

**Projet ANR-18-CE40-0002**

**FANs — Foundations of (Boolean) Automata Networks**

Programme JCJC 2018

---

**Table des matières**

A	Identification	2
B	Résumé consolidé public	2
	B.1 Résumé consolidé public en français . . . . .	2
	B.2 Résumé consolidé public en anglais . . . . .	3
C	Mémoire scientifique	4
	C.1 Résumé du mémoire . . . . .	4
	C.2 Enjeux et problématique, état de l'art . . . . .	5
	C.3 Approche scientifique et technique . . . . .	5
	C.4 Résultats obtenus . . . . .	6
	C.5 Discussion . . . . .	9
	C.6 Conclusions . . . . .	9
	C.7 Références . . . . .	10
D	Liste des livrables	10
E	Impact du projet	10
	E.1 Indicateurs d'impact . . . . .	10
	E.2 Liste des publications et communications . . . . .	11
	E.3 Liste des éléments de valorisation . . . . .	14
	E.4 Bilan et suivi des personnels recrutés sur CDD (hors stagiaires) . . . . .	15

---

## A Identification

Acronyme du projet	FANs
Titre du projet	Foundations of (Boolean) Automata Networks
Coordinateur du projet	Sylvain Sené (Université d'Aix-Marseille – AMU)
Période du projet	01 janvier 2019 – 31 décembre 2023
Site web du projet	<a href="http://sylvain.sene.pages.lis-lab.fr/fans/">http://sylvain.sene.pages.lis-lab.fr/fans/</a>

Rédacteur de ce rapport et contact	
Civilité, prénom, nom	Monsieur Sylvain Sené
Téléphone	+33 (0)4 86 09 06 78
Courriel	<a href="mailto:sylvain.sene@lis-lab.fr">sylvain.sene@lis-lab.fr</a>
Date de rédaction	28 février 2025

Liste des partenaires présents à la fin du projet	Université d'Aix-Marseille – AMU (Sylvain Sené) <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Laboratoire d'informatique et des systèmes (LIS, UMR7020)</li> <li>◦ Institut de Mathématiques de Marseille (I2M, UMR7373)</li> <li>◦ Laboratoire d'informatique, signaux et systèmes de Sophia Antipolis (I3S, UMR7271)</li> </ul>
---	--

## B Résumé consolidé public

### B.1 Résumé consolidé public en français

#### FANs ou l'art d'analyser des réseaux d'entités en interaction pour ce qu'ils sont

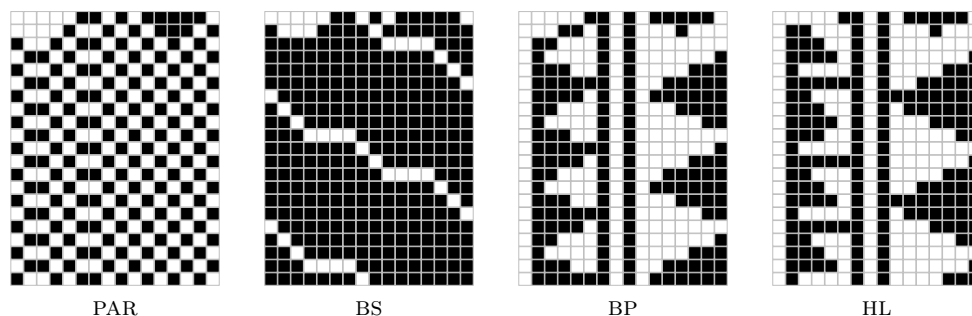
**Vers une théorie des réseaux d'entités en interaction par les réseaux d'automates** Le 20ème siècle a été marqué par une révolution conceptuelle : les comportements des systèmes observables sont plus liés aux interactions entre leurs entités qu'aux entités elles-mêmes. Bien que les réseaux d'entités en interaction (RI) occupent un espace grandissant, aussi bien dans l'univers scientifique que dans notre vie quotidienne, force est de constater que la plupart des recherches entreprises à leur sujet sont conduites en direction des applications ; tant et si bien qu'il existe aujourd'hui un gouffre entre les connaissances fondamentales et appliquées acquises sur les RI qui fait que les propriétés intrinsèques de ces derniers demeurent largement incomprises. L'effet miroir paradoxal de cet écart est qu'il limite l'évolution des applications et donc leur caractère innovant. Pour remédier à cette situation, FANs prône « un retour aux sources » et vise à faire émerger une théorie des RI pour mieux comprendre les processus effectifs de transmission d'informations et de calcul qui les gouvernent, en se fondant sur un modèle qualitatif parmi les plus abstraits (les réseaux d'automates – RA), et propose de le faire en alliant la théorie des systèmes dynamiques aux théories de la calculabilité et de la complexité.

**Une approche mêlant plusieurs théories chères à l'informatique fondamentale** FANs se distingue par une approche ajoutant à la vision classique des RA sous l'angle de la théorie des systèmes dynamiques une vision ancrée en informatique, associant les RA et leurs systèmes dynamiques sous-jacents au concept d'algorithmes et offrant ainsi des ponts entre leur définition (resp. leurs comportements) et le concept d'opérations élémentaires (resp. de calcul). Cette approche tire profit des outils historiques émanant des systèmes dynamiques (discrets), de la calculabilité et de la complexité. Son intérêt réside dans le fait que lorsque l'approche ancrée en théorie des systèmes dynamiques, à grand renfort de combinatoire, atteint ses limites analytiques et ne permet pas de casser certains verrous, la projeter dans l'univers de la calculabilité / complexité permet de changer de boîte à outils pour avancer malgré tout, soit en cassant lesdits verrous, soit en les contournant. À titre d'exemple, il est probable que nous ne parvenions jamais à résoudre la version discrète du 2nd volet du 16ème problème de Hilbert (un de nos « graals ») par des techniques analytiques (systèmes dynamiques) mais il est raisonnable de penser que nous réussirons dans ce cas à expliciter pourquoi (calculabilité et complexité).

**Résultats majeurs** Les résultats principaux de FANs sont les suivants : (1) la caractérisation de la complexité de certains problèmes liés au comptage du nombre des points fixes et des cycles limites de RA booléens ; (2) l'obtention d'un théorème de type Rice dans le cadre des RA montrant que les propriétés sont généralement d'une complexité élevée, et qu'il en existe d'arbitrairement hautes dans la hiérarchie polynomiale ; (3) la démonstration de propriétés calculatoires (en termes de simulation intrinsèque et de longueur de cycles limites) en lien avec la sensibilité au synchronisme de certaines familles de RA.

**Production** La production de FANs inclut 39 articles scientifiques publiés ou sous presse (revues et conférences internationales reconnus au sein de la communauté informatique fondamentale), auxquels s’ajoutent à ce jour 8 *preprints*, 3 chapitres d’ouvrage, 1 HDR et 3 thèses de doctorat. Ces résultats de recherche sont accessibles en ligne et s’inscrivent dans la quête d’une science plus ouverte. FANs a aussi été le terreau à l’origine de l’organisation en 2021 à Marseille d’un congrès international important pour notre communauté.

**Illustration** La figure suivante, tirée de [CI13], illustre le projet FANs à travers des diagrammes espace-temps d’une configuration prédéfinie de l’automate cellulaire élémentaire 178, en fonction de différents modes de mise à jour (le mode parallèle – PAR, un mode bloc-séquentiel – BS, un mode bloc-parallèle – BP et un mode à horloges locales – HL, respectivement). Elle met ainsi l’accent sur sa sensibilité au synchronisme et permet d’imaginer certains des ingrédients au cœur des études qui ont été menées au cours du projet en lien avec les concepts de simulation et de complexité asymptotique.



**Informations factuelles** Le projet FANs est un projet de recherche fondamentale coordonné par Sylvain Sené (Laboratoire d’informatique et des systèmes, LIS UMR7020). Il associe des chercheurs et enseignants-chercheurs du LIS, de l’I2M et de l’I3S. Le projet a commencé en janvier 2019 et a duré 60 mois (durée initiale de 48 mois à laquelle se sont ajoutées la prolongation de 6 mois due à la crise sanitaire liée au coronavirus et une prolongation de 6 mois à la demande des participants). Il a bénéficié d’une aide ANR de 187 482 euros pour un coût global de l’ordre de 1,9 million d’euros.

## B.2 Résumé consolidé public en anglais

### FANs – dynamics, complexity and computability in automata networks

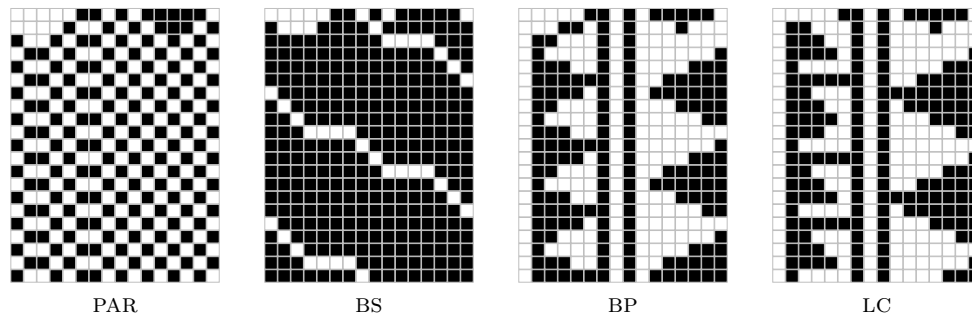
**Towards a theory of interaction networks by means of automata networks** The 20th century was marked by a conceptual revolution: the behaviours of observable systems are more linked to the interactions between their entities than to the entities themselves. Whilst networks of interacting entities (INs) occupy a growing space, both in the scientific world and in our daily life, it is necessary to note that most of the research undertaken on their subject is conducted towards applications; so much so that today there is a gulf between basics and applied knowledge acquired on the RI which means that intrinsic properties of the latter remain largely misunderstood. The paradoxical mirror effect of this gap is that it limits the evolution of applications and therefore their innovative character. To remedy this situation, FANs advocates “a return to basics” and aims to bring out a theory of INs to better understand the effective processes of information transmissions and calculations which govern them, by basing on one of the most abstract qualitative models (automata networks – ANs), and proposes to do so by combining dynamical systems theory to computability and complexity theories.

**An approach combining several theories dear to theoretical computer science** FANs distinguishes itself by an approach adding to the classic vision of ANs under the angle of dynamical system theory, a vision anchored in computer science, associating ANs and their underlying dynamical systems with the concept of algorithms and thus offering bridges between their definition (resp. their behaviours) and the concept of elementary operations (resp. computations). This approach takes advantage of historical tools emanating from (discrete) dynamical systems, computability and complexity. Its interest lies in the fact that when the approach anchored in dynamical system theory, with a lot of combinatorics, reaches its analytical limits and does not allow certain locks to be broken, projecting it into the universe of computability/complexity allows you to change the toolbox to move forward despite everything, either by breaking said locks or by bypassing them. For example, it is likely that we will never be able to solve the discrete version of the 2nd part of Hilbert’s 16th problem (one of our “grails”) by analytical techniques (dynamical systems) but it is reasonable to think that we will succeed in this case in explaining why (calculability and complexity).

**Main results** The main results of FANs are as follows: (1) the characterisation of the complexity of certain problems linked to the counting of number of fixed points and limit cycles of Boolean ANs; (2) obtaining a Rice-like theorem in the context of ANs showing that the properties are generally of high complexity, and there are arbitrarily high in the polynomial hierarchy; (3) the demonstration of computational properties (in terms of intrinsic simulation and length of limit cycles) linked to the sensitivity to synchronism of AN families.

**Production** The production of FANs includes 39 published or in press scientific articles (international journals and conferences recognized within the theoretical computer science community), to which are added to date 8 preprints, 3 book chapters, 1 habilitation and 3 doctoral theses. These research results are accessible online and are part of the quest of a more open science. FANs was also the breeding ground for the organization in 2021 in Marseille of an important international conference for our community.

**Illustration** The following figure, taken from [CI13], illustrates the FANs project through space-time diagrams of a predefined configuration of the elementary cellular automaton 178, according to different update modes (the parallel one – PAR, a block-sequential one – BS, a block-parallel one – BP and a local clock one – LC, respectively). It emphasizes its sensitivity to synchronism and allows to imagine some of the ingredients at the heart of the studies carried out during the project related to the concepts of simulation and asymptotic complexity.



**Facts** The FANs project is a fundamental research project coordinated by Sylvain Sené (Computer Science and Systems Laboratory, LIS UMR7020). It brings together researchers from LIS, I2M and I3S. The project started in January 2019 and lasted 60 months (initial duration of 48 months to which was added the 6-month extension due to the health crisis linked to coronavirus and a 6-month extension at the request of the participants). It benefited from ANR funding of 187,482 euros for a total cost of around 1.9 million euros.

## C Mémoire scientifique

### Mémoire scientifique confidentiel : non

#### C.1 Résumé du mémoire

Le 20ème siècle a été marqué par une révolution conceptuelle : les comportements des systèmes observables sont plus liés aux interactions entre leurs entités qu'aux entités elles-mêmes. Bien que les réseaux d'entités en interaction (RI) occupent un espace grandissant, aussi bien dans l'univers scientifique que dans notre vie quotidienne, force est de constater que la plupart des recherches entreprises à leur sujet sont conduites en direction des applications ; tant et si bien qu'il existe aujourd'hui un gouffre entre les connaissances fondamentales et appliquées acquises sur les RI qui fait que les propriétés intrinsèques de ces derniers demeurent largement incomprises. L'effet miroir paradoxal de cet écart est qu'il limite l'évolution des applications et donc leur caractère innovant. Pour remédier à cette situation, FANs prône « un retour aux sources » et vise à faire émerger une théorie des RI pour mieux comprendre les processus effectifs de transmission d'informations et de calcul qui les gouvernent, en se fondant sur un modèle qualitatif parmi les plus abstraits (les réseaux d'automates – RA).

Dans ce contexte, FANs s'appuie sur une approche ajoutant à la vision classique des RA sous l'angle de la théorie des systèmes dynamiques une vision ancrée en informatique, associant les RA et leurs systèmes dynamiques sous-jacents au concept d'algorithmes et offrant ainsi des ponts entre leur définition (resp. leurs comportements) et le concept d'opérations élémentaires (resp. de calcul). Cette approche tire profit des outils historiques émanant des systèmes dynamiques (discrets), de la calculabilité et de la complexité. Son intérêt réside dans le fait que lorsque l'approche ancrée en théorie des systèmes dynamiques, à grand renfort de combinatoire,

atteint ses limites analytiques et ne permet pas de casser certains verrous, la projeter dans l'univers de la calculabilité / complexité permet de changer de boîte à outils pour avancer malgré tout, soit en cassant lesdits verrous, soit en les contournant.

Les résultats principaux obtenus dans le cadre de FANs sont les suivants : (1) la caractérisation de la complexité de certains problèmes liés au comptage du nombre des points fixes et des cycles limites de RA booléens; (2) l'obtention d'un théorème de type Rice dans le cadre des RA montrant que les propriétés sont généralement d'une complexité élevée, et qu'il en existe d'arbitrairement hautes dans la hiérarchie polynomiale; (3) la démonstration de propriétés calculatoires (en termes de simulation intrinsèque et de longueur de cycles limites) en lien avec la sensibilité au synchronisme de certaines familles de RA.

## C.2 Enjeux et problématique, état de l'art

FANs traite des RA, qui sont informellement des systèmes d'entités (les automates) à états discrets qui évoluent au cours du temps, lui aussi discret [McCulloch1943, vonNeumann1966], qu'on définit au moyen d'ensembles de fonctions locales de transition (une par automate) et auxquels on associe des graphes d'interaction (ou GI, représentant les connexions entre les automates) et des modes de mise à jour (ou MMJ, définissant la manière dont sont exécutées les fonctions locales au cours du temps). Les enjeux initiaux de FANs étaient formulés autour des trois thèmes complémentaires :

- 1) Simulation intrinsèque — Bien que bien développé dans le contexte des automates cellulaires [Guillon2010, Arrighi2013], des pavages et de l'auto-assemblage [Meunier2014, Woods2015], le concept de simulation intrinsèque n'a jusque là que peu été abordé dans le contexte des RA [Tchuente1986, Melliti2016, Bridoux2017, Perrot2018]. Un premier objectif de FANs est d'augmenter la connaissance fondamentale autour de cette notion dans le contexte des RA pour mieux comprendre leurs propriétés de modularité / compositionnalité et parvenir à de premières classifications en fonction de leurs capacités à simuler.
- 2) Relations architecture/structure — Ce thème est plus classique. L'objectif est d'étudier les relations entre les caractéristiques syntaxiques des RA (fonctions locales de transition, GI) et leurs propriétés sémantiques (systèmes dynamiques), notamment asymptotiques, et s'articulent sur deux axes non sans lien abordant des aspects :
  - de caractérisation dynamique [Thomas1981, Goles1985, Aracena2004, Richard2007, Remy2008, Jarrah2010, Richard2010, Gadouleau2016]; et
  - de combinatoire [Aracena2008, Richard2009, Demongeot2012, Noual2012, Gadouleau2015, Aracena2017, Aracena2017b, Richard2018].
- 3) Sensibilité au synchronisme — Il s'agit d'un thème transversal aux deux précédents, dont l'objectif est de comprendre pourquoi et comment l'organisation des mises à jour des états des automates des RA dans le temps influence leur dynamique [Goles2008, Aracena2009, Goles2010, Aracena2013b, Noual2018].

## C.3 Approche scientifique et technique

**Contexte partenarial** En tant que projet JCJC, FANs est un projet mono-partenaire (AMU). Toutefois, les membres de FANs sont par ailleurs membres de trois équipes de trois laboratoires différents.

**LIS – équipe CANA (calcul naturel)** Les membres du LIS impliqués dans FANs sont initialement Florian Bridoux (doctorant), Kévin Perrot (MCF), Pacôme Perrotin (doctorant) et Sylvain Sené (PR). Ils sont rejoints au cours du projet par Antonio E. Porreca (MCF), Guilhem Gamard (postdoc) et Martín Ríos-Wilson (doctorant). Leurs activités de recherche se déclinent sur l'ensemble des domaines du projet : systèmes dynamiques, combinatoire, complexité et calculabilité.

**I2M – équipe GDAC (géométrie, dynamique, arithmétique, combinatoire)** Les membres de l'I2M impliqués dans FANs sont Pierre Guillon (CR CNRS) et Guillaume Theyssier (CR CNRS). Leurs activités de recherche traitent en particulier de systèmes dynamiques, de complexité et de calculabilité, avec des compétences complémentaires sur des modèles de calcul connexes aux RA : les automates cellulaires, les pavages et l'auto-assemblage.

**I3S – équipe MC3 (modèles de calcul, complexité et combinatoire)** Le membre de l'I3S impliqué dans FANs est Adrien Richard (CR CNRS). Ses activités de recherche portent en particulier sur les systèmes dynamiques et la combinatoire.

### Méthodes et outils, et mise en commun des forces

**Science en 4 dimensions** Notre approche scientifique se fonde avant tout sur le travail en groupe (et en sous-groupe) et la mise en commun de nos connaissances et de nos compétences, lors de réunions en présence avec un tableau pour exposer les idées et avancer sur celles-ci. C’est pour nous le socle et le terreau de nos activités de recherche, qui ont bien sûr été particulièrement impactées par la crise sanitaire liée au coronavirus entre mars 2020 et juin 2021. Toutefois, la grande majorité des résultats que nous avons obtenus dans le cadre de FANs sont bien issus de cette approche de « la science en 4D ».

**Méthodologie** Concernant le premier thème, dédié au concept de simulation intrinsèque, étant donné son caractère particulièrement novateur dans le cadre des RA, notre approche a consisté dans un premier temps à organiser (voire à cloisonner) notre travail en nous fondant sur nos recherches passées sur les modes de mise à jour et sur la modularité des RA, afin de contourner certaines difficultés plus globales. Par ailleurs, nous nous sommes aussi largement inspirés de la littérature relative aux modèles de calcul naturel voisins tels que les automates cellulaires, les pavages et leur auto-assemblage.

Sur le second thème ayant trait aux propriétés dynamiques des RA et à leurs relations avec les caractéristiques syntaxiques de ces derniers (fonctions locales et/ou GI), la méthodologie a consisté à ajouter des contraintes de différentes natures définies selon le type de question posée. Il a pu s’agir de contraintes sur les RA eux-mêmes (sur les espaces d’états locaux, sur les familles de fonctions locales – *i.e.* bijectives, conjonctives, monotones...), sur les GI (symétriques ou non, à largeur arborescente bornée ou non, à structures particulières ou non...) ou encore sur les familles de modes de mise à jour considérés (déterministes ou non, parallèle, bloc-séquentiel, bloc-parallèle, à horloges locales...).

Dans le cadre du troisième thème relatif à la sensibilité structurelle des RA, nous nous sommes focalisés pour l’essentiel de nos travaux sur les modes de mise à jour déterministes périodiques, que ce soit pour développer notre compréhension déjà avancée de l’impact des modes de mise à jour bloc-séquentiels ou pour obtenir de premiers résultats sur des modes de mise à jour nouveaux et plus complexes, que nous avons éventuellement introduits, comme les modes bloc-parallèles et les modes à horloges locales.

Enfin, nous devons souligner que, pour ces trois thèmes :

1. les dynamiques des RA ont systématiquement été appréhendées comme des processus calculatoires ; et
2. lorsqu’une question portant sur les propriétés dynamiques ou combinatoires des RA amenait à une situation de blocage, elle était reformulée de manière à pouvoir apporter une réponse à un problème connexe de complexité.

## C.4 Résultats obtenus

Les recherches menées dans le cadre de FANs ont permis d’avancer sur l’ensemble de tâches fournies dans la proposition initiale. La présentation des résultats qui suit s’articule selon les thèmes évoqués dans les sections C.2 et C.3, sachant que ces derniers s’alimentent les uns les autres. Nous faisons par ailleurs le choix de ne mentionner que des travaux qui sont soit les plus aboutis, soit les plus prometteurs.

**Simulations intrinsèques et propriétés calculatoires** Le concept de simulation intrinsèque vise à faire des liens de correspondance entre dynamique, calculabilité et complexité au sein d’une même famille de modèles. Au cours du projet, nous n’avons eu de cesse de le développer et de travailler à obtenir des propriétés de telles simulations sur les RA en nous posant divers problèmes dont certains sont résumés ci-dessous.

Dans [CI3], nous nous intéressons à la simulation intrinsèque dans les RA définis comme des fonctions  $f : \llbracket q \rrbracket^n \rightarrow \llbracket q \rrbracket^n$ , où  $\llbracket q \rrbracket = \{0, \dots, q-1\}$  désigne les états possibles de chaque automate. Plus précisément, nous étudions la simulation pas à pas de tels RA évoluant en parallèle par de tels RA évoluant selon des modes de mise à jour (MMJ) bloc-séquentiels (en distinguant le parallèle, les asynchrones et les séquentiels). Nous montrons entre autres que, pour tout  $q \geq 3$ , il existe des RA non simulables séquentiellement ; pour tout  $q$ , il n’existe pas de RA universel pour la simulation asynchrone des réseaux non-bijectifs ; cependant, il existe un RA universel pour cette même simulation si l’on double la taille de l’alphabet du simulateur.

Dans [JI15] (généralisation et extension de [Bridoux2017], lui-même dans ligne de [Tchuente1986]), nous nous intéressons au même type de simulation et posons la question du coût de la séquentialisation d’un réseau d’automates : étant donné un RA  $f$  évoluant selon le MMJ parallèle, quel est le plus petit réseau  $g$ , en termes de nombre d’automates le composant, tel que  $g$  simule pas à pas et séquentiellement la dynamique de  $f$  ? Nous montrons qu’il faut au moins  $n/3$  automates en plus et que, si  $q \geq 4$ , il faut au moins  $n/2 - \log_q(n)$  ; que  $n/2 - \log_q(n/2 + 1)$  est une borne supérieure dans le cas général ; et que le coût de séquentialisation est inférieur à la *pathwidth* du GI associé à  $f$ . Ce travail est aussi présenté dans la thèse de F. Bridoux [T1].

Dans une série de trois articles [P5, P6, P7], observant qu’il existe pour certains RA des liens étonnants entre leur complexité et leurs propriétés dynamiques, nous étudions trois familles de RA (les réseaux à seuil, les réseaux algébriques et les réseaux “totalistiques”), choisies pour avoir des comportements distincts et variés.

Cette étude se fonde sur des types de simulation intrinsèque (entre RA et entre familles de RA) et le concept d'universalité intrinsèque, introduits et analysés par ailleurs afin de répondre à des questions fondamentales pour la théorie des RA : quels sont les liens entre leurs complexités dynamique et calculatoire ? quelles sont les familles qui exhibent des complexités maximales et pourquoi ? quel est l'impact de familles de MMJ périodiques sur ces propriétés de complexité ? Ce travail est aussi présenté dans la thèse de M. Ríos-Wilson [T3].

Dans une autre série de trois articles [JI14, CI4, CI10], nous introduisons le formalisme des modules assemblables, démontré comme étant complet. Dans ce cadre, nous montrons que tout RA booléen (RAB) peut être simulé par un assemblage de modules, ce qui amène à montrer que tout RAB est simulable par un RAB monotone. Nous étudions aussi en profondeur les modules acycliques, qui forment des briques de base pour l'analyse de la dynamique des RAB. Nous nous en servons pour construire un pipeline algorithmique qui, partant d'un RAB  $f$ , le réduit en un RAB  $f'$  de taille minimale admettant une dynamique asymptotique isomorphe à celle de  $f$ . Bien que peu convaincant en pratique, ce pipeline souligne la puissance des modules acycliques, et permet d'ouvrir des questions de complexité particulièrement inspirantes, comme le problème de synthèse de modules, dont nous montrons qu'il est coNP-difficile et qu'il est dans  $\text{FNP}^{\text{coNP}}$ , mais dont il reste à découvrir s'il est dans  $\text{FcoNP}$  ou  $\text{NP}^{\text{coNP}}$ -difficile. Ce travail est au cœur de la thèse de P. Perrotin [T2].

Dans [CI12] (qui s'inspire du travail réalisé sur les modules), à l'inverse de [JI15] en quelque sorte, nous partons de n'importe quel RA évoluant selon n'importe quel MMJ bloc-séquentiel, et nous souhaitons trouver un RA si possible de plus petite taille qui évolue en parallèle et qui conserve les cycles limites du premier (à isomorphisme près). Nous construisons un algorithme solutionnant cette question. Bien que non utilisable dans le cas général (il nécessite de résoudre un problème coNP-complet), nous mettons en évidence qu'il est particulièrement efficace, tant en termes de complexité que de réduction effective, pour les réseaux composés de cycles s'intersectant tangentiellement. Ce résultat est prometteur, dans le sens où ces réseaux généralisent les double-cycles étudiés dans [Demongeot2012, Noual2012b] qui ont permis de souligner la capacité des intersections de cycles de rétroaction à réduire le nombre d'attracteurs des RA.

**Relations architecture/structure et complexité** Les questions propres aux relations entre les propriétés syntaxiques et sémantiques sont au centre des études menées sur les RA depuis leur introduction dans les années 1940. C'est un axe de recherche auquel nous avons apporté des contributions importantes pour le domaine dont certaines sont résumées ci-dessous.

Dans [JI1], nous nous intéressons aux RA nilpotents. Étant donné un GI  $G$  et un RA degré-borné (dans lequel chaque automate a un nombre d'états possibles au plus égal à son degré sortant plus un dans  $G$ ), nous montrons que, si  $G$  n'est pas un cycle, alors il existe un RA nilpotent associé à  $G$ . Ce résultat montre que, étant donné un RA degré-borné, on ne peut pas déduire directement de son GI s'il admet une dynamique parallèle complexe.

La propriété d'expansivité de la dynamique, énonçant que l'observation de la séquence d'états de n'importe quel automate suffit pour déterminer la configuration initiale du RA, est quant à elle au cœur de [JI4]. Entre autres résultats, nous y caractérisons les GI admettant au moins un RA expansif et nous montrons que l'expansivité est une propriété générale des RA linéaires sur ces GI sous réserve que le nombre d'états possibles des automates soit suffisamment grand.

Les réseaux « coagulants » (*freezing* en anglais), en particulier utiles pour la modélisation de propagation épidémique, de percolation *bootstrap*, de croissance de cristal..., sont abordés pour la première fois dans [CI8] qui s'inspire des travaux présentés dans le contexte des automates cellulaires (AC) [Becker2018]. Nous montrons que le nombre d'états ( $Q$ ), la largeur arborescente ( $T$ ) et le degré maximum ( $D_{\text{MAX}}$ ) sont des paramètres syntaxiques ayant une incidence capitale sur la complexité de ces réseaux en nous fondant sur un problème de décision, le *specification checking problem* (SPEC), généralisant des problèmes classiques tels que les problèmes de prédiction, de prédécesseur, de nilpotence, et d'accessibilité asynchrone. Nous montrons notamment que SPEC est dans NC quand  $Q$ ,  $T$  et  $D_{\text{MAX}}$  sont bornés et qu'il est  $W[2]$ -difficile quand  $Q$  (ou  $T$ ) est le seul paramètre et que les autres sont fixés.

Le théorème de stabilité des points fixes énonce que, étant donné un RA  $f$  et  $\pi$  le MMJ parallèle associé, l'ensemble  $\text{FP}(f, \pi)$  des points fixes de  $(f, \pi)$  est inclus dans  $\text{FP}(f, \mu)$ , avec  $\mu$  n'importe quel MMJ. Ainsi, les points fixes sont relativement stables vis-à-vis des MMJ, ce qui n'est pas le cas des cycles limites. Nous avons fait le choix d'aborder le problème du comptage des attracteurs sous l'angle de la théorie de la complexité, en nous focalisant sur les RAB. Dans [CI1], nous nous intéressons à la complexité du problème du nombre maximum de points fixes, formulable ainsi : étant donné un GI  $G$ , existe-t-il un RAB qui l'admet et qui a au moins  $k$  points fixes ? Selon la valeur de  $k$  et si  $k$  appartient ou non à l'entrée, on montre que ce problème est dans P ou complet pour NP,  $\text{NP}^{\#P}$ , ou NEXPTIME. Ce travail est détaillé dans [JI16], et étendu au problème dual du nombre minimum de points fixes que l'on peut formuler ainsi : étant donné un GI  $G$ , existe-t-il un RAB qui l'admet et qui a au plus  $k$  points fixes ? En fonction de la valeur de  $k$ , de s'il est ou non donné en entrée et de si le degré de  $G$  est borné, nous montrons que ce problème est complet pour  $\text{NP}^{\text{NP}}$ ,  $\text{NP}^{\#P}$ , ou NEXPTIME. Dans [CI6], on s'intéresse au problème suivant, portant lui sur les cycles limites : étant donné un RAB  $f$ , existe-t-il un MMJ

bloc-séquentiel tel que  $f$  a au moins (n'a pas) un cycle limite de période  $k$ ? Nous montrons que la version « au moins » de ce problème est NP-complète, et que sa version « n'a pas » est  $\text{NP}^{\text{NP}}$ -complète, et ce quel que soit  $k$ . Enfin, dans la même ligne [JI19], nous montrons que décider si un RAB conjonctif  $f$  a un cycle limite de longueur  $k$  est NP-complet quand  $k$  est un paramètre et qu'il est dans P quand le GI de  $f$  est fortement connexe. Par ailleurs, pour ces mêmes réseaux, le problème « a au moins » précédent reste NP-complet.

Enfin, dans [CI7], nous obtenons un théorème de type Rice pour les RA. Pour rappel, le théorème de Rice énonce que toute propriété non-triviale de la fonction calculée par une machine de Turing est indécidable [Rice1953]. Dans le cadre des RA, on énonce le méta-théorème suivant : toute propriété non-triviale de la fonction calculée par un RA a une complexité calculatoire élevée. Plus précisément, ce méta-théorème prend forme à travers les résultats suivants : (i) la plupart des propriétés sur les configurations limites sont PSPACE-complètes ; (ii) faire la différence entre un RA ayant un faible nombre de configurations limites et un autre en ayant un grand nombre est PSPACE-complet ; (iii) si une propriété sur la dynamique d'un RA peut s'exprimer par une formule en logique du premier ordre, alors sa complexité est soit bornée, soit NP-difficile, soit coNP-difficile.

**Sensibilité au synchronisme** Un MMJ organise les mises à jour locales dans le temps. Étant donné un RA  $f$  composé de  $n$  automates, les MMJ essentiellement abordés dans la littérature jusque là sont : (i) dans le cadre déterministe, les MMJ bloc-séquentiels définis par des partitions ordonnées de l'ensemble d'automates ; (ii) dans le cadre non-déterministe, les MMJ parfaitement asynchrones définis tels que chaque configuration admet une transition sortante par mise à jour atomique possible. Un RA  $f$  associé à un MMJ  $\mu$  définit le système dynamique  $(f, \mu)$ . Bien sûr, les dynamiques d'un RA  $f$  varient selon  $\mu$  et l'étude de sa sensibilité structurelle, que l'on appelle aussi la sensibilité au synchronisme de  $f$  par abus de langage, revient justement à analyser ces différences.

Dans ce contexte, en restant dans un cadre « classique », nous avons étudié l'influence des MMJ bloc-séquentiels sur la famille des automates cellulaires élémentaires (ACE) périodiques, qui sont des RA cycliques uniformes. Il en ressort [CI2,JI0, JI11] une classification complète des 256 ACE (dont 88 admettent des dynamiques distinctes à symétrie près) selon leur sensibilité au synchronisme. Pour mieux comprendre l'influence des MMJ bloc-séquentiels, nous nous sommes plongés dans le cadre plus général des RA à ensembles finis d'états locaux uniformes. Nous inspirant des travaux sur les graphes de mise à jour initiés dans [Aracena2009], nous nous sommes intéressés dans [CI5] au problème du comptage des classes d'équivalence des dynamiques bloc-séquentielles et avons montré qu'il s'agit d'un problème  $\#P$ -complet (donc « intractable ») dans le cas général, mais qu'il est possible d'y trouver des solutions de manière efficace pour certaines classes de GI tels que les graphes cactus orientés et les graphes série-parallèles.

Nous nous sommes aussi intéressés à des MMJ plus complexes. Dans [JI5], nous mettons en exergue que les MMJ bloc-séquentiels ne capturent pas certaines richesses comportementales existant dans le contexte de la régulation génétique comme l'existence de *timers* engendrés par la régulation elle-même. Nous montrons que leur dual, les MMJ bloc-parallèles, définis comme des ordres partitionnés, le permettent et mettons cela en évidence sur deux exemples : la morphogenèse végétale et le rythme cardio-respiratoire. Ces nouveaux modes de mise à jour sont particulièrement intéressants du point de vue des degrés de liberté qu'ils confèrent au réseau, grâce notamment à leur capacité à répéter les mises à jour atomiques au sein des périodes. Nous avons d'ailleurs souligné qu'ils s'agit de modes « basiques » permettant d'engendrer des points fixes, propriétés que les MMJ bloc-séquentiels n'ont pas. Pour aller plus loin, nous nous sommes intéressés à certaines propriétés combinatoires de ces MMJ et avons proposé dans [CI4] une énumération des classes d'équivalence des dynamiques qu'ils induisent au regard des relations de simulation pas à pas et de simulation asymptotique. Nous les avons aussi étudiés du point de vue de complexité : dans [P8], nous montrons que lorsque les RAB évoluent selon des MMJ bloc-parallèles, les problèmes de décision classiques NP-complets dans le cas bloc-séquentiel deviennent pour la plupart PSPACE-complets.

Dans [J6], on introduit le modèle des RA booléens (RAB) à mémoire. Il s'agit de RAB dont les automates possèdent des délais définissant le nombre d'étapes de temps au cours desquelles ils demeurent à l'état 1 une fois activés par l'exécution de leur fonction locale. On montre l'insensibilité structurelle de certaines familles de RAB à mémoire : ceux dont le GI est acyclique, les disjonctifs (le seul opérateur booléen autorisé dans les fonctions locales est le OR), ceux dont la fonction globale de transition est (dé)croissante. Par ailleurs, dans [CI9], nous montrons que les dynamiques des réseaux à mémoire peuvent être simulées par une sous-classe de transitions élémentaires, c'est-à-dire par un sous-graphe de la dynamique asynchrone générale et donc un MMJ non-déterministe.

En nous replaçant dans le contexte des ACE, nous présentons dans [CI13] une nouvelle façon de mesurer la sensibilité structurelle des réseaux, dans la ligne de [T3]. En particulier, pour différents types de MMJ périodiques, allant des classiques (les bloc-séquentiels) aux plus récents et plus complexes (les bloc-parallèles et les MMJ à horloges locales qui sont tels que chaque automates admet sa propre période et son propre délai transient avant d'entrer en régime périodique), nous étudions leur influence en analysant la période de leurs plus longs cycles limites que nous assimilons à leur complexité dynamique asymptotique. Nous montrons ainsi



des bornes de complexité pour ces différents MMJ, et mettons en exergue des sauts de complexité frappants (depuis des complexités constantes jusqu'à des complexités super-polynomiales) entre les familles de MMJ, qui souligne des transitions de phase d'expressivité en fonction des MMJ.

## C.5 Discussion

Les résultats obtenus dans le cadre du projet FANs sont dans l'ensemble très positifs. Les objets mathématiques que nous présentions comme étant centraux dans la proposition initiale du projet (les RA, les GI, les MMJ, les systèmes dynamiques sous-jacents et les graphes de transition qui les représentent), ont tous été analysés en profondeur, à travers les 3 grands axes thématiques que nous avons mis en avant : la simulation intrinsèque, les liens entre les aspects syntaxiques et sémantiques (relations architecture/structure), et la sensibilité au synchronisme.

Concernant la simulation intrinsèque, malgré les résultats nouveaux et prometteurs obtenus sur la pertinence et la puissance de ce concept quand il s'agit de mieux comprendre les propriétés dynamiques d'un système, il demeure qu'une direction initialement évoquée n'a été que très peu abordée au cours de ces 4 ans : la simulation intrinsèque entre RA lorsque seuls les GI sont donnés en entrée. Cette problématique reste cruciale pour le futur, aussi bien du point de vue théorique que du point de vue des applications, en particulier en biologie puisque seuls les GI peuvent en général être inférés depuis les expérimentations « pailleasse ». Sur ce thème également, contrairement à ce que nous avons annoncé, nous n'avons pas produit la *survey* sur la simulation intrinsèque. Ce point est discuté dans la section D. Malgré cela, nos travaux ouvrent des perspectives riches et nombreuses, autour de nouvelles définitions de simulation, de questions d'universalité intrinsèque, de la bloc-parallélisation des RA et plus généralement des équivalences dynamiques en lien avec les variations de synchronisme.

Sur le plan des avancées vis à vis des relations architecture/structure, les résultats ont été nombreux et de diverses natures. Ils ouvrent par ailleurs la voie à de nouveaux travaux dans la ligne de ceux que nous avons développés, en adaptant nos méthodes et en étendant nos résultats à d'autres familles de GI, d'autres familles de RA, et en retournant les questions : très souvent, on part des RA et de leur GI et on essaie de comprendre les dynamiques sous-jacentes ; une piste intéressante serait par exemple de savoir ce que l'on peut dire des RA et des GI lorsque l'on connaît un ensemble de dynamiques ; de même, continuer le travail mené dans [JI21] visant à savoir ce que l'on peut dire de l'ensemble des GI des RA isomorphes à un RA  $f$ , et qui semble particulièrement riche. Cependant, malgré les belles avancées réalisées, les questions sur l'influence des cycles de rétroaction positifs et négatifs sur le nombre d'attracteurs restent à ce jour non résolues. Il s'agit de questions particulièrement compliquées et nous le savions avant que le projet commence ; pour contourner les trop grandes difficultés, nous avons choisi d'aborder ces questions sous l'angle de la théorie de la complexité, ce qui a permis d'obtenir des résultats profonds importants pour le domaine, qui éclairent par ailleurs les raisons pour lesquelles ces difficultés existent.

Enfin, sur l'axe de la sensibilité au synchronisme, nous avons fait un grand pas en avant par rapport à ce qui existait avant FANs. En particulier, nous avons introduit et analysé en profondeur de nouveaux MMJ comme les blocs-parallèles ou encore les horloges locales. Notre intérêt était double : (i) trouver des MMJ, suffisamment « simples » dans leur définition, ouvrant de nouvelles perspectives de recherche, comme la capacité à générer des points fixes, à créer des sauts de complexité dynamique asymptotique... ; (ii) développer de nouvelles méthodes pour bien comprendre leur impact sur la dynamique des RA, utilisant aussi bien des techniques provenant de la combinatoire énumérative, de la théorie de la complexité ou de la théorie de la calculabilité. Il s'agit là d'un axe réellement transversal aux deux précédents qui pose la question fondamentale en science informatique de l'impact du synchronisme/asynchronisme sur les calculs exécutés par des machines, qui aurait par ailleurs difficilement pu être plus développé en la durée du projet que ce qu'il a été. Mais nous sommes loin d'avoir fait le tour de cette question générale de la sensibilité structurelle pour laquelle les problèmes ouverts restent très nombreux et réclament toujours plus d'abstractions et de nouveaux outils de compréhension.

## C.6 Conclusions

Le projet FANs visait à développer substantiellement la théorie des réseaux d'entités en interaction au moyen des réseaux d'automates. La proposition initiale était particulièrement ambitieuse car portant sur une très grande variété de questions. Le projet n'a pas parfaitement suivi l'ordonnancement prévu et certains sujets ont clairement pris l'ascendant sur d'autres, en raison des différentes discussions et intuitions que nous avons pu avoir au fil des années. Malgré cela, la richesse et la profondeur des résultats obtenus au cours de ces cinq années, en quantité comme en qualité, souligne selon nous que FANs est une réelle réussite.

Au delà des résultats scientifiques, le projet FANs a aussi été une magnifique occasion de rassembler et de co-construire en région PACA un groupe de recherche soudé particulièrement actif dans un domaine histo-

rique et central de l'informatique fondamentale, fondé sur les liens forts que cette dernière entretient avec les mathématiques (discrètes). Nul doute que ce groupe poursuivra à l'avenir ses collaborations à travers d'autres projets.

## C.7 Références

## D Liste des livrables

Date de livraison	N°	Titre	Nature	Partenaires	Commentaires
01/02/19	1	Site web du projet	Site web	AMU	cf. site web de FANs
24/03/19	2	Rapport à mi-parcours	Rapport	AMU	cf. document
12-17/07/21	3	Organisation des événements AUTOMATA & WAN 2021	Événement	AMU	cf. site web dédié
31/12/23	4	44 productions (37 articles, 3 chapitres, 1 HDR et 3 thèses)	Publication scientifique	AMU	cf. sections E.1 et E.2
< 01/03/24	5	Compte-rendu final	Rapport	AMU	
	6	<i>Survey</i> simulation	Article	AMU	cf. commentaire en dessous du tableau

**Commentaire relatif à la *survey* autour du concept de simulation** Nous avons prévu de faire une *survey* (sous la forme d'un article) sur le concept de simulation intrinsèque dans les modèles de calcul naturel, qui aurait initialement dû être livrée au cours du 1er semestre 2021. Cette *survey* visait à replacer le concept lui-même dans l'univers des systèmes dynamiques émanant de modèles de calcul naturel. L'objectif était de trouver une définition la plus générale possible de simulation (intrinsèque ou non) capturant tous les types de simulation concevables dans les systèmes dynamiques à temps discret, d'en développer des restrictions utiles, et d'aller jusqu'à prouver le pouvoir expressif de certaines classes de réseaux en termes de ces simulations. Nous avons indiqué le report de sa livraison à fin 2022 lors du rapport à mi-parcours. Bien que nous ayons déjà compilé une grande liste d'articles traitant de différents modèles, en comparant les différentes formalisations du concept de simulation qu'ils impliquent implicitement ou explicitement et bien avancé aussi sur la définition générale de simulation, nous ne sommes pas en mesure de la livrer aujourd'hui dans le format que nous espérons au départ.

Cela vient avant tout d'un choix que nous avons fait. En effet, plutôt que d'utiliser notre temps collectif de recherche sur la rédaction de cette *survey*, nous avons décidé, au cours du 2nd semestre 2021, de préférer organiser nos efforts afin d'accorder la priorité aux idées nouvelles et aux résultats importants que ces dernières ont permis d'obtenir. Toutefois, nous maintenons notre souhait de parvenir à terme à une rédaction aboutie (elle est déjà bien commencée, nous estimons avoir fait environ 75% du travail) d'un article de *survey*. En attendant que cela soit fait, des éléments sur les concepts de simulation (intrinsèque) sont présentés dans les trois thèses qui ont été soutenues par nos doctorants membres de FANs, Florian Bridoux, Pacôme Perrotin, Martín Ríos-Wilson. En particulier, les chapitres 2 et 3 de la thèse de Pacôme Perrotin sont dédiés au sujet, et remplacent à ce jour cette *survey*.

## E Impact du projet

### E.1 Indicateurs d'impact

Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)

		Publications
International	Revue à comité de lecture	25 articles [JI1, JI2, JI3, JI4, JI5, JI6, JI7, JI8, JI9, JI10, JI11, JI12, JI13, JI14, JI15, JI16, JI17, JI18, JI19, JI20, JI21, JI22, JI23, JI24, JI25]
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage	3 chapitres [BI1, BI2, BI3]
	Communications (conférences)	9 conférences invitées et 14 papiers [II1, II2, II3, CI1, CI2, CI3, CI4, CI5, CI6, CI7, II4, II5, II6, II7, CI8, CI9, CI10, CI11, II8, CI12, II9]
Actions de diffusion	Articles de vulgarisation	
	Conférences de vulgarisation	2 conférences [V1, V2]
	Autres	3 thèses, 1 HDR et 8 preprints [T1, T2, T3, H1, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8]

### Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)

	Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)
Colloques scientifiques	AUTOMATA & WAN 2021

## E.2 Liste des publications et communications

### Articles de revue internationale (multi-(sous)partenaires)

- [JI1] Adrien Richard. Nilpotent dynamics on signed interaction graphs and weak converses of Thomas' rules. *Discrete Applied Mathematics*, 267 : 160-175, 2019. doi pdf
- [JI2] Adrien Richard. Positive and negative cycles in Boolean networks. *Journal of Theoretical Biology*, 463 : 67-76, 2019. doi pdf
- [JI3] Julio Aracena, Maximilien Gadouleau, Adrien Richard et Lilian Salinas. Fixing monotone Boolean networks asynchronously. *Information and Computation*, 274 : 104540, 2020. doi pdf
- [JI4] Florian Bridoux, Maximilien Gadouleau et Guillaume Theyssier. Expansive automata networks. *Theoretical Computer Science*, 843 : 25-44, 2020. doi pdf
- [JI5] Jacques Demongeot et Sylvain Sené. About block-parallel Boolean networks: a position paper. *Natural Computing*, 19 : 5-13, 2020. doi pdf
- [JI6] Enrico Formenti et Kévin Perrot. How hard is it to predict sandpiles on lattices? A survey. *Fundamenta Informaticae*, 171 : 189-219, 2020. doi pdf
- [JI7] Eric Goles, Fabiola Lobos, Gonzalo A. Ruz et Sylvain Sené. Attractor landscapes in Boolean networks with firing memory. *Natural Computing*, 19 : 295-319, 2020. doi pdf
- [JI8] Viet-Ha Nguyen, Kévin Perrot et Mathieu Vallet. NP-Completeness of the Game Kingdomino<sup>TM</sup>. *Theoretical Computer Science*, 822 : 23-35, 2020. doi pdf
- [JI9] Kévin Perrot, Marco Montalva-Medel, Pedro P. Balbi de Oliveira et Eurico L. P. Ruivo. Maximum sensitivity to update schedule of elementary cellular automata over periodic configurations. *Natural Computing*, 19 : 51-90, 2020. doi pdf
- [JI10] Kévin Perrot et Éric Rémila. On the emergence of regularities on one-dimensional decreasing sandpiles. *Theoretical Computer Science*, 843 : 1-24, 2020. doi pdf
- [JI11] Eurico L. P. Ruivo, Pedro P. Balbi de Oliveira, Marco Montalva-Medel et Kévin Perrot. Maximum sensitivity to update schedules of elementary cellular automata over infinite configurations. *Information and Computation*, 274 : 104538, 2020. doi pdf
- [JI12] Eric Goles, Diego Maldonado, Pedro Montealegre et Martín Ríos Wilson. On the complexity of asynchronous freezing cellular automata. *Information and Computation*, 281 : 104764, 2021. doi pdf
- [JI13] Eric Goles, Pedro Montealegre et Kévin Perrot. Freezing sandpiles and Boolean threshold networks: equivalence and complexity. *Advances in Applied Mathematics*, 125 : 102161, 2021. doi pdf
- [JI14] Kévin Perrot, Pacôme Perrotin et Sylvain Sené. On Boolean automata networks (de)composition. *Fundamenta Informaticae*, 181 : 163-188, 2021. doi pdf
- [JI15] Florian Bridoux. Sequentialization and procedural complexity in automata networks. *Theoretical Computer Science*, 898 : 92-109, 2022. doi pdf
- [JI16] Florian Bridoux, Amélia Durbec, Kévin Perrot et Adrien Richard. Complexity of fixed point counting problems in Boolean networks. *Journal of Computer and System Sciences*, 126 : 138-164, 2022. doi pdf

- [JI17] Eric Goles, Marco Montalva-Medel, Pedro Montealegre et Martín Ríos-Wilson. On the complexity of generalized Q2R automaton. *Advances in Applied Mathematics*, 138 : 102355, 2022. doi pdf
- [JI18] Kévin Perrot, On the complexity of counting feedback arc sets. *Chicago Journal of Theoretical Computer Science*, no 1 : 1-8, 2022. doi pdf
- [JI19] Julio Aracena, Florian Bridoux, Luis Gómez et Lilian Salinas. Complexity of limit cycles with block-sequential update schedules in conjunctive networks. *Natural Computing*, 22 : 411-429, 2023. doi pdf
- [JI20] Julio Aracena, Adrien Richard et Lilian Salinas. Synchronizing Boolean networks asynchronously. *Journal of Computer and System Sciences*, 136 : 249-279, 2023. doi pdf
- [JI21] Florian Bridoux, Kévin Perrot, Aymeric Picard Marchetto et Adrien Richard. Interaction graphs of isomorphic automata networks I: complete digraph and minimum in-degree. *Journal of Computer and System Sciences*, 138 : 103458, 2023. doi pdf
- [JI22] Aurélien Naldi, Adrien Richard et Elisa Tonello. Linear cuts in Boolean networks. *Natural Computing*, 22 : 431-451, 2023. doi pdf
- [JI23] Pacôme Perrotin. Associating parallel automata network dynamics and strictly one-way cellular automata. *Natural Computing*, 22 : 453-461, 2023. doi pdf
- [JI24] Adrien Richard et Elisa Tonello. Attractor separation and signed cycles in asynchronous Boolean networks. *Theoretical Computer Science*, 947 : 113706, 2023. doi pdf
- [JI25] Pierre Siegel, Andrei Doncescu, Vincent Risch et Sylvain Sené. Representation of gene regulation networks by hypothesis logic-based Boolean systems. *The Journal of Supercomputing*, 79 : 4556-4581, 2023. doi pdf

### Chapitres d'ouvrage international (mono-(sous)partenaires)

- [BI1] Jacques Demongeot, Tarek Melliti, Mathilde Noual, Damien Regnault et Sylvain Sené. On Boolean automata isolated cycles and tangential double-cycles dynamics. Chapitre de *Automata and Complexity*, Springer Series on Emergence, Complexity, Computation 42 : 145-178, 2022. doi pdf
- [BI2] Jérémy Fersula, Camille Noûs et Kévin Perrot. Sandpile toppling on Penrose tilings: identity and isotropic dynamics. Chapitre de *Automata and Complexity*, Springer Series on Emergence, Complexity, Computation 42 : 117-143, 2022. doi pdf
- [BI3] Loïc Paulevé et Sylvain Sené. Boolean networks and their dynamics: the impact of updates. *Systems Biology Modelling and Analysis: Formal Bioinformatics Methods and Tools*, 173-250, 2022. doi pdf

**Conférences internationales invitées** À l'exception de [II9], toutes les conférences invitées qui suivent le sont au sens des mathématiques (ce sont des *workshops* où l'ensemble des orateurs sont invités par les organisateurs).

- [II1] Kévin Perrot. Complexity and fixed points in Boolean networks. *International Conference on Algorithms, Optimization and Learning in Dynamic Environments* (AOL'19), 4 mars 2019. lien
- [II2] Kévin Perrot. Complexity of attractor problems in Boolean networks. *Online Workshop The Automata Factory 2*, 14 novembre 2019. lien
- [II3] Pacôme Perrotin. Adding inputs to automata networks. *Online Workshop The Automata Factory 2*, 14 novembre 2019. lien
- [II4] Florian Bridoux. Complexity of limit cycle problems in conjunctive networks with different schedules. *International Workshop on Boolean Networks* (IWB'20), 8 janvier 2020. lien
- [II5] Antonio Porreca. Composing behaviours in the semiring of dynamical systems. *International Workshop on Boolean Networks* (IWB'20), 10 janvier 2020. lien
- [II6] Adrien Richard. Synchronizing Boolean networks asynchronously. *International Workshop on Boolean Networks* (IWB'20), 8 janvier 2020. lien
- [II7] Guillaume Theyssier. Expansive automata networks. *Online Workshop The Automata Factory 3*, 27 novembre 2020. lien
- [II8] Kévin Perrot. Complexities of automata networks. *Online Workshop The Automata Factory 4*, 9 décembre 2021. lien
- [II9] Kévin Perrot. Sandpile models and P-completeness. *The 29th International Workshop on Cellular Automata and Discrete Complex Systems* (AUTOMATA'23), 1er septembre 2023. lien

**Papiers de conférence internationale**

- [CI1] Florian Bridoux, Nicolas Durbec, Kévin Perrot et Adrien Richard. Complexity of maximum fixed point problem in Boolean networks. *Proceedings of the 15th International Conference of the Computability in Europe Association (CiE'19)*, volume 11558 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 132-143, Springer, 2019. doi pdf
- [CI2] Pedro P. Balbi de Oliveira, Enrico Formenti, Kévin Perrot, Sara Riva et Eurico L. P. Ruivo. Non-maximal sensitivity to synchronism in periodic elementary cellular automata: exact asymptotic measures. *Proceedings of the 26th International Workshop on Cellular Automata and Discrete Complex Systems (AUTOMATA'20)*, volume 12286 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 14-28, Springer, 2020. doi pdf
- [CI3] Florian Bridoux, Maximilien Gadouleau et Guillaume Theyssier. On simulation in automata networks. *Proceedings of the 16th International Conference of the Computability in Europe Association (CiE'20)*, volume 12098 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 277-288, Springer, 2020. doi pdf
- [CI4] Kévin Perrot, Pacôme Perrotin et Sylvain Sené. On the complexity of acyclic modules in automata networks. *Proceedings of the 16th International Conference on Theory and Applications of Models of Computation (TAMC'20)*, volume 12337 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 168-180, Springer, 2020. doi pdf
- [CI5] Kévin Perrot, Sylvain Sené et Lucas Venturini. #P-completeness of counting update digraphs, cacti, and series-parallel decomposition method. *Proceedings of the 16th International Conference of the Computability in Europe Association (CiE'20)*, volume 12098 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 326-338, Springer, 2020. doi pdf
- [CI6] Florian Bridoux, Caroline Gaze-Maillet, Kévin Perrot et Sylvain Sené. Complexity of limit-cycle problems in Boolean networks. *Proceedings of the 47th International Conference on Current Trends in Theory and Practice of Computer Science (SOFSEM'21)*, volume 12607 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 135-146, Springer, 2021. doi pdf
- [CI7] Guilhem Gamard, Pierre Guillon, Kévin Perrot et Guillaume Theyssier. Rice-like theorem for automata networks. *Proceedings of the 41st International Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science (STACS'21)*, volume 187 de *Leibniz International Proceedings in Informatics*, pages 32:1-32:17, Schloss Dagstuhl – Leibniz-Zentrum für Informatik, 2021. doi pdf
- [CI8] Eric Goles, Pedro Montealegre, Martín Ríos-Wilson et Guillaume Theyssier. On the impact of treewidth in the computational complexity of freezing dynamics. *Proceedings of the 17th International Conference of the Computability in Europe Association (CiE'21)*, volume 12813 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 260-272, Springer, 2021. doi pdf
- [CI9] Loïc Paulevé et Sylvain Sené. Non-deterministic updates of Boolean networks. *Proceedings of the 27th International Workshop on Cellular Automata and Discrete Complex Systems (AUTOMATA'21)*, volume 90 de *Open Access Series in Informatics*, pages 90: 10:1-10:16, Schloss Dagstuhl – Leibniz-Zentrum für Informatik, 2021. doi pdf
- [CI10] Kévin Perrot, Pacôme Perrotin et Sylvain Sené. Optimising attractor computation in Boolean automata networks. *Proceedings of the 15th International Conference on Language and Automata Theory and Applications (LATA'21)*, volume 12638 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 68-80, Springer, 2021. doi pdf
- [CI11] Aymeric Picard Marchetto et Adrien Richard. Isomorphic Boolean networks and dense interaction graphs. *Proceedings of the 27th International Workshop on Cellular Automata and Discrete Complex Systems (AUTOMATA'21) Exploratory Papers*, 9:1-9:13, HAL, 2021. pdf
- [CI12] Pacôme Perrotin et Sylvain Sené. Turning block-sequential automata networks into smaller parallel networks with isomorphic limit dynamics. *Proceedings of the 19th International Conference of the Computability in Europe Association (CiE'23)*, volume 13967 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 214-228, Springer, 2023. doi pdf
- [CI13] Isabel Donoso Leiva, Eric Goles, Martín Ríos-Wilson, Sylvain Sené. Asymptotic (a)synchronism sensitivity and complexity of elementary cellular automata. To appear in *Proceedings of the The 16th Latin American Theoretical Informatics Symposium (LATIN'24)*, volume 14578 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages inconnues à ce jour, Springer, 2024. pdf
- [CI14] Kévin Perrot, Sylvain Sené et Léah Tapin. Combinatorics of block-parallel automata networks. *Proceedings of the 49th International Conference on Current Trends in Theory and Practice of Computer Science (SOFSEM'24)*, volume 14519 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 442-455, Springer, 2024. doi pdf

## Thèses d'habilitation à diriger des recherches

- [H1] Kévin Perrot. *Études de la complexité algorithmique des réseaux d'automates*. Université d'Aix-Marseille, 2022. [pdf](#)

## Thèses de doctorat

- [T1] Florian Bridoux. *Simulations intrinsèques et complexités dans les réseaux d'automates*. Université d'Aix-Marseille, 2019. [pdf](#)
- [T2] Pacôme Perrotin. *Simulation entre modèles de calcul naturel et modularité des réseaux d'automates*. Université d'Aix-Marseille, 2021. [pdf](#)
- [T3] Martín Ríos-Wilson. *On automata networks dynamics: an approach based on computational complexity theory*. Universidad de Chile et Université d'Aix-Marseille, 2021. [pdf](#)

## Preprints

- [P1] François Doré, Enrico Formenti, Antonio Porreca et Sara Riva. Decomposition and factorisation of transients in functional graphs, 2023. [pdf](#)
- [P2] Guilhem Gamard, Pierre Guillon, Kévin Perrot et Guillaume Theyssier. Hardness of monadic second-order formulae over succinct graphs, 2023. [pdf](#)
- [P3] Eric Goles, Pedro Montealegre, Martín Ríos-Wilson et Sylvain Sené. Dynamical stability of threshold networks over undirected signed graphs, 2023. [pdf](#)
- [P4] Antonio Porreca et Ekaterina Timofeeva. Polynomial-delay generation of functional digraphs up to isomorphism, 2023. [pdf](#)
- [P5] Martín Ríos-Wilson et Guillaume Theyssier. Intrinsic universality in automata networks I: families and simulations, 2023. [pdf](#)
- [P6] Martín Ríos-Wilson et Guillaume Theyssier. Intrinsic universality in automata networks II: glueing and gadgets, 2023. [pdf](#)
- [P7] Martín Ríos-Wilson et Guillaume Theyssier. Intrinsic universality in automata networks III: on symmetry versus asynchrony, 2023. [pdf](#)
- [P8] Kévin Perrot, Sylvain Sené, Léah Tapin. Complexity of Boolean automata networks under block-parallel update modes, 2024. [pdf](#)

## Conférences de vulgarisation

- [V1] Sylvain Sené. Le calcul naturel au service des sciences de la vie, et vice-versa! École MPCIS Science et santé, 2019. [lien](#)
- [V2] Kévin Perrot. Some fun around cellular automata. C@fé ADSTIC, 2021. [lien](#)

## E.3 Liste des éléments de valorisation

Au cours du projet, nous avons organisé en juillet 2021 au centre international des rencontres mathématiques (CIRM, UAR822) à Marseille le congrès international AUTOMATA & WAN 2021 qui joignait deux événements :

- AUTOMATA'21 : le 27ème *International Workshop on Cellular Automata and Discrete Complex Systems*. Bien qu'appelé workshop, AUTOMATA est la conférence de ma communauté, placée sous l'égide du groupe de travail 1.5 de l'*International Federation for Information Processing* (IFIP), et réunit en moyenne une quarantaine de collègues chaque année. Elle suit les standards d'organisation des conférences internationales en informatique avec actes et comité de programme.
- WAN'21 : le *Workshop on Automata Networks*. Ce workshop a été organisé sur invitations, comme le veut la coutume en mathématiques. Il s'est pleinement inscrit dans le cadre du projet FANs qui l'a partiellement financé.

Ce congrès s'est déroulé du 12 au 17 juillet 2021, sous forme hybride, et a réuni une centaine de collègues du monde entier (48 sur site et 51 à distance), parmi lesquels un nombre conséquent de pointures du domaine à l'international.

#### E.4 Bilan et suivi des personnels recrutés sur CDD (hors stagiaires)

Cette partie contenant des données personnelles, elle n'est pas reproduite ici.