-327.
- [DJ23] Catalin DIMA et Wojciech JAMROGA. ‘Computationally Feasible Strategies’. In : *Proceedings of the 2023 International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS 2023, London, United Kingdom, 29 May 2023 - 2 June 2023*. Sous la direction de Noa AGMON, Bo AN, Alessandro RICCI et William YEOH. ACM, 2023, pages 784-792.
- [AV22] Clément AUBERT et Daniele VARACCA. ‘Processes against tests : On defining contextual equivalences’. In : *J. Log. Algebraic Methods Program.* 129 (2022), page 100799.
- [Bel+21] Francesco BELARDINELLI, Rodica CONDURACHE, Catalin DIMA, Wojciech JAMROGA et Michal KNAPIK. ‘Bisimulations for verifying strategic abilities with an application to the ThreeBallot voting protocol’. In : *Inf. Comput.* 276 (2021), page 104552.
- [Bel+20] Francesco BELARDINELLI, Catalin DIMA, Vadim MALVONE et Ferucio Laurentiu TIPLEA. ‘A Hennessy-Milner Theorem for ATL with Imperfect Information’. In : *LICS ’20 : 35th Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science, Saarbrücken, Germany, July 8-11, 2020*. Sous la direction d’Holger HERMANNS, Lijun ZHANG, Naoki KOBAYASHI et Dale MILLER. ACM, 2020, pages 181-194.
- [Bel+19] Francesco BELARDINELLI, Ioana BOUREANU, Catalin DIMA et Vadim MALVONE. ‘Verifying Strategic Abilities in Multi-agent Systems with Private Data-Sharing’. In : *Proceedings of the 18th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems, AAMAS ’19, Montreal, QC, Canada, May 13-17, 2019*. Sous la direction d’Edith ELKIND, Manuela VELOSO, Noa AGMON et Matthew E. TAYLOR. International Foundation for Autonomous Agents et Multiagent Systems, 2019, pages 1820-1822.
- [BDM18] Francesco BELARDINELLI, Catalin DIMA et Aniello MURANO. ‘Bisimulations for Logics of Strategies : A Study in Expressiveness and Verification’. In : *Principles of Knowledge Representation and Reasoning : Proceedings of the Sixteenth International Conference, KR 2018, Tempe, Arizona, 30 October - 2 November 2018*. Sous la direction de Michael THIELSCHER, Francesca TONI et Frank WOLTER. AAAI Press, 2018, pages 425-434.
- [DMP18] Catalin DIMA, Bastien MAUBERT et Sophie PINCHINAT. ‘Relating Paths in Transition Systems : The Fall of the Modal Mu-Calculus’. In : *ACM Trans. Comput. Log.* 19.3 (2018), 23 :1-23 :33.
- [Mog+14] Fabio MOGAVERO, Aniello MURANO, Giuseppe PERELLI et Moshe Y. VARDI. ‘Reasoning About Strategies : On the Model-Checking Problem’. In : *ACM Trans. Comput. Log.* 15.4 (2014), 34 :1-34 :47.
- [DT11] Catalin DIMA et Ferucio Laurentiu TIPLEA. ‘Model-checking ATL under Imperfect Information and Perfect Recall Semantics is Undecidable’. In : *CoRR* abs/1102.4225 (2011). arXiv : 1102.4225.
- [AHK02] Rajeev ALUR, Thomas A. HENZINGER et Orna KUPFERMAN. ‘Alternating-time temporal logic’. In : *J. ACM* 49.5 (2002), pages 672-713.

2.12 Evaluation de performances

- Lynda Mokdad, professeur, FST
- El Habib Boudjema, doctorant, soutenu en 2018
- Walid Serrai, doctorant, soutenu en 2020
- Mi Chen, doctorant, soutenance prévue 21 mai 2024
- Abdel Razak Hamadou, doctorant
- Bouakouk Redha, doctorant
- Mohamed Riadh Kadri, doctorant

Contexte

La complexité croissante des systèmes informatiques rend l'analyse, l'évaluation des performances et la garantie du bon fonctionnement de plus en plus nécessaire. De plus, la prolifération de nouvelles applications et services, de nouveaux supports de transmissions et nouveaux équipements met la qualité de service (QoS) au cœur du développement de ces systèmes. L'évaluation des performances devient une tâche essentielle afin de vérifier les contraintes de QoS. Cependant les modèles des systèmes réels sont complexes et de très grande taille, ce qui engendre une explosion combinatoire du nombre d'états. Il n'est donc pas possible d'utiliser les techniques d'évaluations de performance existantes sans y apporter des modifications. Il convient donc de les adapter aux problèmes de complexité actuelle. En premier lieu, il s'agit d'analyser parmi les techniques, lesquelles seront appropriées aux modèles. Une autre approche consiste à développer de nouvelles techniques qui tirent profit de la structure particulière de certains modèles. Enfin une validation expérimentale est indispensable afin de mesurer les gains en complexité obtenus dans des cas réels. Nos contributions concernent d'une part, la modélisation, l'évaluation, les techniques d'apprentissage, la vérification quantitative et la sécurité dans les domaines des réseaux sans fil tels que les réseaux VANETS et LoRaWAN, et des architectures de services Web. D'autre part, un axe cybersécurité a été développé en s'intéressant d'une part aux problèmes de déni de service dans les réseaux contre les attaques de déni de service et aux vulnérabilités dans le code pour des applications développées en langage C.

Contributions

Modélisation La difficulté des systèmes informatiques, des réseaux actuels et des nouvelles technologies logicielles réside tout d'abord dans la recherche d'outils permettant de construire des modèles reproduisant le plus fidèlement possible ces systèmes réels, puis dans la quête de méthodes adaptées pour leur résolution. Dans nos travaux de recherche, nous avons utilisé les réseaux de files d'attente et les réseaux de Petri, pour lesquels de nombreux résultats existent dans la littérature. Nous avons également employé les Réseaux d'Automates Stochastiques (RAS), qui permettent de modéliser efficacement le comportement dynamique d'un système en spécifiant l'ensemble de toutes les transitions possibles entre les différents états de ce système. De plus, il existe des formules compactes basées sur les produits et les sommes tensoriels pour le générateur et la matrice de transition associés aux chaînes de Markov. Nous avons également utilisé les processus de décision markoviens (MDP) pour la prédiction de stratégie dans les réseaux LoRaWAN.

Réseau LoRaWAN LoRaWAN vise à fournir une solution de communication à longue portée et à faible consommation d'énergie. Ce réseau est largement utilisé dans différents scénarios IoT. Motivés par l'amélioration des performances des réseaux LoRaWAN, nous avons proposé plusieurs contributions essentiellement sur l'amélioration des performances de la couche MAC et la sécurité.

Amélioration des performances

Nous avons proposé une méthode d'allocation dynamique des paramètres de LoRaWAN appelée STEPS (Score Table based Evaluation and Parameters Surfing) [Che+21b]. Cette méthode fournit une approche probabiliste pour évaluer et modifier les paramètres de transmission. Un modèle distribué de processus de décision de Markov (MDP) est proposé pour simuler la transmission en liaison montante d'un dispositif LoRaWAN [Che+22a]. En résolvant le modèle, une variante de STEPS avec initialisation MDP est également proposée. Par la suite, plusieurs variantes de STEPS ont été proposées sur la base de différents algorithmes d'apprentissage par renforcement. Certaines variantes sont basées sur un problème d'exploration-exploitation (EE), l'algorithme ϵ -Greedy et l'algorithme d'exploration de Boltzmann. D'autres variantes sont basées sur l'algorithme Q-learning et notre algorithme hybride [Che+23a]. Par rapport aux algorithmes existants dans LoRaWAN, les méthodes proposées augmentent les performances du réseau et réduisent la consommation d'énergie.

Sécurité dans LoRaWAN

Nous nous sommes intéressés à l'aspect sécurité dans le réseau LoRaWAN. LoRaLOFT [Che+22b], une

méthode de détection des malveillances basée sur l'apprentissage automatique, est proposée pour détecter les attaques de déni de service (DoS) de type puisement du cycle de service des gateways [CBM23]. D'autres méthodes de détection basées sur l'apprentissage automatique sont développés [CBM24] pour identifier les comportements gourmands en analysant la robustesse et la résilience des réseaux LoRaWAN, contribuant ainsi à renforcer la sécurité globale des réseaux LoRaWAN [CMB23].

Vérification probabiliste du modèle dans LoRaWAN

Afin d'évaluer formellement les propriétés et les performances du LoRaWAN, la vérification probabiliste est utilisée. Un modèle d'automates temporisés probabilistes (PTA) est construit. En ajoutant l'aspect temporel, le PTA modélise la procédure de transmission complète de deux nœuds dans le réseau LoRaWAN avec une passerelle. Plusieurs propriétés sont vérifiées à l'aide de l'outil de vérification de modèle PRISM, et les propriétés quantitatives sont calculées dans différents cas [Che+23b].

Outil de simulation dans LoRaWAN

Deux simulateurs de LoRaWAN ont été développés. MULANE, est développé en tant qu'outil orienté agent léger et extensible, doté d'une interface utilisateur graphique (GUI) spécifiquement adaptée à LoRaWAN et intégrant divers instruments d'évaluation statistique [Che+21a]. De manière complémentaire, l'outil MELONS, dérivé de la reconstruction et du découplage du code de MULANE, est élaboré, accompagné d'une extension dédiée à la surveillance du trafic. Ces deux outils renforcent les capacités analytiques d'évaluation des réseaux LoRaWAN, offrant des ressources précieuses pour évaluer leurs propriétés et leurs performances [CMO23].

Cybersécurité

Dans cet axe, nous nous intéressons à différents aspects de la sécurité dans le cyberspace. Deux aspects sont développés, l'un sur la sécurité dans les réseaux contre les attaques de déni de service et l'autre sur la sécurité du code contre la violation d'attaques sur le système. Plusieurs contributions ont été proposées. Nous avons choisi de présenter deux d'entre elles dans ce qui suit. Sur la sécurité dans les réseaux, nous sommes intéressés à la protection contre les attaques dites par « déni de service », qui visent à perturber le fonctionnement normal du réseau. Nos travaux sont basés d'une part sur l'utilisation de capteurs de surveillance, qui sont périodiquement renouvelés pour répartir la consommation en énergie et d'autre part sur la détection des attaques de déni de service dans les réseaux véhiculaires (VANETS). Dans les réseaux de capteurs, nous avons proposé de nouveaux mécanismes pour établir un processus de sélection efficace de ces capteurs, en optimisant la simplicité de déploiement (sélection aléatoire), la répartition de la charge énergétique (sélection selon l'énergie résiduelle) ou encore la sécurité du réseau (élection démocratique basée sur un score de réputation et une élection accordéon qui est une technique adaptative) [Man+18]. Nous avons fourni différents outils pour modéliser les systèmes obtenus sous forme de chaînes de Markov à temps continu, de réseaux de Petri stochastiques (réutilisables pour des opérations de model checking) ou encore de jeux quantitatifs. Dans les réseaux de Vanets, une nouvelle méthode de détection d'attaque de déni de service de type jamming ciblant la disponibilité dans les réseaux véhiculaires a été développée en utilisant le PDR (Packet Data Ratio). Son évaluation a été faite par une approche stochastique à base de chaîne de Markov et par simulation sous NS2 afin de déterminer les seuils pour faire la différence entre une attaque ou une mauvaise qualité de transmission.

Détection de vulnérabilité dans le langage C

Sur la sécurité du code, nous nous sommes intéressés aux vulnérabilités provenant de l'usage des fonctions du langage C. Ce travail a fait partie d'une thèse cifre que j'ai eue avec safeRiver. Nous avons dressé une liste de vérification pour la détection des portions de code causant des vulnérabilités de sécurité. Ces vérifications ont été implémentées dans l'outil Carto-C et expérimentées sur la base de test Juliet et les sources d'applications réelles. Nous avons également étudié la détection de vulnérabilités exploitables au niveau du code binaire. Nous avons proposé une méthode expliquant comment rechercher des motifs de comportement de vulnérabilité dans les traces de comportements d'une application [Bou+18]. Cette méthode a été implémentée dans notre outil Vyper [Bou+19] et expérimentée avec succès sur la base de test Juliet et les binaires d'applications réelles.

Services Web

Nous nous sommes intéressés à l'évaluation de performance et aux méthodes de sélection et de composition de services Web avec proposition de plusieurs contributions [AHM19] [Ham+20] [Ach+22] [AMH20]. Nous avons choisi de présenter les plus récentes dans ce qui suit. Nous avons proposé une méthode multicritères hybride qui combine trois méthodes nommées skyline, BWM et VIKOR dans l'optique d'une sélection rapide des meilleurs services web [ASM22]. Nous avons également proposé une autre méthode de compromis basée sur le classement de différentes méthodes multicritères pour une sélection efficace des meilleurs services [Ser+19]. Nous avons proposé une nouvelle méthode hybride de sélection basée sur les contraintes utilisateurs. Cette méthode propose un classement des meilleurs services sur des intervalles de contraintes fixés par l'utilisateur. Nous avons proposé une

méthode à base de communautés et théorie des jeux dans le but de diminuer considérablement le temps de réponse d'une sélection de service web composite [MFA19]. Nous nous sommes également intéressés à l'évaluation de la qualité d'une composition de services Web et à la méthode de sélection pour garantir la QoS [Mok+21]. Dans cette étude, le problème particulier de nombreux consommateurs qui sont en concurrence pour acquérir des services avec les mêmes fonctionnalités, mais avec des mesures de QoS différentes est considéré. En supposant un environnement dynamique, nous avons développé différents modèles basés sur les chaînes de Markov à temps discret pour implémenter plusieurs politiques du système. Ainsi, une modélisation théorique du problème est proposée incluant les résultats analytiques obtenus à l'aide de l'outil Xborne. Pour chaque modèle, nous avons calculé le temps moyen pour atteindre une QoS donnée pour une communauté de consommateurs. Une telle mesure de performance permet au concepteur de prédire le comportement du système dans un environnement dynamique.

Travaux Futurs

Modèles de mobilité Dans un contexte de croissance démographique rapide et de progrès technologiques, les villes font face à des défis majeurs, notamment la congestion routière, les émissions de gaz à effet de serre et les perturbations économiques. La gestion de la mobilité devient cruciale pour créer des villes durables. Les avancées telles que les réseaux sans fil, les VANETs, l'IoT et les systèmes de transport intelligents offrent des solutions prometteuses. Cependant, intégrer harmonieusement la croissance démographique et ces technologies émergentes dans un modèle de mobilité global pose un défi complexe. Ce modèle devrait englober tous les acteurs, y compris les véhicules, les cyclistes et les piétons, tout en assurant la sécurité des données. L'utilisation de modèles stochastiques, de techniques d'intelligence artificielle, et d'autres approches novatrices sera explorée dans nos travaux de recherche, dans le but d'optimiser la gestion de la mobilité et contribuer ainsi à l'évolution vers des villes intelligentes, durables et agréables à vivre.

Techniques d'optimisation dans l'Environnement Cloud-IoT L'Internet des objets (IoT), caractérisé par une topologie dynamique et des limitations de stockage et d'énergie des noeuds, trouve une solution dans l'intégration avec le Cloud, formant ainsi l'environnement Cloud-IoT. La gestion efficace du routage des requêtes, des réponses et de la communication entre les objets est cruciale dans cet environnement. Dans le cadre de nos travaux de recherche futurs, nous explorerons des protocoles de routage adaptés, mettant l'accent sur la minimisation des coûts et la maximisation des bénéfices, évalués à travers la qualité de service (QoS) avec des métriques spécifiques. Nos objectifs incluront le développement de techniques d'optimisation, l'exploration de l'application de techniques de prise de décision multicritère (MCDM) dans le contexte du routage, et la simulation des solutions proposées.

Sécurité dans l'Internet des objets Sécurité dans l'Internet des objets. Les attaques par déni de service (DoS) sont les plus dangereuses dans l'Internet des objets, car elles ciblent la disponibilité des ressources. En cas d'attaque de type DoS, les conséquences peuvent être désastreuses. Plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature et dans des projets portant sur la détection et/ou la réaction après une attaque de type DoS dans les réseaux classiques. Nous avons également développé une expertise en matière de détection et de réaction d'attaques de DoS dans les réseaux Ad Hoc et véhiculaires au cours des dernières années. Cependant, la détection des attaques DoS dans l'Internet des objets est plus complexe, en raison de la diversité des équipements, de leurs vitesses, de la capacité de traitement et de stockage des équipements, ainsi que de la dynamique des changements de la topologie. Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous envisageons d'explorer les relations entre les types d'attaques, les approches de détection, les méthodes de validation, y compris les méthodes formelles, et les outils, ainsi que les métriques utilisées pour traiter les attaques DoS et DDoS dans le domaine de l'IoT.

- [CBM24] Mi CHEN, Jalel BEN-OTHMAN et Lynda MOKDAD. ‘Greedy Behavior Detection With Machine Learning for LoRaWAN Network’. In : *IEEE Transactions on Network and Service Management* (2024), pages 1-1.
- [CBM23] Mi CHEN, Jalel BEN-OTHMAN et Lynda MOKDAD. ‘Novel Denial-of-Service Attacks Against LoRaWAN on MAC Layer’. In : *IEEE Communications Letters* 27.11 (2023), pages 3123-3126.
- [CMB23] Mi CHEN, Lynda MOKDAD et Jalel BEN-OTHMAN. ‘Robustness and resilience of LoRaWAN facing greedy behaviors on the MAC layer.’ In : *IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Rome, Italy, 2023.
- [Che+23a] Mi CHEN, Lynda MOKDAD, Jalel BEN-OTHMAN et Jean-Michel FOURNEAU. ‘Dynamic Parameter Allocation with Reinforcement Learning for LoRaWAN’. In : *IEEE Internet of Things Journal* (2023), pages 1-1.

- [CMO23] Mi CHEN, Lynda MOKDAD et Jalel Ben OTHMAN. ‘MELoNS - A Modular and Extendable Simulator for LoRaWAN Network’. In : *2023 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*. Marrakesh, Morocco : IEEE, 2023, pages 923-928.
- [Che+23b] Mi CHEN, Lynda MOKDAD, Jalel Ben OTHMAN et Jean-Michel FOURNEAU. ‘Probabilistic Model Checking for Unconfirmed Transmission in LoRaWAN on the MAC Layer’. In : *GLOBECOM 2023 - 2023 IEEE Global Communications Conference*. Kuala Lumpur, France : IEEE, 2023, pages 2457-2462.
- [ASM22] Abdelkrim ABDELLI, Waliid SERRAI et Lynda MOKDAD. ‘A novel and efficient index based web service discovery approach’. In : *Computer Standards and Interfaces* 80 (2022), page 103586.
- [Ach+22] Meriem ACHIR, Abdelkrim ABDELLI, Lynda MOKDAD et Jalel BEN-OTHMAN. ‘Service discovery and selection in IoT : A survey and a taxonomy’. In : *Journal of Network and Computer Applications (JNCA)* 200 (2022), page 103331.
- [Che+22a] Mi CHEN, Lynda MOKDAD, Cedric CHARMOIS, Jalel BEN-OTHMAN et Jean-Michel FOURNEAU. ‘An MDP model-based initial strategy prediction method for LoRaWAN’. In : *ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications*. Seoul, South Korea : IEEE, 2022, pages 4836-4841.
- [Che+22b] Mi CHEN, Lynda MOKDAD, Jalel Ben OTHMAN et Jean-Michel FOURNEAU. ‘LoRaLOFT-A Local Outlier Factor-based Malicious Nodes detection Method on MAC Layer for LoRaWAN’. In : *GLOBECOM 2022 - 2022 IEEE Global Communications Conference*. Rio de Janeiro, Brazil : IEEE, 2022, pages 2026-2031.
- [Che+21a] Mi CHEN, Lynda MOKDAD, Jalel Ben OTHMAN et Jean-Michel FOURNEAU. ‘MULANE - A Lightweight Extendable Agent-oriented LoRaWAN Simulator with GUI’. In : *2021 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*. Athens, Greece : IEEE, 2021.
- [Che+21b] Mi CHEN, Lynda MOKDAD, Jalel Ben OTHMAN et Jean-Michel FOURNEAU. ‘STEPS - Score Table based Evaluation and Parameters Surfing approach of LoRaWAN’. In : *2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2021)*. Madrid, Spain : IEEE, 2021, pages 1-6.
- [Mok+21] Lynda MOKDAD, Jean-Michel FOURNEAU, Abdelkrim ABDELLI et Jalel BEN-OTHMAN. ‘Performance evaluation of a solution for composite service selection problem with multiple consumers’. In : *Simulation Modelling Practice and Theory* 109 (2021), page 102271.
- [AMH20] Abdelkrim ABDELLI, Lynda MOKDAD et Youcef HAMMAL. ‘Dealing with value constraints in decision making using MCDM methods’. In : *Journal of computational science* 44 (2020), page 101154.
- [Ham+20] Youcef HAMMAL, Khadidja SALAH MANSOUR, Abdelkrim ABDELLI et Lynda MOKDAD. ‘Formal techniques for consistency checking of orchestrations of semantic Web services’. In : *Journal of computational science* 44 (2020), page 101165.
- [AHM19] Abdelkrim ABDELLI, Youcef HAMMAL et Lynda MOKDAD. ‘ISOCOV : a new MCDM method to handle value constraints in Web service selection’. In : *2019 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*. Barcelona, Spain : IEEE, 2019, pages 1022-1027.
- [Bou+19] El Habib BOUDJEMA, Sergey VERLAN, Lynda MOKDAD et Christèle FAURE. ‘VYPER : Vulnerability detection in binary code’. In : *Security and Privacy* 3.2 (2019), e100.
- [MFA19] Lynda MOKDAD, Jean-Michel FOURNEAU et Abdelkrim ABDELLI. ‘Performance Evaluation of the QoS Aware Web Service Composition with Communities of Consumers’. In : *GLOBECOM 2019 - 2019 IEEE Global Communications Conference*. Waikoloa, United States : IEEE, 2019, pages 1-6.
- [Ser+19] Waliid SERRAI, Abdelkrim ABDELLI, Lynda MOKDAD et Ashref SERRAI. ‘How to deal with QoS value constraints in MCDM based Web service selection’. In : *Concurrency and Computation : Practice and Experience* 31.24 (2019).
- [Bou+18] El-Habib BOUDJEMA, Christèle FAURE, Mathieu SASSOLAS et Lynda MOKDAD. ‘Detection of security vulnerabilities in C language applications’. In : *Security and Privacy* (2018).

- [Man+18] Djamel MANSOURI, Lynda MOKDAD, Jalel BEN-OTHMAN et Malika IOUALALEN. ‘Modeling accordeon method using SAN’. In : *International Conference on Communications (ICC)*. Kansas City, United States, 2018.

A Les gens

A.1 Alexis Bès

Activités

- Relecture pour SIAM, ICALP.

Thématiques

Mon activité de recherche concerne principalement les problèmes de définissabilité et décidabilité en logique. L'étude de la décidabilité des théories logiques est un thème de recherche classique en logique, illustré par un corpus impressionnant de résultats, notamment concernant les arithmétiques faibles comme l'arithmétique de Presburger. Un champ d'applications naturel est la vérification automatique, domaine qui s'appuie fréquemment sur des formalismes logiques décidables. D'autre part ce domaine présente des liens étroits avec les automates finis et l'arithmétique. Mon travail contribue à mettre en évidence la fécondité de ces liens, et à mieux comprendre les propriétés des formalismes logiques à la frontière de la décidabilité.

Sur la période de référence mon travail s'est concentré sur les deux problématiques suivantes :

- **Définissabilité et applications aux automates sur les réels** Les travaux de Büchi, Seménov, Muchnik, Michaux et Villemaire, ainsi que mon travail de thèse, ont montré comment les techniques de définissabilité logique, en particulier autour de l'arithmétique de Presburger, permettaient de résoudre efficacement des problèmes combinatoires et algorithmiques sur les ensembles d'entiers reconnaissables par automate fini : théorème de Cobham-Seménov, généralisation aux systèmes de numération non classiques, caractérisation de sous-classes... L'un des résultats remarquables du domaine, dû à Muchnik, est une nouvelle caractérisation de la définissabilité dans l'arithmétique de Presburger, qui conduit à un critère effectif pour décider si une relation n -aire sur les entiers qui est reconnaissable par automate (via l'écriture des entiers dans une base fixée) est reconnaissable en toute base. Depuis une vingtaine d'années un certain nombre de résultats classiques du domaine ont été étendus au cas des ensembles de réels reconnaissables par automate (en considérant des automates de Büchi). Une question importante était de déterminer dans quelle mesure le résultat de Muchnik pouvait être étendu dans ce cadre. Dans les articles [BC22; BC21; BC20] nous avons apporté une solution à cette question. Notre travail fournit une caractérisation de la définissabilité au premier ordre dans la théorie additive des réels, qui peut se re-formuler de manière effective pour une classe très générale de relations, en particulier pour les relations reconnaissables par automate. Une conséquence est la décidabilité de la question de savoir si une relation n -aire sur les réels qui est reconnaissable par automate est reconnaissable en toute base.
- **Décidabilité et composition de structures.** Les automates, et la composition de structures, sont deux outils puissants pour démontrer la décidabilité de théories logiques. J'avais montré (A.Bès, Definability and decidability results related to the elementary theory of ordinal multiplication, Fund.Math.171, 197-211, 2002) comment l'utilisation combinée de ces outils permettait de démontrer la décidabilité de théories sur les ordinaux comportant des prédictats de divisibilité. Plus récemment j'ai approfondi l'étude de la frontière de la décidabilité pour ces théories, ainsi que les questions de complexité associées [BC19].

Best of

Je souhaiterais mettre en avant l'article [BC22], qui montre en quoi des techniques très générales de définissabilité logique peuvent être appliquées à des problèmes de caractérisation effective de classes de langages formels.

Le futur

Je souhaite explorer plus avant les liens entre la définissabilité logique dans des théories arithmétiques "faibles" sur les réels et le traitement des réels par automate ou transducteur. Dans ce cadre je travaille actuellement sur le problème de la reconnaissance par transducteur de fonctions continues sur les réels.

- [BC22] Alexis BÈS et Christian CHOFRUT. ‘Decidability of Definability Issues in the Theory of Real Addition’. In : *Fundam. Informaticae* 188.1 (2022), pages 15-39.
- [BC21] Alexis BÈS et Christian CHOFRUT. ‘Theories of real addition with and without a predicate for integers’. In : *Log. Methods Comput. Sci.* 17.2 (2021).

- [BC20] Alexis BÈS et Christian CHOFRUT. ‘ $\langle \mathbb{R}, +, <, 1 \rangle$ Is Decidable in $\langle \mathbb{R}, +, <, \mathbb{Z} \rangle$ ’. In : *Language and Automata Theory and Applications - 14th International Conference, LATA 2020, Milan, Italy, March 4-6, 2020, Proceedings*. Sous la direction d’Alberto LEPORATI, Carlos MARTÍN-VIDE, Dana SHAPIRA et Claudio ZANDRON. Tome 12038. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2020, pages 128-140.
- [BC19] Alexis BÈS et Christian CHOFRUT. ‘Complexity and (Un)decidability of Fragments of $\langle \omega^{\omega^\lambda}; \times \rangle$ ’. In : *Fundam. Informaticae* 164.1 (2019), pages 1-15.

A.2 Patrick Cégielski

Activités

- Administration et animation de la recherche : responsable de l’équipe LCP jusqu’en décembre 2019.
- Vice-président de l’IUT de Sénart-Fontainebleau, en charge de la recherche, qui consiste à inciter au développement de la recherche : attribution d’aides financières aux enseignants-chercheurs (dans la limite de 35 000 euros), page web recensant les enseignants-chercheurs et leurs travaux, organisation d’une journée recherche annuelle avec rédaction d’un livret résumant les interventions, en ligne et diffusion papier à 1 000 exemplaires [Cég18], [Cég19], [Cég21].
- Président du comité permanent de la conférence annuelle internationale des JAF (*Journées sur les Arithmétiques Faibles*, l’intitulé anglais *Weak Arithmetics Days* n’ayant pas pris), faisant le point sur les recherches à la lisière de la Théorie des nombres, de la logique, de la philosophie et de l’informatique théorique, avec un seul proceedings sur cette période [Bla+20] : Villa Finaly à Florence en 2018 (organisateur), New York en 2019, Fontainebleau en 2020 (organisateur mais annulé au dernier moment à cause de la Covid), Athènes en 2021, Moscou en 2022 (mais annulé) et Samos (Grèce) en 2023.
- Co-encadrement de Mahadi Maifada Magoudani (avec Noé Wagener, professeur de Droit public à l’UPEC), en Droit du numérique, de la première promotion du master Droit du numérique qu’il a créé en 2016, de 2018 à 2023.
- Encadrement de deux mémoires par an du M2 du Droit du numérique

Thématisques

Dans cette période, André Arnold (Bordeaux), Irène Guessarian (Paris VI), Serge Grigorieff (Paris VII) et Patrick Cégielski ont surtout continué à s’intéresser au sujet intrigant des fonctions préservant les congruences (c’est-à-dire les relations d’équivalences compatibles avec les opérations d’une algèbre donnée), plus spécifiquement sur diverses algèbres d’arbres [ACG21], [Arn+21], [ACG22]. Julien Cervelle et Patrick Cégielski ont étudié la simulation pas à pas d’ASM (*Abstract State Machines* de Yuri Gurevich) [CC19]. On peut noter aussi la collaboration avec Donald Knuth pour la troisième traduction de l’un de ces livres [Pat20].

Best of

Bien entendu la production la plus importante est la tenue des JAF, qui en est à sa quarante-troisième édition, dirigées par Patrick Cégielski depuis qu’il les a créées en 1990 et qu’il a pu menées jusque là, mais il s’agit d’administration de la recherche. En recherche proprement dite, le plus prenant est l’étude des fonctions conservant les congruences.

Le futur

Patrick Cégielski continue à collaborer, d’une part, avec Irène Guessarian et Serge Grigorieff sur d’autres aspects des fonctions conservant les congruences et, d’autre part, avec Julien Cervelle et Pierre Valarcher sur des résultats de complexité des fonctions primitives récursives définies par des combinatoires.

- [ACG22] André ARNOLD, Patrick CÉGIELSKI et Irène GUESSARIAN. ‘Affine Completeness of Some Free Binary Algebras’. In : *Fundam. Informaticae* 186.1-4 (2022), pages 27-44.
- [Arn+21] André ARNOLD, Patrick CÉGIELSKI, Serge GRIGORIEFF et Irène GUESSARIAN. ‘The algebra of binary trees is affine complete’. In : *Discret. Math. Theor. Comput. Sci.* 23.2 (2021).
- [ACG21] André ARNOLD, Patrick CÉGIELSKI et Irène GUESSARIAN. ‘Affine completeness of some free binary algebras’. In : *CoRR* abs/2106.12846 (2021). arXiv : 2106.12846.
- [Cég21] Patrick CÉGIELSKI. In : *Livret de la recherche 2021 de l’IUT de Sénart-Fontainebleau*. 2021, page 16.

- [Bla+20] Andreas BLASS, Patrick CÉGIELSKI, Nachum DERSHOWITZ, Manfred DROSTE et Bernd FINKBEINER, éditeurs. *Fields of Logic and Computation III - Essays Dedicated to Yuri Gurevich on the Occasion of His 80th Birthday*. Tome 12180. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2020.
- [Pat20] Donald Knuth (traduction de PATRICK CÉGIELSKI). In : *Knuth par Knuth : conversations avec Dikran Karagueuzian*. CSLI Publications, Stanford, 2020, page 226.
- [Cég19] Patrick CÉGIELSKI. In : *Livret de la journée recherche 2019 de l'IUT de Sénart-Fontainebleau*. 2019, page 13.
- [CC19] Patrick CÉGIELSKI et Julien CERVELLE. ‘Study of Stepwise Simulation Between ASM’. In : *Computing with Foresight and Industry - 15th Conference on Computability in Europe, CiE 2019, Durham, UK, July 15-19, 2019, Proceedings*. Sous la direction de Florin MANEA, Barnaby MARTIN, Daniël PAULUSMA et Giuseppe PRIMIERO. Tome 11558. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2019, pages 156-167.
- [Cég18] Patrick CÉGIELSKI. In : *Livret de la journée recherche 2018 de l'IUT de Sénart-Fontainebleau*. 2018, page 16.

A.3 Julien Cervelle

Activités

- Administration et animation de la recherche : directeur LACL, comité scientifique de l'UFR *Faculté des sciences et technologie*
- Contribution à l'adossement d'enseignements innovants à la recherche : implication du LACL dans la SFRI Parfere portée par l'INSPE de Créteil
- Dissémination de la recherche : accueil d'un stagiaire de troisième, accueil de deux élèves de collège et lycée pour le dispositif *apprenti chercheur* de l'association *l'arbre de la connaissance*

Thématisques

Pendant la période évaluée, J'ai travaillé sur plusieurs éléments. D'une part les ASM et la notion de simulation stricte ([CC19]). Il s'agissait de voir si les définitions faibles de simulation ne permettent pas d'ajouter de l'information dans la simulation et de biaiser la calculabilité des éléments simulés. D'autre part, j'ai étudié la modélisation de la théorie des ensembles en B avec Frédéric Gervais ([CG23]). Le but était, dans le cadre d'une ANR, de considérer l'adéquation du Plugin Theory du langage Event-B avec l'implémentation de théories générales comme ZFC ou RCA₀ qui permet de ne pas se soucier de typage et ce qui peut être intéressant quand on souhaite coller au maximum à la théorie des ensembles. Enfin, j'ai commencé à m'intéresser aux reverses mathématiques suite au recrutement de trois doctorants, en co-encadrement avec Ludovic Patey. Ce travail a fourni la publication [CGP23].

Le futur

AU niveau du projet de recherche, je souhaite, une fois libéré d'un certain nombre de responsabilités administratives, poursuivre les problèmes démarrés et non résolus :

- Poursuivre l'étude du Theory Plugin et de théories fondatrices comme ZFC ou RCA₀
- Continuer l'étude de modèles de calculs à temps infini. Bien qu'il n'y ait pas eu de publication "valorisante", j'ai déjà présenté ces travaux dans des groupes de travail. Une ANR est également déposée sur ce sujet.
- Continuer de travailler sur les mathématiques à rebours. Je participe également à une ANR sur ce thème
- Reprendre différentes questions sur la décidabilité de fragment de logique à propos des diagrammes espace-temps des automates cellulaires additifs
- Et d'autre questions sur les automates de sable, les ASM et les constructions transfinies.

- [CGP23] Julien CERVELLE, William GAUDELIER et Ludovic PATEY. ‘The Reverse Mathematics of CAC for trees’. In : *The Journal of Symbolic Logic* (2023). 28 pages.

- [CG23] Julien CERVELLE et Frédéric GERVAIS. ‘Introducing Inductive Construction in B with the Theory Plugin’. In : *Rigorous State-Based Methods - 9th International Conference, ABZ 2023, Nancy, France, May 30 - June 2, 2023, Proceedings*. Sous la direction d’Uwe GLÄSSER, José Creissac CAMPOS, Dominique MÉRY et Philippe A. PALANQUE. Tome 14010. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2023, pages 43-58.
- [CC19] Patrick CÉGIELSKI et Julien CERVELLE. ‘Study of Stepwise Simulation Between ASM’. In : *Computing with Foresight and Industry - 15th Conference on Computability in Europe, CiE 2019, Durham, UK, July 15-19, 2019, Proceedings*. Sous la direction de Florin MANEA, Barnaby MARTIN, Daniël PAULUSMA et Giuseppe PRIMIERO. Tome 11558. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2019, pages 156-167.

A.4 Laura Fontanella

Activités

- Porteuse du projet ANR JCJC COCONTENS *Le contenu computationnel de la théorie des ensembles* 01/10/2022 - 30/09/2026
- Porteuse du projet DIM RFSI MDR *Les modèles de réalisabilité entre λ-calcul et théorie des ensembles* 01/10/2022-31/03/2024
- Co-encadrement de Ada Picano Nacci sous la direction de Julien Cervelle (UPEC, LACL) depuis le 13/10/2023
- Co-encadrement de Jacopo Furlan sous la direction de Damiano Mazza (Université Sorbonne Paris Nord, LIPN) depuis 01/10/2023
- Encadrement de stages de Master recherche (printemps 2023) : Ada Picano Nacci, Anita Moyassari et co-encadrement de Jacopo Furlan avec Giulio Manzonetto
- Organisation du Realizability workshop 2022, Fontainebleau 25-27 Octobre 2022, en collaboration avec Guillaume Geoffroy (Université Paris Cité, IRIF)
- Organisation de la Journée du GT Scalp 2021, Fontainebleau 3-5 Novembre 2021, en collaboration avec Luc Pellissier (UPEC, LACL), Alexis Saurin (IRIF, Université Paris Cité) , Damiano Mazza (Université Sorbonne Paris Nord, LIPN)
- Référente *Sciences avec et pour la société* depuis septembre 2023
- Divulgation :
 - article grand public avec Julien Cervelle et Luidnel Maignan, à paraître sur The Conversation France "Kurt Friedrich Gödel – Histoire incomplète de l'incomplétude"
 - participation à la *Nuit des chercheurs* 2024 de l'UPEC pour présenter le métier de chercheur en informatique
 - participation à la journée *Fille et Math/Info* (2023) pour présenter l'informatique auprès d'élèves de lycée
- Exposés invités (depuis mon recrutement à l'UPEC) :
 - Journée du GT Scalp 2023 Orléans 29/10/2023 titre : Realizability models for large cardinals
 - FILMAT meeting 2022, Pavia 28/09/2022 titre : The evolution of the proofs-as-programs paradigm through realizability
 - European Set Theory 2022, Torino 29/08/2022 titre : Realizability models for large cardinals
 - Greek summer school of logic (online) 28/06/2022 titre : The evolution of the concept of proof through realizability
 - Barcelona set theory seminars (online) 18/05/2022 titre : Representing ordinals in classical realizability

- séminaires de l'IRIF, Université Paris Cité, Paris 15/05/2022 titre : Representing ordinals in classical realizability, Paris 15/05/2022
- HaPoc, (online) 28/10/2021 titre : The evolution of the concept of proof through realizability
- WIL 2021 Women in Logic (online) 25/06/2021 titre : Realizing weak versions of Zorn's Lemma
- Séminaires de logique, Université Paris Cité (online) 24/03/2021 titre : Realizability models and the axiom of choice
- Models and Sets seminar series, University of Leeds, (online) 11/11/2020 titre : Realizability and the axiom of choice

Thématiques

Mes travaux de recherche se situent à l'interface entre théorie des ensembles, lambda-calcul, théorie de la démonstration et philosophie des mathématiques.

Réalisabilité et théorie des ensembles Inventée par Kleene en 1945, la réalisabilité étudie le contenu computationnel des preuves mathématiques. En réalisabilité on établit une correspondance entre formules et programmes de manière à respecter les règles de déduction logique. Dans ce sens la réalisabilité est une extension de la célèbre correspondance Curry-Howard qui établit un isomorphisme entre preuves en logique intuitionniste et les termes du λ -calcul simplement typé. Les travaux de T. Griffin sur la typabilité de *call/cc* ont permis d'étendre la correspondance preuves-programmes à la logique classique. Grâce aux travaux de J.L. Krivine, la réalisabilité a ultérieurement évolué jusqu'à étendre la correspondance preuves programmes, à toute preuve mathématiques qui se base sur les axiomes de la théorie des ensembles de Zermelo Fraenkel, ZF. La méthode de Krivine fournit une technique pour construire des modèles de réalisabilité de la théorie des ensembles et extraire le contenu computationnel de ZF. En ce qui concerne ces modèles, une question se démarque par son intérêt et sa difficulté : quelle serait l'interprétation calculatoire de l'axiome du choix, AC ? Krivine a donné un début de réponse en montrant que l'instruction 'quote' du langage LISP permet de réaliser l'axiome du choix dépendant, DC, qui correspond à une version dénombrable de AC. En collaboration avec Geoffroy [FG20] j'ai étendu cette méthode pour réaliser des versions plus-que-dénombrables de DC. Des travaux plus récents de Krivine montrent qu'il est bien possible de réaliser l'axiome du choix complet, bien qu'un réalisateur explicite n'ait pas encore été trouvé. La recherche actuelle en théorie des ensembles ne se limite pas aux axiomes de ZF ou ZFC, on accorde une grande importance également aux axiomes de grands cardinaux. Il s'agit d'axiomes très puissants qui affirme l'existence de cardinaux plus-que-dénombrables satisfaisant des propriétés diverses combinatoires, modèle-théoriques, catégoriques et d'autres. L'origine de ces axiomes typiquement vient de généralisations de théorèmes célèbres à des structures plus-que-dénombrables, tels que le théorème de Ramsey ou le Lemme de König. L'existence de tels cardinaux ne peut pas être démontrée dans ZF puisque ils impliquent l'existence d'ensembles modèles de ZF, cependant ils trouvent des applications diverses en mathématiques, par exemple la preuve du théorème de Fermat se base sur l'existence de cardinaux inaccessibles (un type de grand cardinal). En collaboration avec Guillaume Geoffroy et Richard Matthews j'ai montré que même les axiomes de grands cardinaux peuvent être réalisées par des termes du λ_C -calcul. Dans notre article pour CSL2024 [FGM24] nous avons construit des modèles de réalisabilité pour les cardinaux inaccessibles, les cardinaux Mahlo, les cardinaux mesurables et même pour les cardinaux de Reinhardt. Pour ce résultat nous nous sommes appuyés sur des re-formulations de ces grands cardinaux en théorie des ensembles intuitionniste.

Les fondements informatiques des mathématiques La correspondance preuves-programmes est née dans le cadre des mathématiques constructives, en effet la réalisabilité de Kleene visait à formaliser l'idée que toute preuve mathématique (légitime) devrait correspondre à un algorithme qui "témoigne" de l'énoncé démontré. Cependant nous avons vu qu'à travers la réalisabilité, il a été possible d'étendre la correspondance preuves-programmes d'abord à la logique classique, puis à la théorie des ensembles y compris l'axiome du choix et les axiomes de grands cardinaux. Cela représente une révolution conceptuelle puisque l'axiome du choix et les grands cardinaux constituent le paradigme des mathématiques constructives. Dans mon article [Fon], article invité pour FILMAT, je présente cette évolution de la correspondance preuves-programmes à travers

la réalisabilité dans ses aspects philosophiques fondationnels.

Best of : [FGM24] pour CSL2024

Le futur Je travaille actuellement sur plusieurs problèmes autour de la réalisabilité. Ma collaboration avec Richard Matthews (recrutés sous un contrat de postdoc de 18 mois financé par mon projet DIM RFSI MDR) a été extrêmement fructueuse : après l'article pour CSL, nous avons rédigé un autre article qui sera soumis bientôt pour publication sur journal et qui concerne la représentation des ordinaux dans les modèles de réalisabilité [FM]. En même temps je travaille avec mes doctorants sur deux grandes conjectures :

- Est-il possible de réaliser le principe de partition ? (projet avec Jacopo Furlan)
- Est-ce que les modèles de réalisabilités de ZF sont des modèles symétriques de la théorie des ensembles ? (projet avec Ada Picano Nacci)

Pour le premier projet on vise à réaliser le *principe de partition PP* qui est une version de l'axiome du choix dont on ne sait pas (et c'est un problème ouvert depuis 30 ans) s'il est équivalent à AC ou pas. Réaliser PP aboutirait à deux situations divergentes : soit dans un tel modèle AC est faux et dans ce cas on aurait montré que PP est plus faible que AC, soit dans le même modèle AC est réalisé et on trouve un réalisateur explicite de AC. Dans les deux cas, on aurait la solution à des problèmes ouverts depuis longtemps (nous avons une piste pour la première).

Concernant le deuxième projet, il s'agit de comprendre où se situent les modèles de réalisabilité par rapport au vaste univers des modèles de ZF. Nous conjecturons que tout modèle de réalisabilité pour ZF est en fait un *modèle symétrique*, un type de modèles de la théorie des ensembles qui généralise les modèles de forcing et qui présente plusieurs aspects communs avec les modèles de réalisabilité. Pour montrer cette conjecture il suffirait de réaliser un principe connu sous le nom de SVC (nous avons une piste pour ça).

[Fon]	Laura FONTANELLA. ‘The evolution of the proofs as programs interpretation through realizability’. In : <i>article invité à paraître dans les proceedings de FILMAT qui seront publiés par Springer</i> () .
[FM]	Laura FONTANELLA et Richard MATTHEWS. ‘Ordinals in realizability’. In : <i>article en préparation qui sera soumis pour publication sur journal</i> () .
[FGM24]	Laura FONTANELLA, Guillaume GEOFFROY et Richard MATTHEWS. ‘Realizability Models for Large Cardinals’. In : <i>32nd EACSL Annual Conference on Computer Science Logic, CSL 2024, February 19-23, 2024, Naples, Italy</i> . Sous la direction d’Aniello MURANO et Alexandra SILVA. Tome 288. LIPIcs. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2024, 28 :1-28 :18.
[FG20]	Laura FONTANELLA et Guillaume GEOFFROY. ‘Preserving cardinals and weak forms of Zorn’s lemma in realizability models’. In : <i>Math. Struct. Comput. Sci.</i> 30.9 (2020), pages 976-996.

A.5 Julien Grange

Activités

- Vulgarisation : présentation du métier de chercheur en informatique auprès d’élèves de lycée dans le cadre des éditions 2023 et 2024 des rencontres Déclics. Participation à la Nuit de Chercheurs de l’UPEC, édition 2024.
- Co-encadrement Fatemeh Ghasemi (avec Florent Madelaine du LACL et Mamadou Kanté de Clermont LIMOS) depuis septembre 2023.
- Co-organisateur de la Journée des Jeunes Chercheuses et Chercheurs de l’UPEC, édition 2023.

Thématiques

Ma recherche s’inscrit en théorie des modèles finis, et s’articule autour des axes suivants.

Logiques définies par invariance. Mes travaux de thèse ainsi que quelques résultats ultérieurs ([Gra20], [GS20] avec Luc Segoufin, [Gra21a], [Gra21b], [Gra23], [BG23] avec Bartosz Bednarczyk) ont pour objet d’étude diverses logiques définies par invariance, qui sont des extensions des logiques usuelles (typiquement, la logique du premier ordre et ses fragments) à l’aide d’une structure additionnelle (un ordre ou un successeur), à la condition que la validité des formules soit indépendante du choix de ces nouveaux prédictats. Cette notion trouve sa motivation à la fois en théorie des bases de données (où elle capture le principe d’indépendance des données) et en complexité descriptive (puisque le résultat d’un calcul doit être indépendant du choix de la représentation de l’entrée). Les résultats obtenus précisent le pouvoir d’expression et la complexité de certaines de ces logiques.

Jeux sur les data-words. Plus récemment, j'ai entamé une collaboration avec Mathieu Lehaut de l'Université de Göteborg sur le problème de synthèse sur les data-words. Il s'agit d'une généralisation du problème de synthèse sur les mots, dans un cadre où la taille de l'alphabet n'est pas connue à l'avance. Cela permet de modéliser des systèmes distribués, dont le nombre d'agents est non-borné. Cette collaboration a donné lieu à une première série de résultats ([GL23], présenté à LAMAS&SR 2023), ainsi qu'à un autre résultat positif dans le cadre d'une logique plus étendue, lui aussi en cours de soumission.

Outils pédagogiques pour l'apprentissage de la théorie de la complexité. En compagnie de Thomas Zeume, Nils Vortmeier et Fabien Velken de l'Université de Bochum, j'ai travaillé sur le développement d'un nouveau langage de spécification de réductions entre problèmes portant sur les graphes : les *cookbook reductions*. Ce formalisme de spécification présente le double avantage de proposer une prise en main facile par les étudiants découvrant la théorie de la complexité et d'avoir un problème de correction avec de bonnes propriétés de décidabilité. Une implémentation partielle a été mise en ligne à destination des étudiants², et les fondations théoriques sous-jacentes font l'objet d'un article en cours de soumission.

Le futur

Je co-encadre depuis septembre 2023 la thèse de doctorat de Fatemeh Ghasemi, en compagnie de Florent Madelaine du LACL et Mamadou Kanté du LIMOS à Clermont-Ferrand. Celle-ci porte sur la question du model-checking de la logique du premier ordre et ses extensions, notamment définies par invariance. Ce problème est difficile dans cas général, mais peut devenir *fixed-parameter tractable* quand on en restreint l'étude à certaines classes de graphes au comportement contrôlé, et nous espérons obtenir de nouveaux résultats dans ce sens.

Au sujet du problème de synthèse sur les data-words, il reste un fossé entre les résultats de décidabilité et d'indécidabilité que nous avons obtenus, qu'il serait satisfaisant de combler.

Enfin, l'étude des *cookbook reductions* soulève un certain nombre de questions théoriques intéressantes, dont certaines restent ouvertes ; nous avons pour projet de continuer à pousser dans cette direction. Par ailleurs, nous aimerais étendre ce langage de spécification de réductions au-delà des problèmes de graphes.

- [BG23] Bartosz BEDNARCZYK et Julien GRANGE. ‘About the Expressive Power and Complexity of Order-Invariance with Two Variables’. In : *CoRR* abs/2304.08410 (2023). arXiv : 2304.08410.
- [Gra23] Julien GRANGE. ‘Order-Invariance in the Two-Variable Fragment of First-Order Logic’. In : *31st EACSL Annual Conference on Computer Science Logic, CSL 2023, February 13-16, 2023, Warsaw, Poland*. Sous la direction de Bartek KLIN et Elaine PIMENTEL. Tome 252. LIPIcs. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2023, 23 :1-23 :19.
- [GL23] Julien GRANGE et Mathieu LEHAUT. ‘First order synthesis for data words revisited’. In : *CoRR* abs/2307.04499 (2023). arXiv : 2307.04499.
- [Gra21a] Julien GRANGE. ‘On the nonexistence of FO-continuous path and tree-decompositions’. In : *CoRR* abs/2106.04201 (2021). arXiv : 2106.04201.
- [Gra21b] Julien GRANGE. ‘Successor-Invariant First-Order Logic on Classes of Bounded Degree’. In : *Log. Methods Comput. Sci.* 17.3 (2021).
- [Gra20] Julien GRANGE. ‘On the Expressive Power of Invariant Logics over Sparse Classes of Structures. (Sur le pouvoir d'expression des logiques définies par invariance)’. Thèse de doctorat. École Normale Supérieure, Paris, France, 2020.
- [GS20] Julien GRANGE et Luc SEGOUFIN. ‘Order-Invariant First-Order Logic over Hollow Trees’. In : *28th EACSL Annual Conference on Computer Science Logic, CSL 2020, January 13-16, 2020, Barcelona, Spain*. Sous la direction de Maribel FERNÁNDEZ et Anca MUSCHOLL. Tome 152. LIPIcs. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2020, 23 :1-23 :16.

A.6 Florent Madelaine

Activités

- Administration et animation de la recherche : responsable de l'équipe LCP depuis 2020.
- expertise technique pour des projets (2021 et 2024 Académie des sciences autrichienne)

²<https://iltis.cs.tu-dortmund.de/computational-reductions/>

- Vulgarisation : intervention auprès de lycéens dans le cadre des cordées de la réussite
- Co-encadrement Alexey Barsukov (avec Mamadou Kanté de Clermont LIMOS) de 2018 à 2023. Maintenant Postdoc à Prague dans l'équipe de Libor Barto.
- Co-encadrement Fatemeh Ghasemi (avec Julien Grange du LACL et Mamadou Kanté de Clermont LIMOS) depuis septembre 2023.
- Encadrement de plusieurs mémoires de M2 du Droit du numérique dont Trang Anh MAC en 2022 (*Biais et discrimination dans les systèmes de prise de et d'aide à la décision administrative alimentés par machine learning*) et Aïssatou Touré en 2023 (*Les biais discriminatoires dans les algorithmes de contrôle de la caf*).
- Relecture pour divers conférences (2019 IJCAI, 2020 CiE, 2020 CSL, 2021 ESA, 2023 LICS).
- porteur du projet ANR Difference pour le pôle Créteil (porteur principal Olivier Bournez, LIX).
- cours invité à Unilog en 2018.

Thématisques

À l'interface entre trois domaines, la complexité, la théorie des modèles et la combinatoire, mes contributions principales concernent les problèmes de satisfaction de contraintes (CSP), en particulier leurs extensions quantifiées (QCSP). Le plus souvent ceci implique d'utiliser de mettre en place des outils d'algèbre universelle pour favoriser le travail de classification.

Complexité et CSP quantifiés. Depuis que Zhuk et Bulatov ont démontré indépendamment la conjecture de la dichotomie de Feder et Vardi en 2017, on sait que les problèmes CSPs sont soient faciles à résoudre (dans P) soit difficiles (NP-complet).

Mes productions sur la période de référence concernent des résultats similaires de tétrachotomie pour une extension de QCSP avec disjonction [MM18b] et une analyse de la limite entre NP et Pspace-complet pour les QCSP [Car+23]. Dans les deux cas, on peut interpréter les résultats en terme de stratégies et de jeux qui correspondent dans le premier cas à une élimination brutale d'un ou des deux types de quantificateurs et dans l'autre à une limitation très forte de la stratégie du joueur universel.

Je me suis aussi penché sur cette période sur des extensions quantifiées de CSP [MM18a] et sur une version valuée de QCSP, qu'on peut interpréter comme un problème d'optimisation, pour lequel nous obtenons un analogue du théorème de Shaeffer, à savoir une classification de la complexité dans le cas d'un domaine booléen [MS18].

Complexité descriptive et CSP infinis Un autre sujet connexe concerne l'étude de la complexité descriptive des CSPs et d'un fragment de MSO introduit par Feder et Vardi (MMSNP) et de ces extensions. Cette logique correspond en fait à des CSPs dont le domaine est infini, un domaine ouvert par Manuel Bodirsky depuis une vingtaine d'années qui étend très largement le spectre des problèmes naturel étudiés par rapport au cas fini et nécessite d'adapter les outils algébriques mais permet d'utiliser de nouveaux outils de théorie des modèles, de topologie et de combinatoire.

Il existe une conjecture de la dichotomie pour ces CSPs de domaines infinis qui étend le cas fini et stipule la dichotomie en termes algébrique autant qu'en terme de complexité.

Cette conjecture est encore ouverte mais l'article [BMM21], version longue de [BMM18], revisite la dichotomie de complexité de la logique MMSNP en montrant également la version algébrique. C'est l'aboutissement de questionnements que nous avions avec Manuel Bodirsky depuis notre première rencontre en 2001.

J'ai co-encadré Alexey Barsukov avec Mamadou Kanté de Clermont Ferrand. Alexey a soutenu sa thèse fin 2022 et nous avons tenté d'étendre ce résultat à plusieurs extension de MMSNP. Nous avons obtenu des résultats partiels et ce dernier continue de travailler à la question comme postdoc à Prague dans l'équipe de Libor Barto sur un projet ERC coporté par Manuel Bodirsky³. Nous avons un article ensemble [BM23].

Finalement, j'ai [Bea+19] un article sur des aspects BdDs et graphes avec des collègues de Clermont et Caen (mes laboratoires avant mon arrivée au LACL).

Best of

Mon cœur balance entre [Car+23] et [BMM21]. Je dirais le premier car c'est un travail auquel j'ai participé plus activement.

Le futur

Je continue à collaborer avec Alexey comme expliqué ci-dessus.

³Voir <https://pocop.eu/>

Je co-encadre une doctorante Fatemeh Ghasemi depuis septembre 2023 avec Mamadou Kanté et Julien Grange sur des problématiques toujours en lien avec la logique et la complexité mais plus éloigné des mes sujets précédents avec des aspects combinatoires importants. Il s'agit plus spécifiquement de model checking de FO sur des classes de graphes qui ne sont pas tous les graphes de sorte qu'on puisse espérer des propriétés algorithmiques intéressantes.

Je revisite l'extension de QCSP avec disjonction de [MM18b] dans un cadre différent, soit sur des domaines infini, soit dans un cadre analogue aux *promise CSP* (une façon de faire de l'approximation pour les CSPs).

Sur des aspects vraiment différent qui ne sont pas encore tout à fait de la recherche dans laquelle je me vois produire tout de suite, je m'intéresse par le biais de mes interventions dans des masters avec une mineure en informatique (en droit et Sciences Politiques), aux interactions entre informatique et sciences humaines.

- [BM23] Alexey BARSUKOV et Florent R. MADELAINE. ‘On Guarded Extensions of MMSNP’. In : *Unity of Logic and Computation - 19th Conference on Computability in Europe, CiE 2023, Batumi, Georgia, July 24-28, 2023, Proceedings*. Sous la direction de Gianluca Della VEDOVA, Besik DUNDUA, Steffen LEMPP et Florin MANEA. Tome 13967. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2023, pages 202-213.
- [Car+23] Catarina CARVALHO, Florent R. MADELAINE, Barnaby MARTIN et Dmitriy ZHUK. ‘The Complexity of Quantified Constraints : Collapsibility, Switchability, and the Algebraic Formulation’. In : *ACM Trans. Comput. Log.* 24.1 (2023), 5 :1-5 :26.
- [BMM21] Manuel BODIRSKY, Florent R. MADELAINE et Antoine MOTTET. ‘A Proof of the Algebraic Tractability Conjecture for Monotone Monadic SNP’. In : *SIAM J. Comput.* 50.4 (2021), pages 1359-1409.
- [Bea+19] Laurent BEAUDOU, Florent FOUCAUD, Florent R. MADELAINE, Lhouari NOURINE et Gaétan RICHARD. ‘Complexity of Conjunctive Regular Path Query Homomorphisms’. In : *Computing with Foresight and Industry - 15th Conference on Computability in Europe, CiE 2019, Durham, UK, July 15-19, 2019, Proceedings*. Sous la direction de Florin MANEA, Barnaby MARTIN, Daniël PAULUSMA et Giuseppe PRIMERO. Tome 11558. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2019, pages 108-119.
- [BMM18] Manuel BODIRSKY, Florent R. MADELAINE et Antoine MOTTET. ‘A universal-algebraic proof of the complexity dichotomy for Monotone Monadic SNP’. In : *Proceedings of the 33rd Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science, LICS 2018, Oxford, UK, July 09-12, 2018*. Sous la direction d’Anuj DAWAR et Erich GRÄDEL. ACM, 2018, pages 105-114.
- [MM18a] Florent R. MADELAINE et Barnaby MARTIN. ‘Consistency for Counting Quantifiers’. In : *43rd International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science, MFCS 2018, August 27-31, 2018, Liverpool, UK*. Sous la direction d’Igor POTAPOV, Paul G. SPIRAKIS et James WORRELL. Tome 117. LIPIcs. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2018, 11 :1-11 :13.
- [MM18b] Florent R. MADELAINE et Barnaby MARTIN. ‘On the Complexity of the Model Checking Problem’. In : *SIAM J. Comput.* 47.3 (2018), pages 769-797.
- [MS18] Florent R. MADELAINE et Stéphane SECOURD. ‘Quantified Valued Constraint Satisfaction Problem’. In : *Principles and Practice of Constraint Programming - 24th International Conference, CP 2018, Lille, France, August 27-31, 2018, Proceedings*. Sous la direction de John N. HOOKER. Tome 11008. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2018, pages 295-311.

A.7 Luidnel Maignan

Activités

- Membre du conseil de gestion de la FST de Déc 2017 à Juil 2018 et de Juil 2019 à Aout 2022
- Membre du comité scientifique de la FST depuis Sep 2022
- Membre du comité de thèse d’Amelia Durbec à Aix-Marseille
- Co-encadrement Tien Thao NGuyen (avec Pierre Valarcher du LACL) de 2017 à 2021.
- Co-encadrement Alexandre Fernandez (avec Antoine Spicher et Pierre Valarcher du LACL) de 2018 à 2022.
- Membre de PC de CANDAR 2019
- Relecture pour divers conférences et journaux ((chercher dans mail @lacl.fr pour 2018), CANDAR 2019, Fundamenta Informaticae 2019, JCA 2019, CANDAR 2021, TCS 2024, LICS 2024 (il en manque ...)).

- Porteur du projet DIM RFSI “Theory and Practice of Global Transformation”.
- cours invité au Japon (c'était quand?)
- Délégation INRIA au sein de l'équipe d'informatique quantique QUACS (LMF, Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay) de 2021 à 2023.

Thématiques

Les domaines de l'informatique, de la physique et des mathématiques entretiennent des liens étroits depuis leurs naissances respectives pour des raisons d'abord évidentes puis plus subtiles. Parmi les rapports évidents, on peut par exemple citer que la physique est modélisée par des moyens mathématiques (e.g. calcul différentiel), que les mathématiques sont calculées par des moyens informatiques (e.g. logiciel de calcul formel), et que l'informatique est conçue, au niveau technologique, par des moyens physiques (e.g. électronique). Ce sont les rapports plus subtils qui sont les plus intéressants. On peut citer le rapport entre entropie au sens physique et entropie au sens de la théorie de l'information ainsi que celui entre théorie des types et logique mathématique (isomorphisme de Curry-Howard-Lambek). Mes travaux de recherche ont pour socle commun ce triangle interdisciplinaire. Les rapports qui vont d'abord nous intéresser sont ceux liant les concepts d'informatique répartie/distribuée, en particulier représentés par les automates cellulaires et leurs généralisations, à des considérations physiques (e.g. champs, relativité restreinte ou générale) et mathématiques (systèmes dynamiques, topologie, théorie des catégories). Mes publications s'organisent globalement autour de deux thèmes, que je choisis ici de présenter en partant des automates cellulaires, bien que les influences soient en réalité plus nombreuses.

Les automates cellulaires forment un modèle de calcul dans lequel un espace discret et régulier (un graphe de Cayley généralement infini) de « cellules », toutes identiques et indiscernables, voit l'état de chaque cellule évoluer de façon discrète et synchrone en fonction des états de ses cellules voisines immédiates, le nombre de ces voisines et le nombre d'états étant finis. D'un point de vue conceptuel, ce modèle est de nature physique. C'est d'ailleurs par ce modèle que Robin Gandy, élève et associé d'Alan Turing, montra que la thèse de (Church-)Turing devenait un théorème sur la base de certaines hypothèses physiques. En effet, ce modèle incarne les contraintes d'homogénéité dans l'espace et dans le temps des lois de la physique, ainsi que l'existence d'une vitesse maximale et d'une densité maximale de l'information. Au niveau mathématique, ce modèle de système dynamique voit sa nature locale capturée très directement en terme topologique (topologie produit des topologies discrètes des états de chaque cellule) et sa nature homogène capturée très simplement par la contrainte d'équivariance par décalage spatial. Le théorème pilier d'Hedlund indique que tout système dynamique respectant ces deux contraintes est un automate cellulaire. Les automates cellulaires (et leurs généralisations) ont donc l'avantage d'exemplifier d'un coup tout le triangle interdisciplinaire.

Des automates cellulaires aux champs cellulaires. La conception d'automates cellulaires implique généralement de réussir à faire émerger les propriétés globales désirées au travers d'interactions locales appropriées, avec toutes les difficultés liées aux phénomènes de complexification (au sens des systèmes complexes) et de non-linéarité (au sens des systèmes dynamiques) qui en découlent. Les champs cellulaires, que j'ai introduit durant ma thèse avec Frédéric Gruau et développés ensuite avec Jean-Baptiste Yunès puis Tien Thao Nguyen, formalisent une approche de modularisation inspirée par les formalismes physiques. Au lieu de considérer le travail de chaque cellule sur toutes les données et l'interaction entre les cellules, on considère la sémantique de chaque donnée répartie sur toutes les cellules et l'interaction entre les données. Chaque donnée devient alors un « champ » (au même sens que les champs magnétique, électrique, gravitationnel, etc.), le système total étant la somme de tous les champs et de leurs interactions. L'intérêt de cette formalisation ne devient complet que lorsque l'on oublie le système total et que l'on se concentre sur un champ cellulaire indépendamment de son utilisation. Bien que l'automate cellulaire complet soit un système clos, chaque champ correspond bel et bien à un système ouvert, en interaction « partout/tout le temps » avec un certain nombre de champs considérés comme des entrées non spécifiées et fournissant tout ou partie de ses informations comme sortie. Avec suffisamment de champs aux sémantiques claires, la conception d'un automate cellulaire devient alors compositionnelle, de la même façon que la conception d'un programme se fait par composition d'un ensemble de fonctions ou de modules. Il est bon de noter que de telles approches sont déjà suivies intuitivement par beaucoup de travaux, mais sans formalisme pour soutenir la réflexion. Rendre explicite la réflexion formellement s'avère utile pour faire des preuves validant la réflexion elle-même, la preuve du système résultant n'étant alors qu'une simple « réduction ». Il est donc avantageux d'utiliser cette approche non seulement pour résoudre de nouveaux problèmes (homogénéisation de particules vs load-balancing, graphe de Gabriel par géodésique, diverses nouvelles synchronisations par (une autre) analyse de géodésique [MY18], optimisation de la génération de séquence n3 par « réduction » [NM22], etc) mais aussi pour revisiter des problèmes

classiques de façon plus compositionnelle, avec une factorisation de toutes les preuves de corrections. Ce dernier point est fortement lié à l'optimisation d'automates cellulaires où il s'agit de transformer les règles en conservant le calcul réalisé (enveloppe convexe, synchronisation classique (FSSP) et autres [NM18 ; NM20a ; NM20b ; GM18]). Une autre retombée est la mise en lumière d'un lien entre description discrète et continue de système [CV37].

Des automates cellulaires aux transformations globales. Le modèle des automates cellulaires séduit par sa simplicité et sa richesse. Il est toutefois nécessaire de le dépasser pour aller vers des structures spatiales plus libre et pouvant également évoluer sous la dynamique du système. Le formalisme des « transformations globales », initié par Antoine Spicher et moi-même puis rejoints par Alexandre Fernandez, utilise le vocabulaire des catégories pour décrire les relations locales/globales qui forment le cœur des automates cellulaires, sans dépendance avec un type d'espace particulier. En effet, au lieu de spécifier une structure spatiale d'un côté et les valeurs locales décrivant cet espace d'un autre, ce formalisme manipule directement les configurations (espace et valeur en une unité indivisible), leur permettant ainsi d'évoluer entièrement en valeurs, en forme, en taille, en structure, etc., sans la moindre restriction. La notion de localité est récupérée en explicitant celle de sous-configuration, non pas sous la forme d'un ordre partiel mais sous la forme d'une catégorie. En fait, de la même façon que le théorème d'Hedlund démontre que la localité des automates cellulaires est capturée par une certaine topologie et la continuité qui en découle, on peut montrer qu'elle l'est aussi par un certain ordre partiel et la monotonie qui en découle. Passer d'ordre partiel/monotonie à catégorie/fonctorialité (monotonie généralisée) est ce qui permet de se détacher complètement des contraintes spatiales tout en conservant la localité. On peut aussi noter que, là où le théorème d'Hedlund précise l'homogénéité spatiale par une contrainte en dehors de la topologie (l'équivariance), ce point de vue catégorique l'intègre puisqu'il ne nécessite aucune notion de position globale. C'est le positionnement relatif qui est transporté à travers la dynamique par fonctorialité, ce dernier impliquant le respect de la façon dont les sous-configurations s'intersectent. On remplace donc le point de vue « système dynamique topologique » par « système dynamique monotone » puis « système dynamique catégorique » pour un traitement général des systèmes dynamiques spatialisés. Pour compléter notre triangle interdisciplinaire, il faut remarquer que la généralité acquise permet de s'attaquer de façon plus fidèle à des phénomènes physiques liés à la relativité générale, ou biologiques liés à la morphogénèse, ou encore informatiques liés aux réseaux d'ordinateurs sous forme réelle, cloud, téléphonique ou autre. Du coté mathématique, on peut noter, pour le lecteur initié, les liens avec les notions de faisceaux et de topos, cadre catégorique généralisé pour la logique, la géométrie et la topologie. Pour le lecteur initié aux notions de réécriture de graphe, on note également qu'il s'agit ici d'un formalisme permettant une synchronicité accrue de l'application des règles, avec une notion d'accord mutuel. Ce dernier permet d'assurer qu'il est toujours possible d'appliquer toutes les règles, contrairement au cadre classique de réécriture de graphe. Ce formalisme prometteur demande encore beaucoup de travail. Pour le moment il a été introduit de façon pédagogique sur des systèmes classiques (transformation de graphe simpliciaux ou de complexe cellulaire abstrait, système de Lindenmayer [FMS19], automates cellulaires sans position [FMS21b ; FMS23]) et une plateforme logicielle est en cours de développement [FMS21a], ainsi qu'un ensemble de développements formels en cours de rédaction et de publication [FMS21c]. Un développement récent est la publication à MFCS'22 de l'intégration au niveau catégorique du non-déterminisme de façon abstraite et général, mais aussi sur l'exemple concret des systèmes de Lindenmayer non-déterminisme [FMS22].

Le futur

En plus de la poursuite naturelle des travaux évoquées précédemment, de nouvelles thématiques viendront certainement s'ajouter à mon activité. Tout d'abord, l'intégration des aspects quantiques dans mes travaux est un travail en cours, entamée dans le cadre des deux années de délégations INRIA réalisées au sein d'une équipe d'informatique de 2021 à 2023. De même, de nouvelles collaborations ont vu le jour, en particulier avec Pablo Arrighi et son doctorant Marin Costes. Mon intérêt constant pour fondement des mathématiques, la logique et les correspondances de Curry-Howard-Lambek trouve également maintenant un renouveau de part mes interactions avec Laura Fontanella et Luc Pellisier, de même que mon expertise grandissante en théorie des topos de part mes travaux sur les transformations globales.

- [FMS23] Alexandre FERNANDEZ, Luidnel MAIGNAN et Antoine SPICHER. ‘Cellular automata and Kan extensions’. In : *Nat. Comput.* 22.3 (2023), pages 493-507.
- [FMS22] Alexandre FERNANDEZ, Luidnel MAIGNAN et Antoine SPICHER. ‘Non-Determinism in Lindenmayer Systems and Global Transformations’. In : *47th International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science, MFCS 2022, August 22-26, 2022, Vienna, Austria*. Sous la direction de Stefan SZEIDER, Robert GANIAN et Alexandra SILVA. Tome 241. LIPIcs. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2022, 49 :1-49 :13.

- [NM22] Tien Thao NGUYEN et Luidnel MAIGNAN. ‘Millions of 5-State n^3 -Real Time Sequence Generators via Local Simulations’. In : *Cellular Automata - 15th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, ACRI 2022, Geneva, Switzerland, September 12-15, 2022, Proceedings*. Sous la direction de Bastien CHOPARD, Stefania BANDINI, Alberto DENNUNZIO et Mira Arabi HADDAD. Tome 13402. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2022, pages 83-93.
- [FMS21a] Alexandre FERNANDEZ, Luidnel MAIGNAN et Antoine SPICHER. ‘Accretive Computation of Global Transformations’. In : *Relational and Algebraic Methods in Computer Science - 19th International Conference, RAMiCS 2021, Marseille, France, November 2-5, 2021, Proceedings*. Sous la direction d’Uli FAHRENBERG, Mai GEHRKE, Luigi SANTOCANALE et Michael WINTER. Tome 13027. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2021, pages 159-175.
- [FMS21b] Alexandre FERNANDEZ, Luidnel MAIGNAN et Antoine SPICHER. ‘Cellular Automata and Kan Extensions’. In : *27th IFIP WG 1.5 International Workshop on Cellular Automata and Discrete Complex Systems, AUTOMATA 2021, July 12-14, 2021, Aix-Marseille University, France*. Sous la direction d’Alonso CASTILLO-RAMIREZ, Pierre GUILLON et Kévin PERROT. Tome 90. OASIcs. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2021, 7 :1-7 :12.
- [FMS21c] Alexandre FERNANDEZ, Luidnel MAIGNAN et Antoine SPICHER. *The Bicategory of Open Functors*. 2021. arXiv : 2102.08051 [math.CT].
- [NM20a] Tien Thao NGUYEN et Luidnel MAIGNAN. ‘Exploring Millions of 6-State FSSP Solutions : The Formal Notion of Local CA Simulation’. In : *Cellular Automata and Discrete Complex Systems - 26th IFIP WG 1.5 International Workshop, AUTOMATA 2020, Stockholm, Sweden, August 10-12, 2020, Proceedings*. Sous la direction d’Hector ZENIL. Tome 12286. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2020, pages 1-13.
- [NM20b] Tien Thao NGUYEN et Luidnel MAIGNAN. ‘Some Cellular Fields Interrelations and Optimizations in FSSP Solutions’. In : *J. Cell. Autom.* 15.1-2 (2020), pages 131-146.
- [FMS19] Alexandre FERNANDEZ, Luidnel MAIGNAN et Antoine SPICHER. ‘Lindenmayer Systems and Global Transformations’. In : *Unconventional Computation and Natural Computation - 18th International Conference, UCNC 2019, Tokyo, Japan, June 3-7, 2019, Proceedings*. Sous la direction d’Ian MCQUILLAN et Shinnosuke SEKI. Tome 11493. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2019, pages 65-78.
- [GM18] Frédéric GRUAU et Luidnel MAIGNAN. ‘Spatial Types : A Scheme for Specifying Complex Cellular Automata to Explore Artificial Physics’. In : *Theory and Practice of Natural Computing - 7th International Conference, TPNC 2018, Dublin, Ireland, December 12-14, 2018, Proceedings*. Sous la direction de David FAGAN, Carlos MARTÍN-VIDE, Michael O’NEILL et Miguel A. VEGA-RODRÍGUEZ. Tome 11324. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2018, pages 61-73.
- [MY18] Luidnel MAIGNAN et Jean-Baptiste YUNÈS. ‘Generalized FSSP on Two Triangular Tilings’. In : *Sixth International Symposium on Computing and Networking, CANDAR Workshops 2018, Takayama, Japan, November 27-30, 2018*. IEEE Computer Society, 2018, pages 27-31.
- [NM18] Tien Thao NGUYEN et Luidnel MAIGNAN. ‘Firsts Steps in Cellular Fields Optimization : A FSSP Case Study’. In : *Cellular Automata - 13th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, ACRI 2018, Como, Italy, September 17-21, 2018, Proceedings*. Sous la direction de Giancarlo MAURI, Samira El YACOUBI, Alberto DENNUNZIO, Katsuhiro NISHINARI et Luca MANZONI. Tome 11115. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2018, pages 264-273.

A.8 Benoit Monin

Résumé

- Encadrement de la thèse de Paul-Elliot Angles d’Auriac *Infinite computation in algorithmic randomness and reverse mathematics*, soutenue le 22/11/2019
- Organisation d’un colloque au CIRM dans la série *Research in Pairs* “The computational content of the theory of Borel equivalence relations” 24/02/2019 - 06/03/2019 N. Bazhenov, L. San Mauro, B. Monin, R. Zamora

- Soutenance HdR en 2021 intitulée *Mathias Forcing and the Ramsey theorem for pairs*.
- Rédaction d'un livre de calculabilité, co-écrit avec Ludovic Patey (chargé de recherche CNRS) *Calculabilité* aux éditions Calvage et Mounet (2022)
- Quitte l'université en novembre 2021 (disponibilité, travail en entreprise).
- Co-encadrement de William Gauthier avec Julien Cervelle et Ludovic Patey

Communications dans des colloques

1. Colloque *Computability, Complexity and Randomness* 17/12/2018 - 21/12/2018, Santiago
Exposé : Genericity and randomness with ITTM
2. Colloque *Higher Recursion Theory and Set Theory* 20/05/2019 - 14/06/2019 - Singapour.
Exposé : SRT₂² vs RT₂² in ω -models
3. Conférence *LICS* 09/07/2018 - 12/07/2018, Oxford.
Exposé : The Gamma question
4. Conférence *Computability in europe* 14/07/2019 - 20/07/2019, Duhram.
Exposé : Lowness of the pigeonhole principle
5. Colloque *Reverse Mathematics of Combinatorial Principles* 15/09/2019 - 20/09/2019 - Oaxaca.
Exposé : Lowness of the pigeonhole principle
Vidéo : <https://www.birs.ca/events/2019/5-day-workshops/19w5111/videos/watch/201909171630-Monin.html>
6. Colloque *Journées calculabilités* 25/11/2019 - 29/11/2019 - Florence.
Exposé : Lowness of the pigeonhole principle
7. Conférence *ASL Annual meeting* 25/03/2020 - 28/03/2020, Irvine.
Conférencier invité, Annulé pour cause de Covid
8. Conférence *Logic Colloquium* Août 2020, Poznan.
Conférencier invité, Reporté en 2021 pour cause de Covid
9. Conférence *Midwest Computability Seminar* Septembre 2021, Online.
Exposé : The computational content of Milliken's tree theorem

Thématisques

Mes recherches portent sur la **calculabilité**, une branche de la logique qui étudie les objets mathématiques sous le prisme de leur complexité calculatoire, c'est-à-dire de la manière dont ils se comportent vis-à-vis de la capacité de calcul théorique des ordinateurs. La calculabilité a connu des succès majeurs en servant de fondement mathématique à l'étude de certaines questions à saveur philosophique, notamment *théorie algorithmique de l'aléatoire* et les *mathématiques à rebours*. Nos recherches portent sur ces deux thèmes, ainsi que sur les calculabilités d'ordre supérieurs.

Après presque dix ans à travailler dans ces domaines, j'ai voulu écrire un livre de recherche [MP22] afin d'en expliquer les détails et certains aspects fascinants que renferment ces sujets. J'ai choisi de le rédiger en Français, car il n'existe aucun ouvrage dans cette langue sur ces sujets, et avec l'aide précieuse de Ludovic Patey, chargé de recherche CNRS, et spécialiste mondial de la calculabilité et des mathématiques à rebours.

Faisons à présent un bref tour d'horizon des différents thèmes de recherche sur lesquels j'ai travaillé ces dernières années.

Mathématiques à rebours

Les mathématiques à rebours sont un programme de logique mathématique visant à déterminer quels axiomes sont nécessaires pour prouver des théorèmes mathématiques. La méthode peut être succinctement décrite comme “*Aller à rebours, des théorèmes vers les axiomes*”, contrastant avec la pratique ordinaire des mathématiques, consistant à dériver les théorèmes des axiomes. La recherche dans ce domaine a établi que des sous-systèmes faibles de l'arithmétique du second ordre sont suffisants pour formaliser presque toutes les mathématiques de Licence.

Simpson exhibe 5 systèmes axiomatiques linéairement ordonnés par l'implication, auxquels la plupart des théorèmes mathématiques s'avèrent être équivalents relativement à RCA_0 (essentiellement, le système axiomatique correspondant aux mathématiques calculables). Le théorème de Ramsey est une exception notable et mes travaux sur le sujet explorent en particulier les mathématiques à rebours en dehors de ces cinq systèmes [MP21a ; MP21b ; MP19b ; MP19a ; LMP19].

Mon travail de recherche sur le théorème de Ramsey, mené conjointement avec Ludovic Patey, a abouti à la résolution par l'affirmative d'un vieux problème du domaine, devenu ces dernières années un de ses sujets de recherche les plus actifs : “Est-ce que le théorème de Ramsey pour les pairs est strictement plus fort que sa version stable dans les ω -models?” [MP21a]. C'est sur ce sujet que j'ai soutenu mon HdR en 2021.

Plusieurs conférences ont été organisées sur cette question, et une importante bourse américaine (FRG : Collaborative Research : Computability Theoretic Aspects of Combinatorics, <https://www.computability.org/ccfrg/>) a été conjointement obtenue en 2019 par les universités de Chicago, Connecticut, Berkeley, Notre-Dame et Penn-State, avec comme un des objectifs principaux de résoudre cette question.

Théorie algorithmique de l'aléatoire

Le but de cette théorie est de donner un sens à l'idée intuitive d'objet aléatoire. Ainsi utilise-t-on les outils de calculabilité pour donner une définition formelle de ce qu'est une suite infinie de bits aléatoires, qui rejointe l'intuition sur ce que l'on s'attend à obtenir en tirant à pile ou face indéfiniment.

J'ai publié un article sur ce sujet [Gre+18], ainsi que trois autres sur les connections entre l'aléatoire algorithmique et la calculabilité d'ordre supérieur [BGM21 ; MA19 ; Bie+18]. J'ai également dressé un état de l'art de ces connections dans un chapitre de livre consacré à l'aléatoire algorithmique [FP20].

Calculabilité

J'ai aussi publié deux articles en lien avec une question de calculabilité pure sur les degrés Turing [MN21 ; Mon18], en montrant que les ensembles d'entiers se partitionnent en trois groupes :

1. Les ensembles calculables.
2. Les ensembles qui ne peuvent calculer (en tant qu'oracle) que des ensembles X , qui sont soit calculables, soit pour lesquels il existe un algorithme qui trouve quel entier est dans X avec une chance sur deux, mais jamais plus qu'une chance sur deux.
3. Les ensembles qui peuvent calculer (en tant qu'oracle) un ensemble X dont on ne peut, algorithmiquement, rien connaître : Un algorithme qui essaye de trouver quel entier est dans X se trompera “presque tout le temps”.

J'ai finalement publié un article de vulgarisation [Mon22] sur le théorème de Gödel dans la revue Interstices : “L'informatique au cœur des limites de l'esprit”.

- [Mon22] Benoit MONIN. ‘L'informatique au cœur des limites de l'esprit’. In : *Interstices* (2022).
- [MP22] Benoit MONIN et Ludovic PATEY. *Calculabilité : Degrés Turing, Théorie Algorithmique de l'aléatoire, Mathématiques à Rebours*. Calvage et Mounet, 2022.
- [BGM21] Laurent BIENVENU, Noam GREENBERG et Benoit MONIN. ‘Bad oracles in higher computability and randomness’. In : *Israel Journal of Mathematics* 241 (2021), pages 229-276.
- [MN21] Benoit MONIN et André NIES. ‘Muchnik degrees and cardinal characteristics’. In : *The Journal of Symbolic Logic* 86.2 (2021), pages 471-498.
- [MP21a] Benoit MONIN et Ludovic PATEY. ‘SRT22 does not imply RT22 in ω -models’. In : *Advances in Mathematics* 389 (2021), page 107903.

- [MP21b] Benoit MONIN et Ludovic PATEY. ‘The weakness of the pigeonhole principle under hyperarithmetical reductions’. In : *Journal of Mathematical Logic* 21.03 (2021), page 2150013.
- [FP20] Johanna NY FRANKLIN et Christopher P PORTER. ‘Algorithmic Randomness : Progress and Prospects’. In : (2020).
- [LMP19] Lu LIU, Benoit MONIN et Ludovic PATEY. ‘A computable analysis of variable words theorems’. In : *Proceedings of the American Mathematical Society* 147.2 (2019), pages 823-834.
- [MA19] Benoit MONIN et Paul-Elliot d’Auriac ANGLES. ‘Genericity and randomness with ITTMs’. In : *The Journal of Symbolic Logic* 84.4 (2019), pages 1670-1710.
- [MP19a] Benoit MONIN et Ludovic PATEY. ‘ Π_1 -encodability and omniscient reductions’. In : *Notre Dame Journal of Formal Logic* 60.1 (2019), pages 1-12.
- [MP19b] Benoit MONIN et Ludovic PATEY. ‘Pigeons do not jump high’. In : *Advances in Mathematics* 352 (2019), pages 1066-1095.
- [Bie+18] Laurent BIENVENU, Santiago FIGUEIRA, Benoit MONIN et Alexander SHEN. ‘Algorithmic identification of probabilities is hard’. In : *Journal of Computer and System Sciences* 95 (2018), pages 98-108.
- [Gre+18] Noam GREENBERG, Joseph S MILLER, Benoit MONIN et Daniel TURETSKY. ‘Two More Characterizations of K-Triviality’. In : *Notre Dame Journal of Formal Logic* 59.2 (2018).
- [Mon18] Benoit MONIN. ‘An answer to the Gamma question’. In : *Proceedings of the 33rd Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS)*. 2018, pages 730-738.

A.9 Emmanuel Polonowski

Thématiques

Mes activités de recherche se situent dans le domaine de la sémantique des langages de programmation et plus précisément dans ses aspects syntaxiques et autour de la correspondance preuve-programme.

Depuis l’obtention de mon doctorat, j’ai orienté mon activité pour travailler en collaboration avec le seul collègue du laboratoire qui partageait ma thématique de recherche. Nos travaux se sont concentrés sur l’élaboration de systèmes de types permettant de faire entrer la correspondance preuve-programme dans le cadre de la programmation impérative et de la logique classique constructive. Ceci a nécessité de passer par plusieurs étapes, décrivant dans un premier temps les éléments opérationnels de la sémantique dynamique et statique d’un mini-langage impératif avec variables procédurales d’ordre supérieur, LoopW, capturant à un isomorphisme près le système T de Gödel. Ensuite, nous avons étendu le langage impératif avec des sauts non-locaux et un système de types faisant correspondre une dérivation de typage à une preuve de la logique classique. Ceci nous a permis de proposer un pont entre l’approche de vérification par triplets de Hoare et l’approche par isomorphisme preuves-programmes. Ces travaux ont été présentés en conférence et ont fait l’objet d’une publication dans un article de revue.

Ces travaux pourraient être poursuivis par :

- le développement par macro-définitions d’un ensemble de fonctionnalités syntaxique pour le mini-langage impératif ;
- l’étude intrinsèque du mini-langage impératif et de ses mécanismes primitifs pour envisager de convertir en mode impératif les principes fondamentaux du lambda-calcul ;
- l’extension du système de type pour englober d’autres éléments constitutifs de la programmation impérative.

L’autre axe de travail de recherche que j’ai suivi ces dernières années consiste en le développement d’une application pour l’assistant de preuve Coq, nommée DBGen. Cette application permet d’apporter une réponse syntaxique automatisée à la problématique posée par la représentation des structures de termes avec indices de De Bruijn en Coq. En effet, la lourdeur des définitions des opérations de substitution, mais aussi des propriétés élémentaires des langages (comme le typage) peut être évitée grâce à cet outil qui prend en entrée un code source Coq décrivant les éléments essentiels du langage étudié et produit en sortie l’ensemble des définitions, propriété et preuves permettant de l’utiliser de façon pratique. Selon la complexité du langage étudié, le code source généré peut être d’une longueur conséquente (plusieurs milliers de lignes générées). Ce travail a été présenté en conférence.

Ce travail pourrait être poursuivi par l'ajout d'une génération automatique de propriétés avancées, ce qui permettrait d'aller par exemple jusqu'à la preuve de préservation du typage par réduction.

Mon activité de recherche a cependant connu un ralentissement progressif au regard du temps qu'il me fallait consacrer à la gestion des différents projets et périmètres placés progressivement sous ma responsabilité. Avec le départ en 2012 du collègue avec lequel je travaillais au sein du laboratoire, celui-ci ayant obtenu un poste de professeur des universités dans un autre établissement, le relatif isolement thématique dans le contexte local couplé avec la montée en charge de mes responsabilités collectives (direction d'un département d'enseignement, puis direction du projet de création de l'école d'ingénieurs de l'université, puis direction de l'UFR) m'ont amené à suspendre temporairement mes travaux.

A.10 Luc Pellissier

- Porteur du projet ANR JCJC LAVERSE (*Law Versioning : Semantical and Executable — Versionnement des lois sémantique et exécutable*), 2023 → 2028 ;
- Co-responsable du pôle *Données géo-numériques* du projet *La fabrique urbaine de l'indésirabilité : échelles, normes, espaces* de l'appel à projet «gestion de l'espace public et stratégies d'évictions des populations dites “indésirables”» de la défenseure des droits.
- Co-porteur du projet *Informatique et libertés, retour sur archives, Bonus Qualité Enseignement Recherche* de l'UPEC, 2023 ;
- Porteur du projet *Algorithmes : Logique, Droit, Éthique, Bonus Qualité Enseignement Recherche International* de l'UPEC, 2021 ;
- Porteur du projet *Syntaxe parallèle et sémantique interactive de la recherche de preuve : vers une approche unifiant la programmation logique et programmation fonctionnelle*, ayant reçu 6K€ de financement du Domaine d'Intérêt Majeur «Réseau Francilien en Sciences Informatiques» (DIM RFSI) de la Région Île-de-France, 2021 ;
- Co-encadrement du post-doctorat d'Aurore Alcolei (dix-huit mois de 2022 à 2023), avec Alexis Saurin ;
- Co-encadrement du doctorat d'Éloi Barbier, dirigé par Noé Wagener et Pierre Valarcher
- Encadrement de vingt mémoires du M2 Droit du numérique, de 2020 à 2023 ;
- Éditeur invité du numéro spécial “Computing Cultures” de *Minds and Machines*
- Relecteur pour diverses conférences (FSCD, PoPL, LiCS, CSL).

Thématiques

Mes travaux, situés dans la sémantique des langages de démonstration et de programmation, s'organisent en deux axes principaux : premièrement sur la définition et l'étude d'objets sémantiques permettant de représenter des constructions intéressantes, deuxièmement sur l'application de tels objets à d'autres domaines de l'informatique théorique, principalement la vérification et la complexité.

Définition d'objets sémantiques. Les réseaux de preuves sont un système syntaxique permettant de représenter des preuves sous la forme de graphe. C'est une structure relativement canonique, dans le sens où deux preuves qui ne diffèrent que de manière indétectable pour l'élimination des coupures sont représentées par le même objet, mais une structure difficile à définir pour certains fragments de la logique linéaire. Mes travaux se sont donc placés autour de la définition des réseaux de preuve exponentiels [GPF20] et avec points fixes [DPS21] (avec co-autrice Aurore Alcolei, alors post-doc au LACL), ainsi qu'à la représentation de certaines opérations sur les preuves comme la séquentialisation dans les réseaux [APS23].

Utilisation. Dans [MPV18], nous avons démontré que de nombreux systèmes de types, garantissant des propriétés sur l'exécution de termes dans des langages de programmation autour du λ -calcul (comme la normalisation forte — c'est-à-dire que toutes les exécutions possibles terminent — ou la normalisation faible — c'est-à-dire qu'au moins une exécution termine) pouvaient dériver d'un système sur les réseaux de preuve. C'est donc une mise en évidence d'outils sémantiques comme unificateurs de nombreuses constructions.

Dans un travail accepté récemment (donc publication de 2024, donc hors du cadre temporel ?), j'ai montré que des outils sémantiques proches permettaient d'obtenir un résultat de séparation entre une classe de complexité parallèle (**NC**, considérée comme représentant les problèmes faciles à paralléliser) et **P**.

Best of

Sans doute le dernier sur la complexité.

Le futur

Depuis mon recrutement à l'UFR de droit, j'ai chamboulé complètement mes projets de recherche. Aujourd'hui, ils sont donc centrés sur l'interaction droit et informatique. Principalement :

- je cherche à étudier le processus d'écriture de la loi comme un objet calculatoire : de nombreux textes se présentent comme des *patchs* modifiant les textes précédents. Ces patchs peuvent être très différents (comparer «le troisième paragraphe de l'article L. 311-8 du code de l'éducation est remplacé par «...» » à «toutes les mentions de «Pôle Emploi» sont remplacées par «France Travail» dans tous les textes où il apparaît») et n'ont pas la même complexité. Je cherche à définir un langage de programmation permettant d'exprimer ces patchs, donner la complexité des opérations élémentaires, et les structures de données nécessaires pour représenter ceci. C'est là-dessus que j'ai obtenu mon ANR.
- on utilise des programmes plus ou moins compliqués prenant des décisions (du tourniquet du métro à des programmes obtenus par apprentissage détectant des comportements dangereux en tant réel pour des caméras de surveillance). Se posent de nombreuses questions démocratiques sur l'accès et l'intelligibilité de ces programmes. Je suis en particulier en train de mener une action pour obtenir que les modèles entraînés par des administrations soient communicables.

[APS23] Aurore ALCOLEI, Luc PELLISSIER et Alexis SAURIN. ‘The exponential logic of sequentialization’. In : *Proceedings of the 39th Conference on the Mathematical Foundations of Programming Semantics, MFPS XXXIX, Indiana University, Bloomington, IN, USA, June 21-23, 2023*. Sous la direction de Marie KERJEAN et Paul Blain LEVY. Tome 3. EPTICS. EpiSciences, 2023.

[DPS21] Abhishek DE, Luc PELLISSIER et Alexis SAURIN. ‘Canonical proof-objects for coinductive programming : infinites with infinitely many cuts’. In : *PPDP 2021 : 23rd International Symposium on Principles and Practice of Declarative Programming, Tallinn, Estonia, September 6-8, 2021*. Sous la direction de Niccolò VELTRI, Nick BENTON et Silvia GHILEZAN. ACM, 2021, 7 :1-7 :15.

[GPF20] Giulio GUERRIERI, Luc PELLISSIER et Lorenzo Tortora de FALCO. ‘Glueability of Resource Proof-Structures : Inverting the Taylor Expansion’. In : *28th EACSL Annual Conference on Computer Science Logic, CSL 2020, January 13-16, 2020, Barcelona, Spain*. Sous la direction de Maribel FERNÁNDEZ et Anca MUSCHOLL. Tome 152. LIPIcs. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2020, 24 :1-24 :18.

[MPV18] Damiano MAZZA, Luc PELLISSIER et Pierre VIAL. ‘Polyadic approximations, fibrations and intersection types’. In : *Proc. ACM Program. Lang.* 2.POPL (2018), 6 :1-6 :28.

A.11 Antoine Spicher

- Co-encadrement d’Alexandre Fernandez avec Luidnel Maignan sous la direction de Pierre Valarcher, 2018-2022.
- Co-encadrement de Negar Ahmadi Mobarakeh avec Olivia Pénas (Quartz - ISAE - Supméca), Régis Plateaux (Quartz - ISAE - Supméca) et Romain Barbedienne (IRT - SystemX), 2020. Malheureusement, pour des raisons extra-professionnelles (dues notamment la crise COVID), ces travaux ont dû être abandonnés.
- Encadrement Naim Moussaoui-Remil (L3 DLMI), 2021 ; par la suite ENS Rennes et MPRI.
- Co-porteur scientifique DIM RFSI *Theory and Practice of Global Transformations*, 2018-2019.

Thématiques

Ma recherche a pour thème principal la programmation spatiale, c'est-à-dire l'étude de l'espace dans les calculs et son incidence en programmation. Ma recherche est articulée autour de quatre arcs principaux : *Programmation et modélisation basées interaction*, *Informatique spatiale et musique*, *Transformations globales*, *Autour de la modélisation*. Durant la période revue par le présent document, je me suis concentré sur les deux dernières.

Transformations globales. Cette activité a débuté en 2015 et rebondit sur mes travaux antérieurs sur la programmation basée interaction. Bien que les langages par règle comme MGS (<https://www.spatial-computing.org/mgs/start>) permette d'exprimer des modèles de calcul aussi divers que les automates cellulaires, les systèmes multi-agents, les systèmes de Lindenmayer, les systèmes de Paun, le calcul chimique, etc., l'étude d'un modèle de calcul sous-jacent n'a jamais été faite. C'est dans cette optique que nous avons formalisé avec L. Maignan (MCF, LACL) une forme de réécriture topologique, que nous appelons *transformation globale* (GT), dont nous affirmons qu'elle capture *tout système synchrone, local et déterministe* [FMS19].

L'arrivée en 2018 d'Alexandre Fernandez, ancien étudiant de la double licence math-info de l'UPEC, a provoqué une forte accélération de cette thématique. Le cadre formel catégorique des GT a été largement étoffé et permet dorénavant de comprendre les GT à la lumières des extensions de Kan [FMS21b ; FMS23] et de capturer les systèmes synchrones, locaux et déterministes ou non [FMS22]. Afin de rester proche de l'implémentation (tout comme le projet logiciel MGS permettait d'illustrer concrètement l'utilité du langage), nous avons proposé un algorithme générique *online* d'applications de GT ; un prototype logiciel est en cours de développement à partir de technique de réécriture *online* novatrice [FMS21a].

Cette thématique marque un tournant personnel dans mes méthodes de travail et dans les outils formels que j'utilise maintenant. En effet, avant ces travaux, mes connaissances en théorie des catégories étaient faibles et il m'a fallu plusieurs années pour me mettre à niveau sur ces questions. L'obtention en 2018/19 du financement DIM RFSI *Theory and Practice of Global Transformations*, l'encadrement de la thèse d'A. Fernandez et les 5 publications depuis 2019 précédemment citées montrent que cette attente a été payante et que l'activité prendra une nouvelle dimension dans les années qui viennent.

Autour de la modélisation. Je cherche dans cette nouvelle activité à étudier si les éléments de modélisation (très orientés systèmes naturels, et qui ont été moteur de mes travaux précédents) peuvent s'appliquer à d'autres domaines parlant de modélisation. Je me suis rapproché d'O. Pénas et de R. Plateaux du laboratoire Quartz/Supméca pour répondre à cette question. Il s'avère que l'application des catégories à la modélisation que nous avons développée en fin de thèse avec Martin Potier (LACL, 2012-2017) peuvent être utilisée pour l'ingénierie des systèmes industriels.

Une première contribution a été informellement présentée au séminaire d'hiver de Supméca en 2020. Suite à cette présentation, un financement de thèse par l'IRT-SystemX a été obtenu pour définir une méthodologie basée sur la théorie des catégories, adressant la définition cohérente d'une architecture de simulation. Cependant, le début de cette thèse a souffert des restrictions fortes liées à la COVID. Le contrat de thèse a dû être dénoncé. Ma proximité avec Supméca est toujours d'actualité (enseignement en Master du langage de programmation MGS dans le module TAMS) et devrait donner lieu à de nouveaux développements dans les années futures.

Best of

La publication [FMS22] est représentative de la direction prise dans mes recherches ces dernières années et montre l'aboutissement d'un travail de fond dans ma méthodologie aboutissant à une publication dans une conférence de rang A.

Le futur

Mes projets futurs les plus concrets s'inscrivent dans l'activité *Transformations globales*. Ils s'articulent autour de 3 axes.

Un premier effort, dans la continuation de ce qui a été produit, consiste à asseoir la thèse des GT. D'une part, nous cherchons à multiplier les exemples de modèles de calcul localisés capturables « naturellement » dans le formalisme des GT, à la suite des L systèmes [FMS19] et des automates cellulaires [FMS21b ; FMS23]. La cas des dynamiques causales de graphes est sur le point d'être communiqué. D'autre part, nous cherchons à élargir le champ d'applications des GT à une gamme plus large de systèmes. Les *foncteurs ouverts*, introduits pour les formalisés les GT non-déterministes [FMS22], offrent une voie prometteuse pour étudier le maximal-parallélisme pour les systèmes synchrones déterministes, ou étendre les GT à un cadre stochastique, extension naturelle des systèmes de réécriture parallèles.

La proximité des GT avec les automates cellulaires et les dynamiques causales de graphes amène naturellement à penser la famille des théorèmes de Curtis-Hedlund dans le cadre générique des GT. Cette famille de théorèmes met en avant l'expression locale des dynamiques et leur continuité pour une certaine topologie. Un effort est actuellement en cours pour exprimer cette équivalence dans le cadre catégorique des GT. Ce travail repose sur l'expression de la localité à travers des topologies de Grothendieck.

Enfin, une dernière activité s'efforce de conserver un pied dans le concret en investiguant les aspects programmatoires offerts par les GT à travers un développement logiciel dans la continuité de [FMS21a]. L'objectif à terme serait de proposer, à l'image du projet MGS, un prototype montrant le large périmètre d'applications des GT. La boucle serait ainsi bouclée : offrir un modèle de calcul sous-jacent la programmation basée interactions.

- [FMS23] Alexandre FERNANDEZ, Luidnel MAIGNAN et Antoine SPICHER. ‘Cellular automata and Kan extensions’. In : *Nat. Comput.* 22.3 (2023), pages 493-507.
- [FMS22] Alexandre FERNANDEZ, Luidnel MAIGNAN et Antoine SPICHER. ‘Non-Determinism in Lindenmayer Systems and Global Transformations’. In : *47th International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science, MFCS 2022, August 22-26, 2022, Vienna, Austria*. Sous la direction de Stefan SZEIDER, Robert GANIAN et Alexandra SILVA. Tome 241. LIPIcs. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2022, 49 :1-49 :13.
- [FMS21a] Alexandre FERNANDEZ, Luidnel MAIGNAN et Antoine SPICHER. ‘Accretive Computation of Global Transformations’. In : *Relational and Algebraic Methods in Computer Science - 19th International Conference, RAMiCS 2021, Marseille, France, November 2-5, 2021, Proceedings*. Sous la direction d’Uli FAHRENBERG, Mai GEHRKE, Luigi SANTOCANALE et Michael WINTER. Tome 13027. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2021, pages 159-175.
- [FMS21b] Alexandre FERNANDEZ, Luidnel MAIGNAN et Antoine SPICHER. ‘Cellular Automata and Kan Extensions’. In : *27th IFIP WG 1.5 International Workshop on Cellular Automata and Discrete Complex Systems, AUTOMATA 2021, July 12-14, 2021, Aix-Marseille University, France*. Sous la direction d’Alonso CASTILLO-RAMIREZ, Pierre GUILLON et Kévin PERROT. Tome 90. OASIcs. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2021, 7 :1-7 :12.
- [FMS19] Alexandre FERNANDEZ, Luidnel MAIGNAN et Antoine SPICHER. ‘Lindenmayer Systems and Global Transformations’. In : *Unconventional Computation and Natural Computation - 18th International Conference, UCNC 2019, Tokyo, Japan, June 3-7, 2019, Proceedings*. Sous la direction d’Ian MCQUILLAN et Shinnosuke SEKI. Tome 11493. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2019, pages 65-78.

A.12 Pascal Vanier

Activités

- Administration et animation de la recherche : responsable du séminaire du LACL
- soutenance HdR en octobre 2019.
- promu PR à Caen au GREYC en septembre 2020.

Thématisques

Objets d'études typiques : pavages, sous-shifts ; mots, système dynamique, groupes. Questions concernent le plus souvent des aspects de calculabilité et des caractérisations des objets précédents [GMV18 ; MV18 ; PV19 ; JV19 ; Gui+19 ; JMV20].

- [JMV20] Emmanuel JEANDEL, Etienne MOUTOT et Pascal VANIER. ‘Slopes of Multidimensional Subshifts’. In : *Theory Comput. Syst.* 64.1 (2020), pages 35-61.
- [Gui+19] Pierre GUILLON, Emmanuel JEANDEL, Jarkko KARI et Pascal VANIER. ‘Undecidable Word Problem in Subshift Automorphism Groups’. In : *Computer Science - Theory and Applications - 14th International Computer Science Symposium in Russia, CSR 2019, Novosibirsk, Russia, July 1-5, 2019, Proceedings*. Sous la direction de René van BEVERN et Gregory KUCHEROV. Tome 11532. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2019, pages 180-190.

- [JV19] Emmanuel JEANDEL et Pascal VANIER. ‘A Characterization of Subshifts with Computable Language’. In : *36th International Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science, STACS 2019, March 13-16, 2019, Berlin, Germany*. Sous la direction de Rolf NIEDERMEIER et Christophe PAUL. Tome 126. LIPIcs. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2019, 40 :1-40 :16.
- [PV19] Ronnie PAVLOV et Pascal VANIER. ‘The relationship between word complexity and computational complexity in subshifts’. In : *CoRR* abs/1903.04325 (2019). arXiv : 1903.04325.
- [GMV18] Anaël GRANDJEAN, Benjamin Hellouin de MENIBUS et Pascal VANIER. ‘Aperiodic Points in \mathbb{Z}^2 -subshifts’. In : *45th International Colloquium on Automata, Languages, and Programming, ICALP 2018, July 9-13, 2018, Prague, Czech Republic*. Sous la direction d’Ioannis CHATZIGIANNAKIS, Christos KAKLAMANIS, Dániel MARX et Donald SANNELLA. Tome 107. LIPIcs. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2018, 128 :1-128 :13.
- [MV18] Etienne MOUTOT et Pascal VANIER. ‘Slopes of 3-Dimensional Subshifts of Finite Type’. In : *Computer Science - Theory and Applications - 13th International Computer Science Symposium in Russia, CSR 2018, Moscow, Russia, June 6-10, 2018, Proceedings*. Sous la direction de Fedor V. FOMIN et Vladimir V. PODOLSKII. Tome 10846. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2018, pages 257-268.

A.13 Pierre Valarcher

Activités

- Vice-président en charge du numérique de septembre 2022 à avril 2024 : accompagnement de la mise en place (avec la DSI) de calculateurs (GPU) pour des applications IA, mise en place de la gouvernance de du numérique (Comité de régulation et comité stratégique), accompagnement de la mise en place d’outils pour les laboratoires de recherche (IMRB - Santé), ...
- Administration et animation de la recherche : directeur adjoint LACL
- Co-créateur du Graduate Program : *Enjeux juridique et politique du numérique* (co-porté par la faculté de droit, l’IUT et l’Ecole internationale d’Etude Politique de l’UPEC) ; à destination d’un groupe d’étudiants à préparer à la recherche (1 bourse de doctorat par an financée par l’UPEC). Actuellement 3 étudiantes (ouverture en 2023).
- depuis 2020, co-direction du Living Lab Algopo (avec Emilie Frenkiel, LIPHA, Sc PO UPEC)), mise en place de 6 projets recherche-action
- depuis 2020, co-responsable de la série « Innovation, Actions Publiques et Société » au sein de la collection « Questions de sociétés » aux éditions EMS, avec Olivier Meier : un ouvrage sur l’Innovation Publique et un ouvrage sur l’Acceptation Sociale.
- depuis 2018, membre du comité scientifique de l’axe stratégique Numérique science et pratique (UPEC).
- direction de thèses :
 - Paul-Elliott Angles d’Auriac soutenue en 2019 (avec Benoît Monin) : *infinite computations in algorithmics randomness and reverse mathematics*. Financement ENS Lyon
 - Tien Thao Nguyen soutenue en 2021 : combler le fossé entre l’algorithmique spatiale de haut niveau et bas niveau (co encadré avec Luidnel Maignan). Financement ED MSTIC.
 - Alexandre Fernandez soutenue en 2022 : *études formelles et implémentation des transformations globales* (co-encadré avec Antoine Spicher et Luidnel Maignan). Financement ED MSTIC + IUT.
 - depuis 2022 Co-directeur d’une thèse en droit du numérique de Eloi Barbier sur le sujet *Le raisonnement juridique au prisme des algorithmes*. Financement UPEC + IUT.
 - depuis 2023, directeur de thèse en informatique de Hong-Linh Le sur le sujet des *algorithmes à la Moschovakis : complexité et classes*. Financement ED MSTIC.
- Encadrement de plus de 30 mémoires de recherche de M2 Droit du numérique (2018-2023)
- Co-porteur des projets (ayant donné lieu à un financement Bonus Qualité Recherche ou Enseignement-Recherche). Environ un financement par an sur activité en droit du numérique et Living Lab.

Thématisques

- La thématique de recherche principale reste l’étude de classes d’algorithmes définis à partir de la définition de Y. Gurevich via les *Abstract State Machines*. Si la définition des algorithmes via les ASM est relative-

ment pertinente, elle ne permet pas de définir des classes sérieusement. Ce travail commencé en 2012 avec S. Grigorieff se poursuit mais n'a pas permis d'aboutir malgré des progrès conséquents (non publiés) : les ASM sont en fait une représentation théorique des machines CISC (les opérations sont riches et se font directement en mémoire, pour simplifier). Avec S. Grigorieff, nous réinterprétons les modèles de calcul en privilégiant une approche plus RISC (avec 3 étapes, LOAD - COMPUTE - STORE). Cette approche permet de réintroduire une notion dite de "machinerie" qui permet de développer des classes d'algorithmes représentant fidèlement les modèles de calcul classique (Turing, Kolmogorov, Uspenski, Automate, ...). La fidélité est ici synonyme de même structures de contrôle et données ainsi que simulation pas à pas.

- La deuxième thématique est celle relative à la classe des programmes primitif récursif exprimés par des combinatoires dont on soupçonne qu'elle ne permet d'exprimer certains algorithmes (en terme de complexité pas à pas). C'est déjà connu depuis 1990 avec l'algorithme du *min* mais nous pensons qu'il y en a d'autres. Les preuves très techniques résistent encore (travail avec J. Cervelle et P. Cegielski)
- La troisième thématique porte sur les algorithmes publics et le droit : les travaux actuels portent sur le droit et l'informatique. Nous abordons le sujet avec le Pr Noé Wagener et Luc Pellissier sous l'angle de la légistique : comment les textes de lois sont influencés par les algorithmes qui vont les implémenter. Cela n'a pour l'instant donné lieu à aucune pré-publication.

Le futur

Reprendre les thématiques et approfondir la partie en droit du numérique.

A.14 Serghei Verlan

- Co-encadrement : Zeyi Shang (avec Gexiang Zhang de Southwest Jiaotong University, Chengdu, Chine) de 2016 à 2020. Actuellement Zeyi est lecteur à School of Computer Science, Civil Aviation Flight University of China.
- Organisation du colloque international *17th International Conference on Unconventional Computation and Natural Computation* à Fontainebleau, 2018. Le colloque était accompagné de 4 workshops satellites.
- Organisation du colloque international *8th Conference on Machines, Computations and Universality* à Fontainebleau, 2018.
- Éditeur pour la revue «Journal of Membrane Computing», Springer, depuis 2018.
- Éditeur invité pour 4 volumes (2 LNCS, Fundamenta informaticae, Natural Computing) [DKV21 ; SV19 ; DV18 ; SV18] en 2018, 2019 et 2021.
- 3 chapitres de livres [Csu+21 ; Alh+18c ; Alh+18b]
- 1 livre écrit en 2021 : [Zha+21]
- Invitation à Southwest Jiaotong University, Chine, visite de recherche, 04/2019.
- Invitation comme orateur invité pour 3 colloques : 20th Conference on Membrane Computing (2019), Asian Conference on Membrane Computing 2019, Asian Conference on Membrane Computing 2021.
- participations à des projets de recherche :
 - National Natural Science Foundation of China no. 61972324, «Modeling principles of membrane computing models for controlling mobile robots», 2020–2023, 600.000 RMB, investigateur étranger principal.
 - Sichuan Provincial Science & Technology Department, Grant no. 18ZDYZF1985, «Efficient FPGA implementation of novel computing models and its applications in robots», 2018–2019, 120.000 RMB, investigateur étranger principal.
- Membre du comité de pilotage des colloques «Conference on Membrane Computing» (depuis 2011) et «Machines, Computations and Universality» (depuis 2018).

Thématiques

Les thématiques de recherche pendant la période de référence peuvent être classées dans trois catégories principales : (1) preuves d'universalité et complétude computationnelle pour plusieurs modèles du domaine du calcul naturel, (2) sémantique des modèles de calcul du domaine du calcul à membranes et de la réécriture des multiensembles et (3) implémentation matérielle (en FPGA) des modèles de calcul non-conventionnel parallèle.

Universalité et complétude computationnelle. Dans le cadre de la première direction de recherche on a travaillé sur plusieurs modèles de calcul ayant une inspiration biologique ou équivalents — systèmes à insertion-effacement (ou grammaires d'insertion) [Alh+22a ; IV21 ; VFK20], réseaux de processeurs évolutionnaires [FRV19], machines à registres [AVF18] et systèmes à membranes (membrane computing) [Csu+21 ; Alh+18c ; Alh+18b ; Alh+18a ; Alh+22b ; Alh+21 ; Alh+22a]. On s'est intéressé principalement à leur puissance d'expression et à des questions d'universalité et réversibilité.

Comme résultats marquants on pourrait citer [AVF18] qui donne la construction des plus petites machines à registre universelles réversibles connues (avec 97 états ou avec 2 registres) et [VFK20] où on a montré la complétude computationnelle des grammaires d'insertion de taille 2 (qui insèrent 2 symboles dans un contexte de 2 caractères).

Sémantique des modèles de calcul. Dans le cadre de cette direction on s'est concentré sur la proposition d'un cadre formel pour les systèmes à membranes permettant de définir d'une manière non-ambiguë la sémantique de n'importe quel modèle de ce type (et d'une manière plus générale d'un modèle fondé sur la manipulation des vecteurs de nombres) [VZ23 ; Alh+23 ; Ver+20 ; Ver+19]. Cela permet de comparer les modèles correspondants à l'aide des bisimulations, ainsi que de préparer une bibliothèque d'ingrédients standards utilisés dans le domaine. De plus, l'approche utilisée permet de formaliser d'une manière uniforme les modèles de calcul similaires (réseaux de Petri, systèmes d'équations chimiques, machines à registre, automates cellulaires, systèmes d'équations en différences finies, circuits logiques etc.) et de transposer les idées, les outils et les problèmes d'un modèle à autre.

Implémentation matérielle des modèles de calculs non-conventionnels. La deuxième direction de recherche correspond à une reconversion thématique qui a commencé pendant la période de référence. L'idée principale était de trouver des modèles de calcul non-conventionnels parallèles qui peuvent s'implémenter d'une manière efficace sur des circuits logiques matériels reprogrammables (FPGA). Cela permettrait de proposer un langage (et modèle) de programmation différent des paradigmes actuelles, tout en possédant une efficacité d'implémentation importante. Après plusieurs essais on s'est arrêté sur le modèle des systèmes à membranes numériques (NPS) qui est un modèle de calcul parallèle et distribué ayant des liens étroits avec le modèle des équations en différences finies. Nous avons proposé des restrictions théoriques afin de permettre une implémentation efficace du modèle en matériel et nous avons écrit un premier compilateur qui transforme les NPS en circuits FPGA. Les premières résultats montrent une vitesse de 10^8 étapes de calcul/s (et une accélération de l'ordre 10^5 par rapport à une implémentation logicielle). Nous avons utilisé comme cadre de test le contrôle robotique et nous avons testé plusieurs modèles pour le déplacement du robot et la recherche du chemin. Ces résultats se sont soldés par plusieurs articles dans des journaux internationaux [Sha+23 ; Sha+21 ; Sha+19a ; Sha+20 ; Zey19 ; Sha+19b] dont un article dans *ACM Computing Surveys* [Zha+20] (qui a un IF 6.1). Une partie de ces travaux a été publié dans le livre [Zha+21]. Également, mes partenaires chinois ont pu déposer x4 brevets nationaux liés à ce sujet de recherche.

Autres. On a une collaboration scientifique avec Lynda Mokdad de l'équipe SVS au sujet de la formalisation de la détection des vulnérabilités (format string injection, stack overflow, heap overflow, double free) dans le code binaire. On a établi le concept des zones (mémoire) dangereuses et on a proposé un modèle formel fondé sur un système de transitions qui permet de mettre à jour la liste des zones dangereuses. Puis on a défini des prédictats sur les traces d'exécution qui permettent de vérifier si l'une des vulnérabilités considérées est présente. Comme résultat on a obtenu un outil qui permet une détection très efficace des vulnérabilités (sans faux positifs). Les tests ont permis de détecter des vulnérabilités potentielles dans des bibliothèques importantes comme `libjpg` ou `libssl`.

Best of

Dans le paragraphes précédents on a mentionné plusieurs résultats marquants. Il est difficile d'en choisir un, car ils sont dans des domaines différents.

Le futur

On prévoit de continuer dans les directions de recherche actuelles, plus particulièrement sur troisième thème. On se concentrera sur la finalisation du langage de description des NPS et sur les liens automatisés avec les systèmes d'équations différentielles. On développera également les compilateurs nécessaires et les briques de

traduction en circuits FPGA. On prévoit également de vérifier formellement ces briques et de concevoir un générateur d'applications de co-processing (avec une communication par bus PCI ou en réseau) et d'applications embarquées. Un tel générateur produira à partir de la description le code FPGA et les pilotes nécessaires pour le système d'exploitation afin de permettre une utilisation facile des NPS dans des applications réelles.

- [Alh+23] Artiom ALHAZOV, Rudolf FREUND, Sergiu IVANOV et Sergey VERLAN. ‘Numerical networks of cells’. In : *Theor. Comput. Sci.* 958 (2023), page 113873.
- [Sha+23] Zeyi SHANG, Zhe WEI, Sergey VERLAN, Jianming LI et Zhige HE. ‘An FPGA Architecture for the RRT Algorithm Based on Membrane Computing’. In : *Electronics* 12.12 (2023).
- [VZ23] Sergey VERLAN et Gexiang ZHANG. ‘A Tutorial on the Formal Framework for Spiking Neural P Systems’. In : *Natural Computing* 22.1 (2023), pages 181-194.
- [Alh+22a] Artiom ALHAZOV, Rudolf FREUND, Sergiu IVANOV et Sergey VERLAN. ‘Regulated Insertion-Deletion Systems’. In : *J. Autom. Lang. Comb.* 27.1-3 (2022), pages 15-45.
- [Alh+22b] Artiom ALHAZOV, Rudolf FREUND, Sergiu IVANOV et Sergey VERLAN. ‘Tissue P Systems with Vesicles of Multisets’. In : *Int. J. Found. Comput. Sci.* 33.3&4 (2022), pages 179-202.
- [Alh+21] Artiom ALHAZOV, Rudolf FREUND, Sergiu IVANOV et Sergey VERLAN. ‘Variants of derivation modes for which catalytic P systems with one catalyst are computationally complete’. In : *Journal of Membrane Computing* 3.4 (2021), pages 233-245.
- [Csu+21] Erzsébet CSUHAJ-VARJÚ, Marian GHEORGHE, Alberto LEPORTI, Miguel Ángel MATÍNEZ-DEL-AMOR, Linqiang PAN, Prithwineel PAUL, Andrei PĂUN, Ignacio PÉREZ-HURTADO, Mario J. PÉREZ-JIMÉNEZ, Bosheng SONG, Luis VALENCIA-CABRERA, Sergey VERLAN, Tingfang WU, Claudio ZANDRON et Gexiang ZHANG. ‘Membrane Computing Concepts, Theoretical Developments and Applications’. In : *Alternative Computing*. Sous la direction d’Andrew ADAMATZKY. World Scientific, 2021, page 70.
- [DKV21] Jérôme DURAND-LOSE, Jarkko KARI et Sergey VERLAN, éditeurs. *Special Issue on Machines, Computations and Universality (MCU 2018)*. Tome 181. Fundamenta Informaticae 2-3. 2021.
- [IV21] Sergiu IVANOV et Sergey VERLAN. ‘Single semi-contextual insertion-deletion systems’. In : *Natural Computing* 20.4 (2021), pages 703-712.
- [Sha+21] Zeyi SHANG, Sergey VERLAN, Gexiang ZHANG et Haina RONG. ‘FPGA Implementation of Numerical P Systems’. In : *International Journal of Unconventional Computing* 16.2-3 (2021), pages 279-302.
- [Zha+21] G. ZHANG, M.J. PÉREZ-JIMÉNEZ, A. RISCOS NÚÑES, S. VERLAN, S. KONUR, Th. HINZE et M GHEORGHE. *Membrane Computing Models : Implementations*. Springer, 2021.
- [Sha+20] Zeyi SHANG, Ignacio PÉREZ-HURTADO, Sergey VERLAN et Gexiang ZHANG. ‘FPGA Architecture for Generalized Numerical P System Arranged Rapidly-Exploring Random Tree Algorithm’. In : *Preliminary proceedings of International Conference on Membrane Computing 2020*. 2020.
- [VFK20] Sergey VERLAN, Henning FERNAU et Lakshmanan KUPPUSAMY. ‘Universal insertion grammars of size two’. In : *Theoretical Computer Science* 843 (2020), pages 153-163.
- [Ver+20] Sergey VERLAN, Rudolf FREUND, Artiom ALHAZOV, Sergiu IVANOV et Linqiang PAN. ‘A Formal Framework for Spiking Neural P Systems’. In : *Journal of Membrane Computing* 2 (2020), pages 355-368.
- [Zha+20] Gexiang ZHANG, Zeyi SHANG, Sergey VERLAN, Miguel Á. MARTÍNEZ-DEL-AMOR, Chengxun YUAN, Luis VALENCIA-CABRERA et Mario J. PÉREZ-JIMÉNEZ. ‘An Overview of Hardware Implementation of Membrane Computing Models’. In : *ACM Computing Surveys* 53.4 (2020).
- [FRV19] Rudolf FREUND, Vladimir ROGOJIN et Sergey VERLAN. ‘Variants of Networks of Evolutionary Processors with Polarizations and a Small Number of Processors’. In : *International Journal of Foundations of Computer Science* 30.06n07 (2019), pages 1005-1027. eprint : <https://doi.org/10.1142/S0129054119400264>.
- [Sha+19a] Zeyi SHANG, Sergey VERLAN, Ion PETRE et Gexiang ZHANG. ‘Reaction Systems and Synchronous Digital Circuits’. In : *Molecules* 24.10 (2019).

- [Sha+19b] Zeyi SHANG, Sergey VERLAN, Gexiang ZHANG et Ignacio PÉREZ-HURTADO. ‘FPGA Implementation of Robot Obstacle Avoidance Controller based on Enzymatic Numerical P Systems’. In : *Pre-Proceedings of The 8th Asian Conference on Membrane Computing (ACMC2019), November 14–17, 2019, Xiamen, China*. Sous la direction de Gexiang ZHANG, Linqiang PAN et Xiangrong LIU. 2019, pages 184-214.
- [SV19] Susan STEPNEY et Sergey VERLAN, éditeurs. *Special Issue : Unconventional Computing and Natural Computing 2018 - Selected papers from the Unconventional Computing and Natural Computing Conference 2018*. Tome 18. Natural Computing 1. 2019.
- [Ver+19] Sergey VERLAN, Rudolf FREUND, Artiom ALHAZOV et Linqiang PAN. ‘A Formal Framework for Spiking Neural P Systems’. In : *Proceedings of the 20th International Conference on Membrane Computing, CMC20, August 5-8, 2019, Curtea de Arges, Romania*. Sous la direction de G. PĂUN. 2019.
- [Zey19] Gexiang Zhang ZEYI SHANG Sergey Verlan. ‘Hardware Implementation of Numerical P Systems’. In : *Proceedings of the 20th International Conference on Membrane Computing, CMC20, August 5-8, 2019, Curtea de Arges, Romania*. Sous la direction de G. PĂUN. 2019, pages 463-474.
- [Alh+18a] Artiom ALHAZOV, Rudolf FREUND, Sergiu IVANOV, Marion OSWALD et Sergey VERLAN. ‘Chocolate P Automata’. In : *Enjoying Natural Computing - Essays Dedicated to Mario de Jesús Pérez-Jiménez on the Occasion of His 70th Birthday*. Sous la direction de Carmen Graciani DÍAZ, Agustín RISCOS-NÚÑEZ, Gheorghe PAUN, Grzegorz ROZENBERG et Arto SALOMAA. Tome 11270. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2018, pages 1-20.
- [Alh+18b] Artiom ALHAZOV, Rudolf FREUND, Sergiu IVANOV, Marion OSWALD et Sergey VERLAN. ‘Extended spiking neural P systems with white hole rules and their red-green variants’. In : *Natural Computing* 17.2 (2018), pages 297-310.
- [Alh+18c] Artiom ALHAZOV, Rudolf FREUND, Sergiu IVANOV et Sergey VERLAN. ‘Tissue P Systems with Point Mutation Rules’. In : *Membrane Computing - 19th International Conference, CMC 2018, Dresden, Germany, September 4-7, 2018, Revised Selected Papers*. Sous la direction de Thomas HINZE, Grzegorz ROZENBERG, Arto SALOMAA et Claudio ZANDRON. Tome 11399. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2018, pages 33-56.
- [AVF18] Artiom ALHAZOV, Sergey VERLAN et Rudolf FREUND. ‘Small Universal Reversible Counter Machines’. In : *Reversibility and Universality : Essays Presented to Kenichi Morita on the Occasion of his 70th Birthday*. Sous la direction d’Andrew ADAMATZKY. Cham : Springer International Publishing, 2018, pages 433-446.
- [DV18] Jérôme DURAND-LOSE et Sergey VERLAN, éditeurs. *Machines, Computations, and Universality - 8th International Conference, MCU 2018, Fontainebleau, France, June 28-30, 2018, Proceedings*. Tome 10881. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2018.
- [SV18] Susan STEPNEY et Sergey VERLAN, éditeurs. *Unconventional Computation and Natural Computation - 17th International Conference, UCNC 2018, Fontainebleau, France, June 25-29, 2018, Proceedings*. Tome 10867. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2018.

A.15 Benoît Barbot

Activité

- Membre du comité de programme des conférences : RV23, PetriNet20, PetriNet21, PetriNet22, MT-CPS21, MSR21, EPEW21, RV22
- Relecture de papier ou journaux : Theoretical Computer Science, MTCPS21, Stacs21, Eumas20, PetriNet20, LOPSTR19, MASCOTS19, TACAS18, FormalMethodInSystemDesign19, DNA21, JCST33, VMCAI2023, DEDS2022, DEDS2023
- Membre du comité de pilotage de Qest 2021 -2026
- Organisations de conférence : Qonfest21 General Chair, Etaps23 publicity Chair

- Membre élue du conseil d'administration de l'université.
- Participation au comité de sélection de MCF : 2024 Université Sorbonne Paris Nord LIPN, 2023 Facultés des Sciences d'Orsay ENS Paris-Saclay, 2022 UPEC, LACL et Episen, 2021 Universités Sorbonne Paris Nord LIPN, 2021 Universités de Nantes, 2020 UPEC, LACL et FST
- Coordinateur local de l'ANR MaVeriQ
- Coordinateur local du projet joint JST (Japan Science et Technologie) et ANR
- Développeur principal du modèle checker statistique <https://cosmos.lacl.fr>
- Développeur principal de l'outil d'analyse d'automate temporisé <https://git.lacl.fr/barbot/wordgen>
- Encadrement Ingénieur : Pierre Cry 2022-2023
- Encadrement de Post doctorant Marco Eposito 2023-2024

A.16 Damien Busatto-Gaston

- Thèse au LIS :
 - Damien Busatto-Gaston. Synthèse symbolique de contrôleurs pour systèmes temporisés : robustesse et optimalité. 2019
- Participation à des projets :
 - Projet MAVerIQ (2021-2025), ANR 20-CE25-0012 : "Méthodes d'analyse pour la vérification de propriétés quantitatives".
 - Projet TickTac (2019-2023), ANR 18-CE40-0015 : "Techniques et outils efficaces pour la vérification et synthèse des systèmes temps-réels".
 - Projet DeLTA (2016-2020), ANR 16-CE40-0007 : "DÉfis pour la Logique, les Transducteurs et les Automates".
 - Projet VeriLearn (2018-2022), FNRS, Belgique : "Vérification automatique de systèmes intelligents".
- PC de conférences :
 - AAMAS 2024, TACAS 2022 (Artefact Evaluation), FORMATS 2021, TACAS 2021 (Artefact Evaluation)
- Relectures d'articles :
 - TODO
- Exposés invité :
 - École des Jeunes Chercheurs et Chercheuses en Informatique Fondamentale et ses Mathématiques (EJCIM) 2024
 - GT ALGA 2021

A.17 Luc Dartois

- Orateur invité :
 - Workshop TRENDS 2019 (<https://www.cse.iitb.ac.in/~krishnas/trends2019/>) - Dagstuhl Seminar "Regular Transformations" (<https://drops.dagstuhl.de/entities/document/10.4230/DagRep.13.5.96>)
- Relecture d'articles :
 - Journaux : LMCS, Fundamenta Informaticae
 - Conférences internationales de rang A^* ou A : LICS, ICALP, FSTTCS, CSL

A.18 Catalin Dima

Encadrement doctoral et scientifique

Dumitru-Bogdan Prelipcean, inscription en thèse au 1/09/2020 : *Application des méthodes formelles à la détection de programmes malveillants.* Thèse de type collaboration avec une entreprise privée (BitDefender Roumanie), Bogdan étant salarié de BitDefender. Encadrement à 100%. L'encadrement du travail de Bogdan se fait en *distanciel* et implique des *réunions hebdomadaires*, ainsi que des séjours d'une semaine au LACL toutes les 4-6 mois.

La soutenance de la thèse de Bogdan est prévue pendant l'automne 2024.

Mariem Hammami, inscription en thèse au 1/10/2020 : *Abstraction et raffinement formels de systèmes hybrides.* Thèse financée sur le projet ANR DisCONT. Thèse co-encadrée par *Catalin Dima, Youssouf Oualhadj et Régine Laleau*.

Madalina Jitaru, inscription en thèse au 15/10/2021, arrêt de la thèse au 30/10/2023.

Participation à des jurys de thèse (date, laboratoire et titre, rôle)

1. Tristan Charrier, 13/12/2018, *Complexité théorique du raisonnement en logique épistémique dynamique et approche d'une approche symbolique*, Université de Rennes 1 & IRISA – rapporteur.
2. Johan Arcile, 13/12/2019, *Conception, modélisation et vérification formelle d'un système temps-réel d'agents coopératifs*, IBISC, Université d'Evry Val d'Essonne – rapporteur.
3. Emily Clément, 11/03/2022, *Robustness of timed automata : computing the maximally-permissive strategies*, Université de Rennes 1 & IRISA – rapporteur.

Professeur invité J'ai été accueilli pendant 2 semaines en janvier 2019 en tant que professeur invité à l'Institut de Recherche de l'Université de Bucarest.

Exposés invités aux conférences ou workshops

1. Conférencier invité, *Workshop on Dynamics of MultiAgent Systems*, Lorentz Center, Université de Leyde, décembre 2018.
2. Conférencier invité, *Working Formal Methods Symposium 2018*, 18-20/06/2018, Université de Iasi, Roumanie.

Invitations dans des séminaires

- Séminaire à l'Université Royale de Stockholm (KTH), 4/09/2019.
- Séminaire à la Faculté de Mathématiques et Informatique, Université de Bucarest, janvier 2019.
- Séminaire à l'*Imperial College*, Londres, novembre 2018.
- Séminaire au *Surrey Centre for Cyber Security*, Université du Surrey, mai 2018.

Organisation de colloques

1. J'ai co-organisé, avec *Mahsa Shirmohammadi*, les **19th International Conference on Formal Modeling and Analysis of Timed Systems (FORMATS 2021)**, la conférence principale de la communauté des automates temporisés et leurs applications en vérification formelle. Cette conférence a été accueillie, en distanciel, au LACL entre les *23-28 août 2021*.

Site web : <https://qonfest2021.lacl.fr/formats21.php>.

Participation aux comités de programmes de conférences internationales

- *International AAAI Conference on Artificial Intelligence* : AAAI'2018, 2019, 2020, 2021, 2022.
- *International Joint Conference on Artificial Intelligence* : IJCAI'2018, 2019 et 2020, 2021, 2022, 2023, 2024.
- *International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* : AAMAS'2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024.
- *European Conference on Artificial Intelligence* : ECAI'2020, 2024.
- *European Conference on Multi-Agent Systems* : EUMAS'2018, 2020.
- *International Conference on Formal Modeling and Analysis of Timed Systems* (FORMATS'2023).

Relecture d'articles de journal (depuis 2018)

- *Journal of the Association of Computer Machinery* (JACM), journal A*, 1 fois.
- *Artificial Intelligence*, journal A*, 2 fois.
- *Logical Methods in Computer Science*, journal A, 1 fois.
- *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, journal A, 1 fois.
- *Transactions on Computational Logics*, journal A, 2 fois.
- *Formal Aspects of Computing*, journal B, 1 fois.
- *Journal of Logic and Applied Programming*, journal B, 2 fois.
- *Software Tools for Technology Transfer*, journal B, 1 fois.
- *Fundamenta Informaticae*, journal B, 1 fois.

Responsabilité de projets autre que ANR Dans le cadre du Domaine d'Intérêt Majeur (DIM) *Réseau Francilien des Sciences Informatiques* (RFSI) j'ai déposé et reçu du financement pour les 3 projets suivants :

1. Projet **MALEVEPS**, 2018-2019, sur la vérification des propriétés de sécurité à l'aide des logiques temporelles épistémiques, 9500 euros. Ce projet a essentiellement servi à financer des déplacements des membres du groupe de travail sur les logiques de stratégies pour présenter nos résultats dans les conférences, colloques ou ils ont été acceptés et aux séminaires invités.
2. Projet **BIATLON**, 2019-2020, sur des techniques de preuve de bisimulation pour des modèles multi-agents et des applications aux logiques de stratégies, 11000 euros. De même que le projet MALEVEPS, cet argent sert aussi à présenter les travaux du groupe de travail sur les logiques de stratégie, ainsi que les résultats (en cours d'obtention) du groupe de travail sur les bisimulations up-to pour les modèles multi-agents.

Depuis le 1er mars 2021 je suis le collaborateur externe d'un projet EPSRC avec Francesco Belardinelli de l'Imperial College Londres intitulé **Strategy Logics for Secure Voting Protocols**. Le but de ce projet est d'étendre les logiques de stratégie avec des théories équationnelles permettant de modéliser des aspects cryptographiques dans les protocoles de sécurité.

Administration et animation de petites structures scientifiques locales Depuis sa création en janvier 2019, je suis membre du Comité de Pilotage du **Campus Spatial de l'UPEC** <https://www.csu.u-pec.fr/>.

"Le Campus Spatial de l'Université Paris Est Créteil est une structure universitaire dont l'objectif est de faire participer des étudiantes et étudiants d'horizons divers à des projets associés aux thématiques de l'espace. Le Campus vise à former ces étudiants aux différentes compétences et métiers liés à la filière spatiale, à travers la conception de petits satellites appelés CubeSats, avec leurs logiciels de pilotage, mais aussi le management des projets eux-mêmes. Cette formation se fait par un travail en équipe interdisciplinaire au cours duquel les étudiants sont amenés à développer leur autonomie afin de mener à bien les projets. Le Campus Spatial fait

ainsi travailler ensemble des étudiants venant de filières différentes sur des réalisations spatiales ambitieuses et motivantes." (Citation de la description du CSU sur sa page web).

Je participe aussi activement à la formation par la recherche des étudiants en M1 et M2 informatique à travers leur implication dans des projets de développement de logiciel sûr et certifié pour les CubeSats construits dans le cadre du Campus Spatial. Plus précisément, depuis septembre 2018 j'ai co-encadré 3 projets d'année et 4 stages de M1 sur le développement de logiciels embarqués pour les CubeSat.

A.19 Frédéric Gava

2018-2024	Membre du comité de programme ICCS	F. Gava
2022	Membre du comité de programme HLPP2022	F. Gava
2023	Membre du comité de programme HLPP2023	G. Hains
2024	Membre du comité de programme HLPP2024	G. Hains
2023-2024	Projet de recherche "Mathematics of Arrays"	L. Mullin et G. Hains
2023-2024	Projet CRIANN	G. Hains
2018-2024	relectures pour différentes revues	F. Gava et G. Hains

- délégation CNRS du 01/09/2022 au 01/09/2023
- Travail post-doctoral, Léa Marziyeh BAYATI Dans le cadre du projet ANBLIC, j'encadrais (septembre 2020 à septembre 2022) le travail post-doctoral de Léa BAYATI

Frédéric Gava a aussi été **rapporiteur** de la thèse de Hoby Rakotoarivelo en 2018 intitulée « Approche de co-design de noyaux irréguliers sur accélérateurs manycores. Application au cas du remaillage adaptatif pour le calcul intensif » (directeur Franck Pommereau).

- Organisation des journées LaMHA au LACL en 2019 (commune avec le groupe LTP <https://www.lri.fr/LTP-LaMHA19/>)

A.20 Frédéric Gervais

- Recherche et encadrement de la recherche : nombre d'articles, HDR et thèses soutenues, rapporteurs et comités de thèse, stages M2 recherche, membres de PC de confs, relecteurs de journaux, profs invités, exposés invités, projets ANR/BQR/DIM etc. 1 article publié avec Julien Cervelle à la conférence ABZ 2023

1 article en cours de soumission avec Julien Cervelle à la revue Science of Computer Programming

Prof invité à l'université de Sherbrooke (Québec, Canada) du 2 octobre au 1er décembre 2023

Membre du PC de la conférence ABZ 2024

3) Préparation d'un ou plusieurs paragraphes décrivant les thématiques sur lesquelles vous avez eu des "productions".

Comme expliqué dans les dossiers de mes précédentes évaluations (avancement de grade MCF HC et CRCT), je sors d'une longue période où j'ai effectué de lourdes tâches administratives et je reprends progressivement mes activités de recherche, notamment grâce au CRCT obtenu par la voie nationale en septembre 2023. Mon principal thème de recherche actuellement est la définition de théories à travers des outils comme le Plugin Theory de Rodin afin de faciliter la réutilisation de spécifications et des preuves associées dans le cadre d'un processus de modélisation formelle avec un langage comme B/Event-B. Ce travail est réalisé en collaboration avec Julien Cervelle, il s'agit donc d'un projet commun entre SVS et LCP. Nous sommes tous les deux membres du projet ANR EBRP.

J. Cervelle, F. Gervais : Introducing inductive construction in B with the Theory Plugin. In 9th International Conference on rigorous state based methods (ABZ 2023), Nancy, France, 30 May – 2 June. Springer, LNCS 14010, pp. 43-58, 2023.

5) Thématiques et projets que vous souhaitez aborder dans votre recherche dans les prochaines 5 années. Les thématiques sur lesquelles je souhaite avancer sont d'une part la réutilisation de preuves et d'autre part le raffinement. Ces deux thèmes ont déjà fait l'objet de plusieurs publications par le passé et je souhaite reprendre et continuer mes travaux avec ces deux thèmes comme fil conducteur.

Suite à mon CRCT, je travaille actuellement avec Marc Frappier et l'Institut Quantique de l'université de Sherbrooke sur de possibles collaborations autour des méthodes formelles dans le quantique. Sherbrooke a l'avantage d'avoir accès à des ordinateurs quantiques opérationnels et en constante évolution. Par ailleurs il y a

une équipe AlgoLab qui développe des programmes quantiques à l’Institut Quantique. Le projet serait de définir des méthodes de spécification formelle pour prouver ou vérifier des propriétés sur les programmes quantiques.

A.21 Régine Laleau

Les faits marquants

- PEDR A (groupe 20%) depuis 2020
- Co-organisation du séminaire de recherche international à Shonan, Japon, en novembre 2023 (<https://shonan.nii.ac.jp/seminars/205/>)
- Invitation séminaire Dagstuhl 2023
- conférence invitée au workshop Refine@FM2019
- Exposé invité au Royal Melbourne Institute of Technology en 2018

Portfolio

voir thème Event-B

Une liste factuelle de vos activités

Administration et animation de la recherche

- Directrice adjointe de l’IUT en charge de la recherche depuis 2022
- membre du bureau du CNU27 jusqu’à novembre 2019
- vice-présidente du comité HCERES du LIP6 en novembre 2023
- membre de 18 comités de sélection PU ou MCF ou repyramidage (hors UPEC) depuis 2018
- coordinatrice du projet ANR FORMOSE
- coordinatrice locale des projets ANR DISCONT et EBRP
- membre du Conseil Scientifique du LIRMM (Montpellier) depuis 2022
- membre du Conseil Scientifique du GDR GPL depuis 2021
- Co-responsable du GT Ingénierie des Exigences du GDR GPL depuis 2015
- Membre du steering committee ABZ depuis 2002
- Membre du comité de pilotage de la conférence nationale AFADL depuis 2014
- Membre du comité éditorial de la revue ISI depuis 2008

Dissémination de la recherche : partage de connaissances avec le grand public, médiation scientifique, interface sciences et société (journée maths????)

Recherche et encadrement de la recherche

- nombre d’articles (voir sur HAL)
- 3 thèses soutenues
 - Steve Jeffrey Tueno Fotso : Vers une Approche Formelle d’Ingénierie des Exigences Outillée et Éprouvée. novembre 2016 - octobre 2019,
Directeurs : Régine Laleau (30%), Amel Mammar, Télécom Sud Paris, (30%), co-tutelle avec Marc Frappier, université de Sherbrooke, Québec (40%).
Financement thèse : projet ANR FORMOSE,
Situation actuelle : Ingénieur recherche-développement SAFRAN Paris.
 - Racem Bougacha : Une approche formelle pour la modélisation d’architectures de haut niveau de systèmes complexes alignées avec les modèles d’exigences. mai 2019 - juillet 2023 (doctorat de Centrale Lille à cause du financement)
Directeurs : Régine Laleau (70%), co-encadrement avec Simon Collart-Dutilleul, IFSTTAR, Ville-neuve d’Ascq (30%)
Financement thèse : IRT RAILENIUM
Situation actuelle : postdoc au CEA LIST
 - Meryem Afendi : A Correct by Construction Approach for the Modeling and the Verification of Cyber-Physical Systems in Event-B. septembre 2018 - décembre 2022
Directeurs : Régine Laleau (50%), co-encadrement avec Amel Mammar, Télécom Sud Paris (50%)
Financement thèse : Allocation doctorale
Situation actuelle : ingénieur recherche-développement Systerel Paris
- 2 thèses en cours :
 - Mariem Hammami : (cf Catalin)

- Amine Hamidi : Formalisation de la composante logicielle d'un transport ferroviaire autonome innovant. Démarrée en janvier 2023. (doctorat de Centrale Lille à cause du financement)
Directeurs : Régine Laleau (50%), co-encadrement avec Simon Collart-Dutilleul, COSYS/ESTAS, Université Gustave Eiffel, Villeneuve d'Ascq (50%)
Financement thèse : projet Flexmove (<https://ferromobile.fr>)
- Rapporteur de 12 thèses et 2 HDR, présidente de 5 thèses, examinatrice de 6 thèses et HDR
- Membres de PC de confs,
- Co-organisation de manifestations scientifiques :
 - Workshop FORMREQ 2019,20,21
 - Workshop KMOTS 2019
 - Workshop FE-CPS 2022
 - Séminaire de recherche international à Shonan, Japon, en novembre 2023 (<https://shonan.nii.ac.jp/seminars/205/>)
- relecteurs de journaux,
- profs invités
 - Professeure associée de l'Université de Sherbrooke depuis 2002, invitations à l'Université de Sherbrooke au Québec 2018, 2023
 - Université de Aarhus, Danemark, septembre 2023
- exposés invités
 - Conférence invitée au workshop Refine@FM2019,
 - Exposé invité au Royal Melbourne Institute of Technology en 2018
 - Invitation au séminaire Dagstuhl en 2023
- projets ANR :
 - coordinatrice du projet ANR FORMOSE (ANR-14-CE28-0009) : Méthode outillée de modélisation formelle des exigences pour des systèmes complexes critiques (<http://formose.lacl.fr>). 2014 - 2019. 4 partenaires (LACL, Institut Mines-Télécom, Thales, ClearSy), avec une aide financière de l'ANR de l'ordre de 800.000 euros. Budget pour le LACL : 156 000 €
 - Coordinatrice locale du projet ANR DISCONT (ANR-17-CE25-0005) : Intégration correcte de modèles discrets et continus (<https://discont.loria.fr>). 2017 – 2024. Partenaires : Institut Mines-Télécom, LACL, LORIA (coordinateur), IRIT, ClearSy. Budget pour le LACL : 143 000 €
 - Coordinatrice locale du projet ANR EBRP (ANR-19-CE25-0010-04) : Enhancing EventB and RODIN : EventB-RODIN-Plus. 2019 – 2026. Partenaires : IRIT (coordinateur), LACL, LORIA, CentraleSupélec/LRI, University of Southampton, University of Düsseldorf. Budget pour le LACL : 76 572 €

Valorisation, transfert, innovation : Contrat avec l'IRT RALENIUM 2020-2023 (financement d'une thèse et 20000€ de budget)

A.22 Adrien Le Coënt

A.23 Lynda Mokdad

Diffusion et rayonnement

Responsabilités éditoriales et de conférences

- Éditeur associé dans Wiley Security and Privacy journal (depuis 2017)
- Éditeur de la newsletter du comité IEEE Communication software (CommSoft committee) depuis 2012
- «Keynote Co-Chair» à IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC'22)
- «Liaison chair» à International Conference on Computing, Informatics and Cybersecurity (CCCI 2020)
- «Track co-chair» à International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC 2020)
- «Track co-chair» à 2nd International Conference on Advanced Communication Systems and Information Security (ACOSIS 2019)
- «Special sessions and Tutorials Chairs» de International Conference on WIreless Networks and Mobile COMmunications (WINCOM 2019)

- « Program co-chair» au workshop IEEE Wireless Sensor Networks : Theory and Applications for Environmental Issues (SeNTApE) 2018 et 2019
- « Steering committee chair» de IEEE Performance evaluation of communications in distributed systems and Web based service architectures (PEDISWESA) depuis 2018
- Comité de programme de plusieurs conférences

Responsabilités dans des sociétés savantes

- Membre de l'IEEE ComSoc "Awards Standing Committee" pour un mandat de 3 ans (2022-2024)
- Membre actif de l'IEEE Communication software (Commssoft committee) après avoir été Assesseur élue, vice-présidente élue et présidente élue

Prix et distinction

- Deux « Best paper award » aux conférences IEEE IWCNC 2022 et IEEE GlobeCom 2021.
- Technical Achievement Award par IEEE Communication Society en 2021.

Participation aux Jurys

- 4 jurys HdR (2 en tant rapporteur et 2 en tant qu'examinateur)
- 20 jurys de thèse (12 en tant que rapporteur et 8 en tant qu'examinateur)

Recherche et encadrement de la recherche

Publications Toutes mes publications sont sur HAL.

- 22 revues indexées depuis 2018 dont 20 sont référencées SJR Q1.
- 23 conférences internationales indexées avec comité de sélection et actes

Activités doctorales

Thèses soutenues

- Walid Serrai (inscrit à l'UPEC)
- El Habib Boudjema (inscrit à l'UPEC)

Thèses en cours

- Abdel Razak Hamadou (inscrit à l'UPEC)
- Mi Chen (inscrit à l'UPEC)
- Bouakouk Redha
- Mohamed Riadh Kadri

Outils

- VYPER (VulnerabilitY detection based on dynamic behavioral PattErn Recognition) à la la société SaveRiver. VYPER est un outil qui permet d'analyser un fichier binaire et de signaler toute vulnérabilité exploitabile qu'il trouve. Il est implémenté en utilisant le framework angr. (Thèse Cifre de El Habib Boudjema)
- Mulane : simulateur léger et extensible orienté agent spécialement conçu pour LoRaWAN avec interface graphique. (Thèse de Mi Chen, financement par le projet DIM RFSI).
- MELoNs : simulateur connecté au simulateur SUMO pour construire un réseau de surveillance du trafic. La connexion de MeLONS et SUMO établit l'application de cosimulation en temps réel du trafic et du réseau LoRaWAN.

Projets

- Projet ANR THEME (Transition vers l'Hybridation En MiagE (2020-2022), responsable du projet pour l'UPEC.
- Projet région DIM RFSI (2019-2021), sur "Energy and Performance Issues for a NEtwork in a Smart-city : EPINES " avec le laboratoire DAVID.

Autres

- Bénéficiaire de la PEDR et classée dans les 20% par le CNU en 2021
- Vice-présidente politique doctorale de sept. 2021 à mars 2024
- Membre titulaire élu au CNU 27 pour la période 2015-2019

A.24 Youssouf Oualhadj

Diffusion et rayonnement

Durant l'année 2021-2022 j'étais en détachement au *KRDB research centre for Knowledge-based Artificial Intelligence* en Italie.

Invitations

- En Avril 2024 séminaire au centre fédéré en vérification (ULB) Belgique.
- En Février 2024 j'ai visité le *Chennai Mathematical Institute* (CMI).
- En Février 2024 séminaire au laboratoire DAVID université de Versailles
- En février 2022 j'ai passé un mois à l'université de Mons (Belgique) en tant que professeur invité au sein du service de *mathématique effectives*.
- En mars 2020 j'ai été invité à faire un exposé à l'occasion du workshop : *ReLaX Workshop on Games* au *Chennai Mathematical Institute* (CMI).
- En juin 2018 j'ai passé un mois à l'université de Mons (Belgique) en tant que professeur invité au sein du service de *mathématique effectives*. Lors de ce séjour j'ai pu travailler avec Thomas Brihaye et Mickael Randour. Les travaux entamés pendant cette courte période ont donné lieu à la publication d'un article.

Comité de programme

J'ai été sollicité pour participer au comité de programme des conférences suivantes :

- International Joint Conference on Artificial Intelligence. IJCAI 2024
- International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. AAMAS 2024.
- International Joint Conference on Artificial Intelligence. IJCAI 2023
- International Joint Conference on Artificial Intelligence. IJCAI 2022
- International Joint Conference on Artificial Intelligence. IJCAI 2021
- International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. AAMAS 2020.
- International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. AAMAS 2019.
- International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. AAMAS 2018.

Relecture

Je suis régulièrement sollicité pour des relectures pour conférences et journaux suivants : FOSSACS, FSTTCS, ICALP, CSL, SR, LICS, CONCUR, MFCS, TACS, LMCS, ToCL, KR, STACS, etc.

J'ai été aussi sollicité par l'agence de recherche néerlandaise NWO comme expert scientifique pour l'évaluation d'un projet dans le cadre de l'appel à projet Veni grants pour l'année 2019. Cet appel vise à financer des programmes de recherches de jeunes chercheurs à hauteur de 250 000 euros.

Encadrement doctoral

- Avec Daniele Varacca j'encadre la thèse de Léo Tible. Dans cette thèse, on étudie la complexité du problème de model-checking pour des logiques temporelles. En particulier, on compare la complexité du model-checking universelle à la complexité du model-checking probabiliste. On essaye d'identifier des classes pour lesquelles le problème de model-checking est plus simple dans le cas universelle que dans le cas probabiliste.
- Mariem Hammami, encadrée avec Catalin Dima.
- Madalina Jitaru, inscription en thèse au 15/10/2021, arrêt de la thèse au 30/10/2023.
- Nicolas Lecomte, inscription en thèse au 1/10/2022, arrêt de la thèse au 1/12/2023.

Prénom	Nom	statut	composante	axe
Alexis	Bès	MCF	FST	LCP
Patrick	Cegielski	PR, émérite depuis septembre 2023	IUT SF	LCP
Julien	Cervelle	PR, directeur du LACL	FST	LCP
Laura	Fontanella	MCF depuis septembre 2020	IUT S puis FST	LCP
Julien	Grange	MCF depuis septembre 2021	FST	LCP
Florent	Madelaine	PR au LACL depuis septembre 2018, responsable équipe LCP depuis 2020	IUT SF	LCP
Luidnel	Maignan	MCF, délégation INRIA 2022-23	FST	LCP
Olivier	Michel	PR	EPISEN	LCP
Benoît	Monin	MCF, HdR en 2021, en disponibilité dans le privé depuis novembre 2022	IUT SF	LCP
Emmanuel	Polonowski	MCF	FSEG	LCP
Luc	Pélissier	MCF depuis septembre 2020	FD	LCP
Antoine	Spicher	MCF	FST	LCP
Pascal	Vanier	MCF au LACL, HdR en 2019, puis PR au GREYC à Caen depuis septembre 2022	FST	LCP
Pierre	Valarcher	PR, directeur adjoint du LACL, VP au numérique depuis 2022	IUT SF	LCP
Serghei	Verlan	MCF HdR, promu PR depuis septembre 2023	FST puis IUT SF	LCP
Benoit	Barbot	MCF	FST	SVS
Paul	Brunet	MCF	EPISEN	SVS
Damien	Busatto-Gaston	MCF	EPISEN	SVS
Joëlle	Cohen	MCF jusqu'à ???		SVS
Luc	Dartois	MCF	IUT SF	SVS
Catalin	Dima	PR, responsable de l'équipe SVS	FST	SVS
Frédéric	Gava	PR	EPISEN	SVS
Frédéric	Gervais	MCF	IUT SF	SVS
Christophe	Gnaho	MCF	Université Paris Descartes	SVS
Mehdi	Haddad	MCF	EPISEN	SVS
Gaétan	Hains	PR	FST	SVS
Régine	Laleau	PR	IUT SF	SVS
Adrien	Le Coënt	MCF	FST	SVS
Lynda	Mokdad	PR	FST	SVS
Fabrice	Mourlin	MCF	EPISEN	SVS
Youssouf	Oualhadj	MCF	FST	SVS
Nihal	Pekergin	PR	FST	SVS
Elisabeth	Pelz	PR	EPISEN	SVS
Farida	Semmak	MCF jusqu'à ?????	EPISEN	SVS
Anatol	Slissenko	PR émérite	FST	SVS
. Sovanna	Tan	MCF	FST	SVS
Daniele	Varacca	PR	FST	SVS

TABLE 1 : Listes des membres permanents du laboratoire par axe

B Détails

Prénom	Nom	statut	financement, projet et encadrement	devenir	axe
Théo	Grente	postdoctorant 09/2021 - 08/2022	projet ANR Difference, Julien Cervelle	IGR Univ Caen	LCP
Alexei	Barsukov	doctorant au LACL 2020-22 puis ATER 2022-23, thèse soutenue 2022	Florent Madelaine et Mamadou Kanté	Posdoc Prague	LCP
Aurore	Alcolei	postdoctorante 01/2022 - 05/2023	projet DIM RFSI, Luc Pélissier	IGR INRIA Rennes	LCP
Riccardo	Gozzi	postdoctorant 10/2023 - 08/2024	projet ANR Difference, Florent Madelaine	LACL	LCP
Richard	Matthews	postdoctorant 01/2022 - 04/2024	projet DIM RFSI, Laura Fontanella	University of Cambridge	LCP
Loïc	Germerie Guizouarn	ATER IUT SF 09/2023 - 08/2024	Luc Dartois		SVS
Pierre	Cry	Ingénieur d'étude 10/2021 - 09/2021	Benoît Barbot Projet ANR MAVERiQ	Thèse en cours à central Paris	SVS
Marco	Esposito	Postdoc commence juin 2024	Benoît Barbot Projet ANR CyphAI		SVS

TABLE 2 : Listes des membres non permanents

Prénom	Nom	statut	financement, projet et encadrement	devenir	axe
Zeyi	Shang	thèse soutenue en 2020	Serghei Verlan et Gexiang Zhang	Lecturer à School of Computer Science, Civil Aviation Flight University of China, Chengdu, Chine.	LCP
Paul-Elliot	Anglès d'Auriac	thèse soutenue en 2019	Pierre Valarcher et Benoît Monin	postdoc INRIA puis ingénieur chez Tarides	LCP
Tien Thao	Nguyen	thèse soutenue en 2021	Pierre Valarcher et Luidnel Maignan		LCP
Alexandre	Fernandez	doctorant, soutenance 2022	Pierre Valarcher et Luidnel Maignan		LCP
William	Gaudelier	doctorant depuis 10/2021	Julien Cervelle, Benoit Monin et Ludovic Patey (IMJ-PRG)	LACL	LCP
Ahmed	Mimouni	doctorant depuis 09/2022	Julien Cervelle	LACL	LCP
Éloi	Barbier	doctorant depuis 10/2022	Pierre Valarcher, Noé Wagener (MIL) et Luc Pellissier	MIL	LCP
Quentin	Le houérou	doctorant depuis 09/2023	Julien Cervelle	LACL	LCP
Fatemeh	Ghasemi	doctorante depuis 09/2023	projet ANR Difference et IUT SF, Florent Madelaine, Julien Grange et Mamadou Kanté (LIMOS)	LACL	LCP
Hong-linh	Anh-ton le	doctorant depuis 10/2023	Pierre Valarcher	LACL	LCP
Ada	Picano Nacci	doctorante depuis 10/2023	ANR JCJ COCONTENS , Julien Cervelle et Laura Fontanella	LACL	LCP
Jacopo	Furlan	doctorant depuis 10/2023	financé par Université Sorbonne Paris Nord, Damiano Mazza (labo LIPN Université Sorbonne Paris Nord) et Laura Fontanella (LACL)	LACL et LIPN	LCP

TABLE 3 : Listes des doctorants et docteurs

Prénom	Nom	statut	financement, projet et encadrement	devenir	axe
Steve	Jeffrey Tueno Fotso	thèse soutenue en 2019	ANR Formose, Régine Laleau	Ingénieur SAFRAN Paris	SVS
Meryem	Afendi	thèse soutenue en 2022	allocation doctorale, Régine Laleau	Ingénieur Systerel	SVS
Racem	Bougacha	thèse soutenue en 2023	IRT Railenium, Régine Laleau	Postdoc CEA LIST	SVS
Mariem	Hammami	doctorante depuis 2020	ANR DISCONT, Catalin Dima, Youssouf Oualhadj, Régine Laleau		SVS
Amine	Hamidi	doctorant depuis 01/2023	projet Flexmove, Régine Laleau		SVS
Dumitru-Bogdan	Prelipcean	doctorant depuis 10/2021	financement privé (BitDefender), Catalin Dima		SVS
El Habib	Boudjena	thèse soutenue en 2018	thèse Cifre, Lynda Mokdad		SVS
Walid	Serrai	thèse soutenue en 2020	bourse Profas B+, Lynda Mokdad		SVS
Mi	Chen	soutenance prévue 21 mai 2024	bourse China Scholarship Council, Lynda Mokdad		SVS
Abdel Razak	Hamadou	doctorant depuis janvier 2023	bourse de Tawfiq transport logistics Niger, Lynda Mokdad		SVS
Redha	Bouakouk	Depuis octobre 2019	bourse du gouvernement algérien, Lynda Mokdad		SVS
Mohamed Riadh	Kadri	Doctorant depuis octobre 2021	bourse du gouvernement algérien, Lynda Mokdad		SVS
Léo	Tible	allocation normalien, soutenance prévue en 2024, Daniele Varacca et Youssouf Oualhadj	MESRI		SVS

TABLE 4 : Listes des doctorants et docteurs (suite)