

Fédération de recherche MathSTIC – FR 3734 CNRS

Dossier scientifique

LABORATOIRES :

LAGA, UMR 7539
LIPN, UMR 7030
L2TI, EA 3043

RESPONSABLE DE LA STRUCTURE :

ROBERTO WOLFLER CALVO
<mailto:roberto.wolfler@univ-paris13.fr>
01 4940 4071

MOTS CLÉS :

MATHÉMATIQUES, INFORMATIQUE, STIC

<http://mathstic.univ-paris13.fr>

26 mai 2023

UNIVERSITÉ SORBONNE PARIS NORD

CNRS



1 Contexte scientifique

La fédération de recherche MathSTIC a été créée en janvier 2014. D’abord structure fédérative de l’université Sorbonne Paris Nord (USPN), elle est depuis janvier 2016 une fédération de recherche labellisée par le CNRS – FR 3734, INS2I-INSMI. La mise en place de cette fédération de recherche s’inscrit dans le projet de l’USPN de créer un véritable centre de recherche dans les domaines **des mathématiques et des sciences et technologies de l’information et de la communication** au cœur de la partie Nord de l’Île-de-France, plus précisément sur le site de Villetaneuse. Quatre axes de recherches ont été définis :

-  Axe 1 : **Optimisation et Apprentissage appliqués aux contenus numériques**
-  Axe 2 : **Calcul Haute-Performance, Systèmes distribués**
-  Axe 3 : **Physique mathématique, Physique statistique, Combinatoire**
-  Axe 4 : **Catégories : entre calcul et topologie**

Le quatrième Axe a été créé en 2022. Au-delà de ces axes, la fédération de recherche a vocation à promouvoir toutes les recherches développées à l’interface de trois laboratoires : LAGA, LIPN, L2TI.

1.1 Laboratoires impliqués

L’objectif de la fédération est de favoriser les recherches croisées mathématiques-STIC et leurs applications, et de faire émerger des recherches innovantes à l’interface de 3 laboratoires : le **LAGA**, le **LIPN**, le **L2TI**.

Le **LAGA**–UMR 7539, INSMI-CNRS¹– se compose d’une combinaison à parts égales d’une composante dédiée aux mathématiques pures et d’un ensemble d’équipes de mathématiques appliquées. En effet, le laboratoire dispose d’équipes se consacrant à certaines des branches les plus théoriques des mathématiques (géométrie algébrique, arithmétique ou topologie algébrique). D’autres chercheurs s’intéressent aux systèmes dynamiques, à la physique mathématique et aux équations aux dérivées partielles. Par ailleurs, de nouvelles lignes de recherche interdisciplinaires se sont développées grâce à la forte présence au LAGA d’équipes spécialisées en modélisation et calcul scientifique, probabilités et statistiques, mathématiques pour le traitement de l’information et de l’image, trois domaines qui sont au cœur des axes définis pour MathSTIC. Le LAGA compte aujourd’hui 190 personnes dont 92 enseignants-chercheurs ou chercheurs (dont une dizaine de chercheurs CNRS), 45 doctorants, 7 personnels ITA et BIATSS d’aide à la recherche (1 RAF (CNRS), 3 gestionnaires (2 techniciennes CNRS, 1 technicienne AENES), 1 bibliothécaire (AI USPN), 1 ingénieur Informaticien responsable du parc informatique (AI CNRS), et 50% d’une ingénieure ASR (IE USPN) mutualisée avec le LIPN), sans compter les visiteurs, post-doc (environ plus de trente visiteurs étrangers et post-docs par an), ATER ou stagiaires pour des durées d’un mois à un an. Le laboratoire est structuré en huit équipes de recherche dont une équipe transverse (MBI) :

- AGA, Arithmétique et Géométrie Algébrique
- AGC3, Algèbre, Géométrie, Combinatoire et applications à la Cryptographie et au Codage (AGC3)
- MBI, Mathématiques pour la Biologie et les Images
- MCS, Modélisation et Calcul Scientifique
- PM-EDP, Physique Mathématique et Équations aux Dérivées Partielles
- PS, Probabilités et Statistiques
- TESD, Théorie Ergodique et Systèmes Dynamiques
- TA, Topologie Algébrique

Une large part des compétences du **LIPN**–UMR 7030, INS2I-CNRS²– est mise en œuvre dans les axes de la fédération. Ainsi différents domaines de la combinatoire sont abordés par une de ses équipes, en alliant des compétences algébriques, analytiques et de physique théorique. L’équipe d’apprentissage couvre un large spectre de domaines utiles pour l’axe 1 : apprentissage supervisé, non supervisé, apprentissage par renforcement. L’équipe traitant des algorithmes et de l’optimisation combinatoire, fédérée autour de la résolution des problèmes « difficiles » d’optimisation combinatoire et la conception d’algorithmes pour les systèmes distribués et le calcul haute performance, a toute sa place sur les axes 1 et 2. Il convient d’ajouter que des compétences fortes existent aussi en spécifications de systèmes et pour l’aide à la modélisation, ainsi qu’en théorie des catégories et en complexité algébrique. Les recherches sont effectuées dans cinq équipes par 84 permanents (chercheurs et enseignants-chercheurs), pour la plupart en poste à l’université Paris 13, que ce soit à l’Institut Galilée ou à l’IUT de Villetaneuse. Au-delà, c’est plus de 220 personnes qui participent à l’activité du laboratoire avec 11,1 administratifs et techniciens, plus de 50 doctorants, plus de 20 post-doctorants ou ingénieurs affectés à des projets de recherche, sans compter chercheurs invités

1. www.math.univ-paris13.fr

2. <https://lipn.univ-paris13.fr/>

et stagiaires. Les cinq équipes ont des sujets de recherche présentant de nombreux points de rencontre naturels :

- A3, Apprentissage Artificiel et Applications
- AOC, Algorithmes et Optimisation Combinatoire
- CALIN, Combinatoire, Algorithmique et Interactions
- LoVe (ex-LCR), Logique et Vérification
- RCLN, Représentation des Connaissances et Langage Naturel

La création du **L2TI**-EA 3043³, en 1998, reflète la volonté politique de l'université SPN de se positionner dans le domaine des STIC (Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication). Le L2TI a choisi de travailler plus spécifiquement sur deux domaines avec les équipes suivantes :

- Multimedia
- Réseaux

Le L2TI compte maintenant 17 enseignants-chercheurs permanents, 17 doctorants, 2 post-doctorants, une secrétaire, un ingénieur d'étude et en moyenne 6 stagiaires, de 5 à 6 mois, et trois professeurs invités par an. Les problématiques de recherche abordées dans les 2 équipes du L2TI concernent très largement les axes de la fédération MathSTIC. Son équipe Réseaux aborde ainsi des aspects liés à l'axe 2 sur les systèmes distribués. Son équipe Multimedia étudie des questions relatives à la représentation et au traitement du signal, de l'image ou de séquences vidéo, elle est aussi concernée par l'analyse des réseaux sociaux ou encore par la surveillance et la fusion de données.

La mise en place de la fédération de recherche a instauré une dynamique de recherches grâce aux complémentarités des laboratoires (par exemple entre apprentissage, optimisation et analyse d'images, entre optimisation et réseaux pour le positionnement des infrastructures sans fil, ou encore entre chercheurs venant des mathématiques et de l'informatique sur l'analyse des structures discrètes). Le fait que cette interdisciplinarité puisse être fructueuse est devenu à la fois réaliste et nécessaire. Réaliste quand les domaines de recherche sont partagés par plusieurs disciplines (comme pour les probabilités discrètes), nécessaire quand les applications requièrent des compétences multiples (comme en déploiement de réseaux, ou pour le calcul haute performance distribué).

1.2 Contexte scientifique local, positionnement régional/national/international

Avec 3 laboratoires regroupant 200 enseignants-chercheurs et chercheurs, 2 UMR⁴ associées au CNRS et 1 EA⁵, l'implantation scientifique sur le site de Villeteuse est substantielle. Il s'agit du seul pôle de recherche mathématiques-STIC créé au nord de Paris. L'importance quantitative et qualitative des laboratoires permet à la fois une visibilité scientifique à l'intérieur de chacun des domaines mathématiques et STIC, mais aussi des recherches à l'interface de ces deux domaines. Les 3 laboratoires forment par ailleurs le « groupe » mathématiques-STIC au sein de l'École Doctorale Galilée, ED 146.

Enfin, un financement de 13,18 M€ a été octroyé dans le cadre du CPER 2015-2020 pour la construction de la première moitié d'un bâtiment, originellement pour le LAGA et le LIPN, et repensé pour accueillir à terme les 3 laboratoires. Le financement (18,1 M€) de la seconde moitié a été obtenu dans le cadre du CPER 2021-2027. Le bâtiment est en cours de construction et devrait être livré entre le printemps 2024 (1ère tranche) et le l'automne 2025 (2ème tranche).

Au plan régional, s'il n'existe pas de fédération de ce type, on peut néanmoins citer la « fédération de recherche en mathématiques de Paris Centre » qui regroupe les laboratoires de mathématiques de Paris 6 et 7, ainsi que le laboratoire d'informatique de Paris 7. Par ailleurs des Labex associent des laboratoires de mathématiques et d'informatique, c'est le cas du Labex BÉZOUT de Marne-la-Vallée orienté vers des applications pour la santé ou la ville. Au plan national, il existe des fédérations similaires : fédération Charles-Hermite à Nancy, Mires en Poitou-Charentes. Ces fédérations ont permis des recherches fécondes aux interfaces, et de consolider l'attractivité de ces sites.

Au-delà de cet aspect régional ou national, l'objectif est de donner à la fédération une dimension internationale en ciblant certains sujets, en se donnant les moyens (par des invitations, des projets européens ou des PHC) de produire une recherche innovante aux croisements de ces disciplines. Il est également important de souligner que cette fédération a aussi vocation à développer des recherches, pour certaines d'entre elles, en amont ou en aval de recherches interdisciplinaires (par exemple en imagerie du vivant, en logistique et transport, en traitement des langues) puisque les laboratoires participent à

3. <http://www-l2ti.univ-paris13.fr/>

4. UMR : Unité Mixte de Recherche

5. EA : Équipe d'Accueil

différents Labex, GDR ou instituts. Enfin, en cohérence avec l'Ecole Doctorale, nous cherchons à conforter et développer les formations doctorales, tant localement qu'à travers des participations à l'international (master USTH au Vietnam, Informatique à Madagascar, écoles de type CIMPA⁶).

1.3 Réalité du besoin

La « société du numérique » est une des priorités de la Stratégie Nationale de la Recherche, évoquée dans l'agenda stratégique « France 2030 » et dans le programme « Horizon Europe » de la Communauté Européenne, et reprise comme un des « grands défis sociétaux » par l'ANR dans son plan d'action. On retrouve dans ces programmes les mots-clefs au cœur de cette fédération MathSTIC : gestion des masses de données, calcul haute performance, recherches à la frontière des connaissances et développement de démarches intégrant. Les 3 laboratoires ont des compétences complémentaires sur ces sujets à fort potentiel recherche, tant pour les applications innovantes qui pourraient en découler (par exemple haute performance, réseaux, image) que pour la complémentarité des approches (mathématiques / informatique théorique, apprentissage / optimisation / traitement d'images). La mise en place de la fédération a favorisé les collaborations inter-laboratoires et a permis de mieux impliquer les chercheurs en favorisant les échanges et les recherches communes. Elle fournit, en effet, les moyens pour financer des recherches croisées ambitieuses que les laboratoires n'ont pas la possibilité d'entreprendre individuellement. Cette fédération est aussi un lieu de réflexion plus global sur les politiques collectives à mener.

1.4 Caractère structurant pour l'Université Sorbonne Paris Nord

La fédération répond à deux points forts pour la structuration de la recherche en mathématiques et STIC à l'université Sorbonne Paris Nord :

- La mise en place de la fédération structure *de facto* le domaine mathématiques-informatique-STIC sur l'université Sorbonne Paris Nord, en y associant l'ensemble des chercheurs concernés par ces domaines.
- La structure correspond à la « maison » MathSTIC au sein de l'école doctorale. Parmi les objectifs importants de la fédération de recherche figurent la consolidation des formations doctorales dans ce domaine, ainsi que l'amélioration de l'attractivité des masters du domaine. À noter que les 3 laboratoires participent activement au master STIC à l'USTH (Vietnam).

Les objectifs de cette fédération sont les suivants :

- accompagner les projets scientifiques ;
- organiser des journées et des mini-cours, selon chaque axe dans le but d'une meilleure connaissance mutuelle ;
- organiser des workshops thématiques ouverts ;
- accroître l'ouverture à l'international par des actions de formation (p.ex. écoles internationales) et des accueils d'étudiants étrangers ;
- développer les interactions scientifiques dans le cadre de la maison MathSTIC à l'intérieur de l'Ecole Doctorale.

1.4.1 Master EUR M&CS

En parallèle, de la Fédération MathSTIC, l'Université Sorbonne Paris Nord a mis en place un Master EUR « *Mathematic and Computer Science* (M&CS) » qui a obtenu un financement de 4,45 M€ sur la période 2020-2028, dont environ :

- 40% pour le personnel : bourses de doctorat, chargés de projet, heures complémentaires ;
- 50% pour la mobilité : 30 bourses de master par an, missions, mobilité sortante des étudiants ;
- 10% pour les missions et la gestion du projet : 8 semaines pour professeurs invités par an, organisation de séminaires, colloques, etc., missions de comités, prospection, frais de gestion.

Les objectifs du master sont les suivants :

- formation à la recherche :
 - recruter d'excellents étudiants attirés par la recherche ;
 - renforcer les activités d'initiation à la recherche en master ;
 - développer l'accès au doctorat pour les étudiants de nos masters ;
- ouverture à l'international :
 - inciter à la mobilité entrante/sortante ;
 - augmenter la visibilité internationale des masters et de l'école doctorale ;

6. Centre International de Mathématiques Pures et Appliquées, www.cimpa-icpam.org

- promouvoir des partenariats ;
- interaction et pluridisciplinarité :
 - développer les interactions en master/doctorat des labos MathSTIC
 - promouvoir des enseignements et des collaborations pluridisciplinaires
 - favoriser la flexibilité des cursus et les méthodes d’enseignement innovantes.

2 Rapport scientifique 2017–2022

2.1 Organisation : gouvernance et management

Le pilotage de la fédération de recherche MathSTIC est assuré par un **comité de direction** constitué du responsable de la structure, des directeurs de laboratoires et des responsables d’axes. Chaque axe a deux responsables scientifiques qui ont une charge d’animation et de gestion budgétaire. Le comité de direction se réunit au minimum 3 fois par an. Il définit une répartition des crédits sur les axes, la gestion par axe étant assurée par ses responsables scientifiques. La gestion financière, administrative et technique est actuellement assurée par le gestionnaire du LIPN.

- responsable de la fédération : R. Wolfler Calvo
- responsables par axe :
 - Axe 1 : A. Mokraoui (L2TI) et J. Le Roux (LIPN)
 - Axe 2 : K. Boussetta (L2TI) et E. Audusse (LAGA)
 - Axe 3 : L. Pournin (LIPN) et P. Marchal (LAGA)
 - Axe 4 : D. Mazza (LIPN) et E. Hoffbeck (LAGA)
- directeurs de laboratoire : LAGA : J. Barral, LIPN : F. Bassino, L2TI : A. Mokraoui

Un **conseil scientifique** extérieur existe depuis 2013. Il comprend 2 personnalités par axe :

- Axe 1 : F. Dufaux (Centrale Supélec), A. Tsoukias (LAMSADE) puis G. Obozinski (EPFL) à partir de 2023,
- Axe 2 : P. Leca (CEA) puis D. Trystram (Grenoble) à partir de 2023, André-Luc Beylot (INP Toulouse)
- Axe 3 : N. Curien (math orsay), B. Vallée (GREYC)
- Axe 4 : F. Métayer, (IRIF), N. Zeilberger, (LIX)

Ce conseil, complété par un membre de la Commission Recherche de l’Université Sorbonne Paris Nord extérieur à la fédération MathSTIC, est sollicité pour une analyse de la démarche adoptée par le comité de direction, les choix d’axes et d’organisation, mais aussi pour la sélection de chercheurs invités (cf. 2.2.1).

Du fait de la pandémie de Covid19 et suite au changement de direction de la fédération (en 2021), il a moins été sollicité sur la période écoulée : il ne s’est réuni qu’en avril 2017 et en mars 2023.

2.2 Politique scientifique

La politique scientifique de la fédération anticipe ce qui pourra être favorisé par un bâtiment commun aux trois laboratoires, incluant des espaces de séminaire et de travail communs, une organisation technique commune, des bureaux rapprochés. En l’état, les actions de la fédération sont incitatives pour la mise en œuvre de projets transdisciplinaires par un décloisonnement scientifique. Mentionnons que ces actions induisent directement ou indirectement des réponses à appels à projets nationaux ou internationaux, et ont des retombées industrielles (projets FUI ou ANR, par exemple). Le site web de la fédération, relayé dans les sites web des laboratoires, permet une diffusion des opérations scientifiques.

2.2.1 Types d’actions entreprises

La politique scientifique de la fédération a été déclinée à travers sept types d’action :

- Chercheurs invités
- Financement de stages de M2, de post-doc
- Financement, co-financement ou labellisation de thèses
- Soutien matériel
- Missions
- Co-financement de clusters de calcul
- Co-financement de la bibliothèque mathématique-informatique

En effet, les projets portés dans le cadre de la fédération requièrent des moyens en général non directement prioritaires pour les laboratoires, car à l’interface entre au moins deux laboratoires. C’est particulièrement le cas de stages de master, de post-doc et de thèses co-encadrés par des membres de deux laboratoires au

moins. C'est le cas aussi pour des clusters de calcul utilisés par les 3 laboratoires. L'invitation directe par la fédération de chercheurs est aussi un élément important de politique scientifique : cela favorise des regards croisés sur un problème, ouvre des opportunités de collaboration au-delà de sa 'famille' scientifique. Enfin la bibliothèque mathématique-informatique est un outil important pour les chercheurs de ces laboratoires : l'accès aux revues est quotidien et nécessite des espaces de travail et de lecture non disponibles à la bibliothèque universitaire des sciences.

Les **co-financements des clusters de calcul et de la bibliothèque mathématique-informatique** ont été décidés dès la constitution de la fédération, sur un principe récurrent pour la durée du quinquennat. Deux clusters de calcul sont utilisés par les membres de la fédération. Un (petit) cluster de 18 nœuds (appelé Gaia) permet aux utilisateurs d'effectuer des développements ou d'exécuter de petites tâches (calculs Matlab ou Maple). La fédération a par ailleurs initié la mise en place d'un second cluster de calcul de 2056 cœurs (appelé Magi), co-financé par l'université Paris 13, puis par la Comue USPC et maintenant par USPN. Il constitue une plateforme qui offre des moyens de calcul intensif et distribué à la communauté scientifique. Cet outil est utilisable par des chercheurs travaillant sur la production ou l'expérimentation dans des thématiques variées, parmi lesquelles la modélisation mathématique, la simulation numérique, le développement d'outils de calcul, le traitement automatique du langage, la fouille de données. La bibliothèque mathématique-informatique est accessible aux membres de la fédération. Elle possède une surface de 350 m², 800 mètres linéaires de rayonnage, 45 places de lecture, 5 postes informatiques en libre-service, une imprimante et un scanner. Le fonds de la bibliothèque est constitué d'environ 11 000 ouvrages empruntables par les utilisateurs, 400 ebooks et de 150 collections de revues, qui sont consultables sur place ou à distance en version électronique.

Les autres actions sont mises en œuvre soit par appel d'offre (stages, thèses, invitations), soit par du financement « au fil de l'eau ». Dans le cas des appels d'offre, les choix sont effectués par le comité de direction ; dans les autres cas, les projets sont scientifiquement validés (sujet, CV, collaboration effective inter-équipes) par les responsables d'axe et étudiés financièrement par le comité de direction. Quelques **missions ou achats d'équipements matériels** ont eu lieu chaque année pour permettre le développement de projets. La fédération co-finance, avec l'université USPN, des **stages de M2** (11 au total). Elle a pu financer six **post-doctorats** de 2017 à 2022. La fédération souhaitait initialement pourvoir deux post-doctorats par axe, mais la situation financière de l'université n'a pas permis une masse salariale suffisante. Le Tableau 1 présente la liste des post-doctorants financés par la fédération.

Nom et Prenom	Debut	Fin	Axe	Sujet
Michael Wallner	2017	2018	3	Combinatorics and Probability of Random Walks and Trees
Imad Kissami	2017	2018	2	codes HPC et environnements hétérogènes et dynamiques
Diego Delle Donne	2018	2019	1	Graphes partitioning
Christian Bean	2020	2021	3	Combinatorial and Probabilistic Aspects of Permutations
Morgan Rogers	2021	2022	4	Étudier des invariants d'actions de monoïdes
Morgan Rogers	2022	2023	4	Étudier des invariants d'actions de monoïdes

TABLE 1: La liste de post-doctorats financés par la fédération

Nom prenom	début	fin	Axe	encadrement	financement
Imad Kissami	2013	2017	2	Cérin(LPIN) Benkhaldoun(LAGA)	LAGA
Dai Viet Tran	2014	2017	1	Dibos et Li-Thiao-Te (LAGA) Luong (L2TI)	LAGA
Ba Chien Thai	2015	2018	1	Mokraoui(L2TI) Matei(LIPN)	gouv. Vietnam
Mohammed Chahbar	2018	2021	2	Diaz (L2TI) Cerin (LIPN)	L2TI
Tan Sy Nguyen	2020	2023	1	Zaag et Chaussard (LAGA) Luong (L2TI)	LAGA
Theophile Buffiere	2020	2023	3	Pournin(L2TI) Marchal(LAGA)	MathSTIC
Maliha Akouba	2021	2024	1	Osmani(LIPN) Clertant(LAGA)	MathSTIC
Bilal Faye	2022	2025	1	Azzag (LIPN) Feng (L2TI)	LIPN
Mathieu Valee	2022	2025	3,4	Grappe(LIPN) Vallette(LAGA)	MathSTIC

TABLE 2: La liste des doctorants avec un sujet à la frontière entre deux laboratoires

Depuis 2020 l'école doctorale propose un contrat étiqueté MathSTIC, l'idée étant de proposer des sujets de thèses impliquant des co-encadrants (un par labo) de deux laboratoires différents de manière explicite. Nous avons donc trois doctorants MathSTIC : deux LIPN-LAGA et un LIPN-L2TI. Dans les années précédant 2020, les thèses à la frontière entre deux laboratoires étaient financées sur le contrat d'un des deux laboratoires. En réalité la procédure est toujours d'actualité si il y a plusieurs sujets déposés à la frontière entre deux laboratoires, car un seul malheureusement sera financé avec un CD MathSTIC. Le Tableau 2 reporte la liste des thèses avec l'indication si c'est un CD MathSTIC ou d'un laboratoire.

Les thèses MathSTIC sont effectuées dans l'école doctorale ED146 « Galilée » qui couvre l'ensemble des disciplines scientifiques (mathématiques, informatique, physique, chimie, biologie, santé) de l'université USPN. La fédération joue donc un rôle de labellisation pour les propositions de thèses dans les domaines de mathématiques, de l'informatique et des STIC.

Enfin, la fédération de recherche a la possibilité, depuis 2015, d'**inviter des chercheurs, professeurs ou assimilés maîtres de conférences** pour des périodes de 15 jours à 1 mois, aux mêmes conditions que les invitations faites par l'université USPN. Plus formel que le dispositif de missions simples, les invités ont le statut de professeurs visiteurs (*visiting professors*) ou de maîtres de conférences visiteurs (*visiting fellows*) de l'université Paris USPN.

2.2.2 Journées scientifiques, workshops thématiques, actions à l'international

Des journées scientifiques et mini-cours⁷ :

-  **Axe 1 : Optimisation et Apprentissage appliqués aux contenus numériques**
-  **Axe 2 : Calcul Haute-Performance, Systèmes distribués**
-  **Axe 3 : Physique mathématique, Physique statistique, Combinatoire**
-  **Axe 4 : Catégories : entre calcul et topologie**

ont été organisées dans le cadre de la fédération (cf. aussi <http://mathstic.univ-paris13.fr>) :

Titre	Axe(s)	date
Marches aléatoires		06/12/17
Propagation d'ondes		12/01/17
Flips		28/11/17
Combinatoire et probabilités		22/05/18
Combinatoire		03/07/18
Géométrie et Combinatoire dans les Espaces des Modules		24-25/09/18
Cartes		09/04/18
Apprentissage appliqué aux données non-structurées		21/11/19
Physique statistique, marches aléatoires branchantes, et limites d'échelles		21-23/10/19
IA		27/03/19
Combinatorics and Arithmetic for Physics		6-8/11/19
Opérades		5/11/20
Hyperstructures, Topological Data Analysis and Multicellularity		17-18/03/20
Covid		31/05/21
Signaux biomédicaux : modélisation, traitement et analyse mathématique		19/10/21
Vers un apprent. prag. dans un contexte de données visuelles labellisées limitées		26/11/21
Parallelisme et Contrôle		10/09/21
Journée combinatoire et probabilités		26/10/21
Biométrie et Cryptographie Visuelle : Théorie et Applications		28/06/22
Journée & Conseil scientifique		24/03/23

La fédération MathSTIC a aussi aidé financièrement au déroulement des six conférences :

Titre	Axe(s)	date
FVCA 2017		12-16/06/17
PinT2018		2-5/05/18
European ICT Week IA		23-27/3/20
CAP 21		30/11/20 - 2/12/20
NPC 2021		3-5/11/21
CAP 22		28-29/11/22

7. Les couleurs sont liées aux axes

2.3 Résultats scientifiques par axe

2.3.1 Axe 1 : Optimisation et Apprentissage appliqués aux contenus numériques

Cinq équipes sont principalement impliquées dans l'axe 1 :

- MBI (*Mathématiques pour la Biologie et les Images*) du LAGA,
- AOC (*Algorithmes et Optimisation Combinatoire*) du LIPN,
- A³ (*Apprentissage Artificiel & Applications*) du LIPN,
- RCLN (*Représentation des Connaissances et Langage Naturel*) du LIPN,
- Multimédia (*Traitement et Analyse de données multimédia*) du L2TI.

Sur la période écoulée, les 3 laboratoires ont largement collaboré sur des sujets à l'interface des domaines de l'optimisation, de l'apprentissage, de l'analyse et du traitement de contenus numériques. De nombreux problèmes restent ouverts et nécessitent des expertises et compétences complémentaires, problèmes qui pourront être abordés dans cet axe lors du prochain quinquennal. À noter qu'il s'agit souvent de sujets avec de fortes potentialités de valorisations industrielles.

Les recherches transversales mises en avant sur cet axe ont pour thème fédérateur le traitement efficace de données structurées (textes, graphes) et non structurées (images/vidéos) de grandes dimensions à l'aide d'approches issues de l'apprentissage et/ou de l'optimisation combinatoire. Les traitements effectués sur ces données sont de différentes natures : évaluation et rehaussement de qualité, débruitage, restauration, classification d'anomalies, détection few-shot d'objets. Des approches issues de l'optimisation (continue et discrète) et de l'apprentissage (supervisé et non supervisé) sont également développées en privilégiant leur hybridation afin de proposer des méthodes performantes et innovantes. Les graphes sont notamment au cœur des thématiques de cet axe puisqu'ils sont un outil de modélisation puissant et commun à toutes les équipes impliquées.

• Listes des thèmes initialement prévus :

- Évaluation et rehaussement de qualité d'images médicales (équipe MBI-LAGA, , équipe Multimédia-L2TI, équipe A³-LIPN).
- Mise en correspondance tonale d'images HDR (équipe A³-LIPN, équipe Multimédia-L2TI).
- Détection d'objets dans des images aériennes (équipe A³-LIPN, équipe Multimédia-L2TI).
- Méta apprentissage pour un apprentissage intelligent (équipe MBI-LAGA, équipe A³-LIPN).

auxquels s'ajoutent deux thèmes qui, tout en étant menés à l'intérieur du LIPN, sont clairement à périmètre large :

- Optimisation combinatoire pour le traitement automatique des langues (équipes AOC et RCLN du LIPN).
- Intégration de données bruitées hétérogènes (équipes A³ et AOC du LIPN).

L'activité scientifique peut être résumée avec les éléments suivants :

• 1 projet [ANR-21-LCV3-0004] : Laboratoire Commun en Intelligence, Reconnaissance et Surveillance Réactive (LabCom IRISER, <https://www-l2ti.univ-paris13.fr/iriser/>) depuis le 1er avril 2022 : Des membres de l'équipe A³ et de l'équipe multimédia ont formalisé leur collaboration informelle avec l'entreprise COSE à travers un Laboratoire Commun en Intelligence, Reconnaissance et Surveillance Réactive (LabCom IRISER), financé par l'ANR sur une période de 54 mois. Les activités du LabCom portent sur un large domaine d'expertise, multidisciplinaire, allant des mathématiques appliquées à l'informatique en s'intéressant aux données visuelles notamment les images aériennes. Bien que la recherche dans le domaine de la vision par ordinateur avance à grands pas et que de nombreux travaux aient été développés pour des cas d'usage précis, il reste encore des verrous à lever notamment dans le contexte du projet CAMELON de l'entreprise COSE qui aborde le traitement de flux d'images. En effet, avec le nouveau capteur matriciel du système CAMELEON, la quantité de données est très importante et cela d'autant plus que ce capteur permet de capturer des séquences d'images assimilables à un flux vidéo. Avec cette quantité d'information, il devient impossible de transmettre des données à travers des liaisons hertziennes et il est long et fastidieux pour des experts d'analyser les images à fin de rechercher et identifier des objets d'intérêts. Le système CAMELEON doit être en mesure de répondre à des missions de type intelligence, surveillance et reconnaissance; des missions de sécurité civile; des missions commerciales de production cartographique; ainsi que des missions de recherche et de sauvetage.

- Membres L2TI impliqués : Anissa MOKRAOUI (porteur), Fangchen FENG, Pierre LE JEUNE.

- Membres LIPN impliqués : Hanane AZZAG, Mustapha DEBBAH.
- Durée du projet : 1 avril 2022 - septembre 2026
- Montant accordé : 363 kEuros

- 4 journées scientifiques ont été organisées :

1. Journée scientifique Math-STIC, « Biometrics and Visual Cryptography : Theory and Applications », organisé le 28 June 2022, par Azeddine BEGHADADI, Hatem ZAAG, Mounir KAANICHE, Université Sorbonne Paris Nord.
2. Journée scientifique Math-STIC, « Signaux biomédicaux : modélisation, traitement et analyse mathématique », organisé le 19 octobre 2021 par Azeddine Beghdadi, Hatem Zaag, Li-Thiao-Té Sébastien.
3. Journée GDR ISIS et Math-STIC (FR 3734 CNRS), « Vers un apprentissage pragmatique dans un contexte de données visuelles labellisées limitées », MSH Paris Nord, organisé le 26 novembre 2021, <https://www.gdr-isis.fr/index.php/reunion/462/> par Anissa MOKRAOUI, Mustapha LEBBAH et Hanene AZZAG.
4. Journée scientifique Math-STIC (FR 3734 CNRS), « Apprentissage appliqué aux données non-structurées », organisé le 21 novembre 2019 par Anissa MOKRAOUI et Roberto WOLFLER.

- 9 stages de M2 avec un co-encadrement conjoint impliquant de 2 équipes (1 équipe par laboratoire).

- 3 stages de M2 et 1 stage 2 année ingénieur sur le LabCom IRISER.

- 5 thèses encadrées dont 2 soutenues :

1. **Bilal FAYE** (01/10/2022), en cours
 - Sujet : Object Detection and Tracking Approaches for Aerial Images Using Deep Learning-Based Algorithms - Directeur de thèse : Hanene AZZAG (LIPN, 50%)
 - Co-encadrement : Fangchen FENG (L2TI, 50%)
 - Financement : contrat de recherche de l'université SPN
2. **Tan Sy NGUYEN** (01/09/2020), en cours
 - Sujet : A Smart System for Processing and Analyzing Gastrointestinal Abnormalities in Wireless Capsule Endoscopy.
 - Directeur de thèse : Hatem ZAAG (LAGA, 30%)
 - Co-encadrants : Marie LUONG (L2TI, 35%), John CHAUSSARD (LAGA, 35%)
 - Financement : contrat de recherche de l'université SPN
3. **Maliha AKOUBA** (01/09/2020), en cours
 - Sujet : Méta apprentissage pour un apprentissage intelligent
 - Directeur de thèse : Aomar OSMANI (LIPN)
 - Co-directeur : Matthieu Clertant LAGA
 - Financement : contrat de recherche de l'université SPN
4. **Ba Chien THAI** (01/04/2015), soutenue
 - Sujet : Mise en correspondance tonale d'images HDR
 - Directeur de thèse : Anissa MOKRAOUI (L2TI, université SPN, 50%)
 - Co-direction : Basarab MATEI (LIPN, université SPN, 50%)
 - Financement : Bourse du gouvernement Vietnamien
5. **Dai Viet TRAN** (octobre 2014), soutenue
 - Sujet : Patch-based Bayesian approaches for image restoration.
 - Directeur de thèse : Françoise DIBOS (LAGA, université SPN, 20%)
 - Co-encadrants de thèse : Sébastien LI-THIAO-TE (LAGA) 40%, Marie LUONG (L2TI) 40%.
 - Financement : contrat de recherche de l'université SPN

- 4 professeurs invités :

1. **Ahmad BOURIDANE** (Professeur) - University of Sharjah, Sharjah, UAE
 - Date du séjour : 1/06/2022 au 30/06/2022
 - Nom invitants : Azeddine Beghdadi (L2TI)
 - Financement : FR MathSTIC - Publications communes : [6], [9], [4], [1], [2].
2. **Thuong LE-TIEN** :
 - Université : Institut Polytechnique de HoChiMinh ville (ou HCMUT)
 - Date du séjour : 7 au 22 Juin 2017
 - Nom des invitants : Marie LUONG (L2TI), Daniel VERBA (VPRI, SREI).

- Financement : FR MathSTIC (Séjour), ERASMUS+ (Vol international)
- Publications communes : [14], [25].

3. **Martin ATZMUELLER**

- Date du séjour : 1 au 30 avril 2018
- Nom des invitants : Henry Soldano (LIPN)
- Financement : FR MathSTIC

4. **Naoum-Sawaya Joe**

- 1 post-doc :

1. **Diego Delle Donne** - Invitant : Roberto WOLFLER

- Durée du postdoc : 8 mois
- Date : 3 Décembre 2018 au 31 juillet 2019
- Publications communes : [8], [5].

- Les contributions scientifiques conjointes ont donné lieu à des publications dans des conférences et revues internationales.

Traitement d'images – On s'intéresse aux méthodes de traitement et d'analyse d'images pour l'amélioration de la qualité en particulier d'images médicales. Des méthodes de débruitage pour la restauration, de super-résolution, et des approches d'optimisation et/ou par apprentissage dans le but d'améliorer la qualité des diagnostics ont été développées.

- **Restauration d'images médicales** Des approches bayésiennes par patches et par représentation parcimonieuse pour les problèmes de restauration d'images qui sont la super-résolution et le débruitage ont été développées. Notre contribution réside dans le choix du dictionnaire construit grâce à un ensemble d'images de haute qualité et en la définition et l'utilisation d'un modèle à priori pour la distribution des patches dans l'espace du dictionnaire. Nous avons démontré qu'un choix attentif du dictionnaire représentant les informations locales des images permettait une amélioration de la qualité des images dégradées. Plus précisément, à partir d'un dictionnaire construit de façon exhaustive sur les images de haute qualité, nous avons sélectionné, pour chaque patch de l'image dégradée, un sous dictionnaire fait de ses voisins les plus proches. Pour le problème de super-résolution, la similarité entre les patches a été mesurée grâce à l'utilisation de la distance du cantonnier ou encore distance du terrassier (Earth Mover's Distance en anglais) entre les distributions des intensités de ces patches. L'algorithme de super résolution présenté a conduit à de meilleurs résultats que les algorithmes les plus connus. Pour les problèmes de débruitage d'images nous nous sommes intéressés à la distribution a priori des patches dans l'espace du dictionnaire afin de l'utiliser comme pré-requis pour régulariser le problème d'optimisation donné par le Maximum à Postérieur. Dans le cas d'un dictionnaire de petite dimension, nous avons proposé une distribution constante par morceaux. Pour les dictionnaires de grande dimension, la distribution a priori a été recherchée comme un mélange de gaussiennes (GMM). Nous avons finalement justifié le nombre de gaussiennes utiles pour une bonne reconstruction apportant ainsi un nouvel éclairage sur l'utilisation des GMM.

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre de la thèse de Dai Viet TRAN dirigée par Françoise DUBOS de l'équipe MBI, co-encadrée par Sébastien LI-THIAO-TE de l'équipe MBI et Marie LUONG de l'équipe Multimédia. Les contributions ont donné lieu à des publications dans [25], [24], [26].

- **Classification d'images médicales** L'objectif est de proposer une méthode efficace de classification afin d'améliorer la performance par rapport aux méthodes existantes. Comme résultat, nous avons proposé une nouvelle méthode basée sur la représentation parcimonieuse dans le domaine des ondelettes, la méthode est ainsi appelée Sparse Representation Wavelet based Classification (SRWC). Cette étude montre que nous pouvons utiliser les caractéristiques décrites par les coefficients d'ondelettes et la représentation parcimonieuse pour améliorer la performance par rapport aux méthodes conventionnelles de classification. En outre, notre méthode est robuste à l'occlusion et à la corruption des données. Des expériences approfondies ont été menées sur des ensembles de données publiques disponibles afin de prouver l'efficacité de l'algorithme proposé.

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre de l'encadrement du stagiaire Ha long NGO encadré par Emmanuel VIENNET (équipe Multimédia), Marie LUONG (équipe Multimédia) et Sébastien GUERIF (équipe A³) et a donné lieu à une publication dans une conférence internationale [14].

- **Détection d'anomalies dans des images endoscopiques.** L'objectif de ces travaux est de développer un système intelligent pour la détection, l'identification et la classification des anomalies dans les images d'endoscopie par capsule ou videocapsule endoscopique (VCE). Ce système comprend

également un module de prétraitement qui vise à améliorer la qualité des images acquises avant de les introduire dans la partie de détection et classification. À cet effet, nous allons d’abord développer des solutions d’amélioration de la qualité des images par rapport à de nombreux types de distorsions. D’autre part, avec les progrès continus des technologies basées sur le Deep Learning, les réseaux de neurones à convolution sont connus pour leur bonne performance pour la classification d’images. Dans ce travail, la classification des anomalies est basée sur des réseaux convolutifs profonds, parce que plus adapté à la représentation de données complexes et de grand volume. En conséquence, une métrique d’évaluation de la qualité d’image sans référence (NR-IQA) dédiée à l’illumination inégale, une des dégradations fréquentes dans les images VCE, a été proposée. De plus, les méthodes d’apprentissage profond pour la classification sont connues pour être gourmandes en données. Pour la tâche de classification de l’imagerie endoscopique, dont l’amélioration de la qualité est incorporée comme prétraitement, nous avons besoin d’un ensemble de données d’images VCE dégradées par différents niveaux de plusieurs types de distorsions. Ainsi, une base de données de distorsions sur les images WCE a été créée. Les étapes suivantes du travail seront consacrées à la correction des distorsions, puis à la classification pour la détection des pathologies dans les images WCE. Ces travaux s’inscrivent dans le cadre de la thèse de Tan Sy NGUYEN dirigée par Hatem ZAAG et co-encadrée par Marie LUONG (équipe Multimédia) et John CHAUSSARD (équipe MBI). Les contributions ont été publiées dans [15], [17], [16].

Mise en correspondance tonale d’images *High-Dynamic-Range* (HDR) – La conversion d’une image à grande gamme dynamique (HDR) en une image à faible gamme dynamique est étudiée de façon à garantir un rendu visuel de cette dernière de bonne qualité. La première contribution concerne le rehaussement de contraste de l’image mappée en utilisant une fonction linéaire par morceaux pour que l’égalisation d’histogramme soit ajustée à la « s-courbe » d’adaptation du système visuel humain. La deuxième et troisième contributions portent sur la préservation des détails de l’image HDR. Des approches multirésolution séparables et non séparables, basées sur des stratégies non oscillatoires, prenant en compte les singularités de l’image HDR dans la dérivation du modèle mathématique, sont proposées. La quatrième contribution préserve non seulement les détails mais améliore également le contraste de l’image HDR mappée. Un schéma de lifting séparable « presque optimal » est proposé. Il s’appuie sur une étape de prédiction adaptative des coefficients. Cette dernière repose sur une combinaison linéaire pondérée des coefficients voisins pour extraire les détails pertinents sur l’image HDR à chaque niveau de résolution. Un mappage linéaire par morceaux est ensuite appliqué à la reconstruction grossière. Les résultats de simulation fournissent de bonnes performances en termes de qualité visuelle et de métrique TMQI (Tone Mapped Quality Index) par rapport aux approches de mise en correspondance tonale classiques. L’impact des paramètres TMQI sur la qualité visuelle des images mappées est discuté. Les paramètres proposés montrent une forte corrélation entre la métrique modifiée et la note moyenne d’opinion.

Ces travaux s’inscrivent dans le cadre de la thèse de Ba Chien THAI et du stagiaire Anas HUSSEIS et a impliqué des membres de l’équipe A^3 (Matei BASARAB) et de l’équipe Multimédia (Anissa MOKRAOUI). Ces travaux ont donné lieu à des publications dans des conférences et revues internationales [18],[19],[21], [22], [23],[11] et revue internationale [20].

Détection d’objets dans des images aériennes basée sur des approches d’apprentissage profond – Un des axes de recherche du LabCom IRISER s’inscrit dans le domaine de la détection d’objets dans des images aériennes en régime few-shot. Les avancées en apprentissage profond ont permis d’élaborer plusieurs modèles dédiés à la détection d’objets dans des images. Ces modèles offrent de meilleures performances comparées à celles des modèles classiques de vision par ordinateur. Cependant, la majorité de ces modèles, basées sur des réseaux neuronaux profonds, nécessitent un entraînement intensif qui repose sur un énorme volume de données soigneusement annotées par des experts. L’annotation des données est une opération longue, laborieuse et coûteuse en particulier dans le cas des images aériennes dans lesquelles se trouvent de nombreux objets de petite taille. De mauvaises annotations peuvent ainsi conduire à des résultats erronés. De plus, la plupart des modèles développés restent efficaces pour la détection d’objets d’images appartenant aux classes rencontrées lors de la phase d’entraînement. Ces modèles ont en effet du mal à reconnaître des objets appartenant à de nouvelles classes, c’est-à-dire des classes qui n’ont jamais été vues lors de l’entraînement. Ré-entraîner le modèle complet pour qu’il soit capable de reconnaître de nouvelles classes est une tâche lourde : temps d’entraînement et d’annotations des données trop coûteux.

Pour contourner ces problèmes, des investigations ont porté sur le développement de modèles capables d’apprendre avec très peu de données annotées (*few-shot learning*). C’est dans ce contexte particulier de données faiblement annotées que s’inscrivent les travaux envisagés dans la thèse de Pierre LE JEUNE

dirigée par Anissa MOKRAOUI (équipe multimedia) pour apporter des solutions à la détection d'objets en particulier sur des images aériennes de grande taille sur lesquelles l'entreprise COSE travaille.

Les travaux du stagiaire Wycor DA ROCHA ont confirmé que les performances de la détection d'objets sur des jeux de données d'images naturelles (par exemple PASCAL VOC, MS COCO) est bien plus élevée que celles sur les jeux de données d'images aériennes (par exemple DOTA et DIOR). En effet, les recherches récentes révèlent que plusieurs défis subsistent avec les techniques actuelles pour les images aériennes. Un exemple est que, pour les applications basées sur l'apprentissage, un temps de calcul énorme est nécessaire pendant la phase d'apprentissage en raison de la résolution potentiellement élevée des images aériennes, ce qui conduit souvent à une dégradation des performances avec des ressources informatiques limitées. La thèse de Bilel FAYE, encadrée par Hanene AZZAG de l'équipe A^3 et Fangchen FENG de l'équipe Multimédia s'intéresse au développement d'algorithmes de détection d'objets, de suivi d'objets, et de suivi d'objets multiples basés sur l'apprentissage profond.

Ces premiers travaux ont donné lieu à des publications dans des conférences internationales [10], [12].

Méta apprentissage pour un apprentissage intelligent L'apprentissage est essentiellement guidé par les données. Pourtant, les connaissances a priori, les invariants, la structure et les connaissances du domaine doivent apporter plus d'informations que les exemples d'apprentissage eux-mêmes. Dans certaines situations, très peu d'exemples doivent être utiles pour apprendre (comme les modèles few shot ou zero shot learning). De plus, quand les représentations sont contrôlables, il est plus facile de traiter des questions liées à l'explication, à l'interprétation et l'évaluation des résultats sur d'autres plans que celui utilisé pour l'optimisation de la perte syntaxique d'une hypothèse représentative (la législation, la conformité, l'éthique, etc.). Ces principes doivent guider l'apprentissage automatique pour définir un apprentissage intelligent dans lequel la force brute des données doit laisser une grande place à la connaissance a priori.

Dans cette étude, nous partons des derniers travaux de Vapnik sur la théorie complète de l'apprentissage afin de comprendre l'étendue concrète des espaces d'hypothèses dans lesquels ses résultats sont applicables. Nous rappelons, que la validité de l'approche repose sur la considération que l'espace de Hilbert à noyau reproduit comme cadre permettant, notamment, de garantir que la convergence faible des apprenants garantit, la convergence forte et valide, ainsi, l'équation de base de la minimisation du risque à choisir une fonction ayant ces propriétés comme meilleur apprenant. Ensuite, nous avons projeté de nous attaquer, à la fois du point de vue expérimental et empirique, à la recherche de prédicats représentatifs de classes de problèmes qui peuvent être résolus dans ce cadre. En particulier, en considérant l'apport des invariants et équivariants dans la structuration des espaces de recherche et la minimisation du nombre d'exemples nécessaires pour apprendre, en explorant, dans un premier temps, l'apport de modèles comme les groupes de Lie qui offrent un cadre puissant pour l'expression des invariants, comme les invariants de transformation ou d'indépendance des systèmes de coordonnées. Ces propriétés permettraient de réduire ou de contrôler les biais apportés par ces représentations, de préserver les invariances via les transformations, d'utiliser des symétries et pour les cas des séries temporelles, omniprésentes dans le cas de l'internet des objets, elles capturent naturellement la dynamique temporelle. De plus, les éléments de la théorie des représentations, comme le théorème de Riesz, permettent de mieux décrire au niveau structurel la notion d'interprétation et d'explication, permettraient d'apporter des solutions liées à la confiance qui peut être accordée, par exemple, aux systèmes d'internet des objets devant prendre des décisions ayant des conséquences importantes sur l'environnement.

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre de la thèse Maliha AKOUBA dirigée par Aomar OSMANI de l'équipe A^3 et Matthieu Clertant de l'équipe MBI.

Optimisation et Traitement Automatique des Langues (TAL) Dans ce thème, il s'agit de modéliser les problèmes liés à l'analyse des langues naturelles, notamment l'analyse syntaxique automatique où le but est de construire une structure hiérarchique (un arbre en général) qui indique les relations syntaxiques entre les mots ou les groupes de mots de la phrase à analyser. De nombreuses structures sont admissibles, et on cherche en général les *plus plausibles*. Dans cette optique nous formalisons ces tâches comme des problèmes d'optimisation sous contraintes, trouver la structure de meilleure score qui respecte les contraintes de bonne formation, et donc d'utiliser des méthodes issues de la recherche opérationnelle ou de l'optimisation combinatoire pour les résoudre. La représentation des problèmes de TAL par des programmes linéaires en nombres entiers est relativement commune. Notre originalité tient aux méthodes de résolution. Nous ne nous reposons pas sur des solveurs génériques (type Gurobi ou CPLEX) mais dérivons des algorithmes efficaces qui tirent parti des structures propres aux problèmes traités, en nous appuyant sur la relaxation lagrangienne et les méthodes de décomposition. Nous avons également étendu récemment cette approche aux problèmes non-linéaires, notamment quand le score d'une analyse syntaxique est une

fonction polynomiale des parties qui la composent.

Les problèmes traités ayant fait l'objet de publications sont :

1. l'analyse d'une variante des grammaires d'arbres adjoints par réduction au calcul d'une arborescence couvrante généralisée de poids maximal [7], pour lequel nous avons développé la première méthode de décomposition dual pour les variantes non-symétriques ;
2. des algorithmes en programmation dynamique pour l'analyse en dépendances par transition [13]. Cette approche reposait sur l'une des premières architectures neuronales à utiliser l'attention croisée.
3. l'analyse en dépendances comme un problème d'arbre couvrant optimal avec des coûts polynomiaux [27] en utilisant la descente de coordonnées et des approximations linéaires de Taylor.

Réalisations : Factuellement, ce projet a permis :

- la publication de 3 articles dans des conférences internationales de rang A en traitement automatique des langues ;
- une collaboration autour de la thèse de Caio Corro financée par le labex EFL (encadrants A. Nazarenko et J. Le Roux, LIPN) soutenue en 2018.

Références

- [1] N. Al-Máadeed, M. Asim, S. Al-Máadeed, A. Bouridane, and A. Beghdadi. Automatic detection and classification of audio events for road surveillance applications. *Sensors*, 18(6) :1858, 2018.
- [2] M. Asim, N. Al-Máadeed, S. Al-Máadeed, A. Bouridane, and A. Beghdadi. A key frame based video summarization using color features. In *Colour and Visual Computing Symposium, CVCS 2018, Gjøvik, Norway, September 19-20, 2018*, pages 1–6. IEEE, 2018.
- [3] M. Atzmueller, H. Soldano, G. Santini, and D. Bouthinon. Minerlsd : efficient mining of local patterns on attributed networks. *Appl. Netw. Sci.*, 4(1) :43 :1–43 :33, 2019.
- [4] I. Bezzine, Z. A. Khan, A. Beghdadi, N. Al-Maadeed, M. Kaaniche, S. Al-Maadeed, A. Bouridane, and F. A. Cheikh. Video quality assessment dataset for smart public security systems. In *2020 IEEE 23rd International Multitopic Conference (INMIC)*, pages 1–5, 2020.
- [5] M. Braga, D. Delle Donne, M. S. Escalante, J. L. Marenco, M. E. Ugarte, and M. C. Varaldo. The minimum chromatic violation problem : A polyhedral approach. *Discrete Applied Mathematics*, 281 :69–80, 2020. LAGOS'17 : IX Latin and American Algorithms, Graphs and Optimization Symposium, C.I.R.M., Marseille, France - 2017.
- [6] I. Cheheb, N. Al-Maadeed, A. Bouridane, A. Beghdadi, and R. Jiang. Multi-descriptor random sampling for patch-based face recognition. *Applied Sciences*, 11(14) :6303, 2021.
- [7] C. Corro, J. Le Roux, and M. Lacroix. Efficient discontinuous phrase-structure parsing via the generalized maximum spanning arborescence. In *Proceedings of the 2017 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, pages 1644–1654, Copenhagen, Denmark, Sept. 2017. Association for Computational Linguistics.
- [8] D. Delle Donne, F. Furini, E. Malaguti, and R. Wolfer Calvo. A branch-and-price algorithm for the Minimum Sum Coloring Problem. *Discret. Appl. Math.*, 303 :39–56, 2021.
- [9] O. Elharrouss, N. Almaadeed, S. Al-Máadeed, A. Bouridane, and A. Beghdadi. A combined multiple action recognition and summarization for surveillance video sequences. *Appl. Intell.*, 51(2) :690–712, 2021.
- [10] W. R. Fogos, H. Azzag, M. Lebbah, and A. Mokraoui. Super-resolution gan improving yolo's performance benchmark. In *21st International Conference on machine learning an applications, ICMLA 2022, Atlantis, Bahamas, December 12-14, 2022*. IEEE, 2022.
- [11] A. Husseis, A. Mokraoui, and B. Matei. Revisited histogram equalization as HDR images tone mapping operators. In *2017 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, ISSPIT 2017, Bilbao, Spain, December 18-20, 2017*, pages 144–149. IEEE Computer Society, 2017.
- [12] P. L. Jeune, M. Lebbah, A. Mokraoui, and H. Azzag. Experience feedback using representation learning for few-shot object detection on aerial images. In *20th IEEE International Conference On Machine Learning and Applications (ICMLA)*, 2021.
- [13] J. Le Roux, A. Rozenknop, and M. Lacroix. Representation learning and dynamic programming for arc-hybrid parsing. In *Proceedings of the 23rd Conference on Computational Natural Language Learning (CoNLL)*, pages 238–248, Hong Kong, China, Nov. 2019. Association for Computational Linguistics.

- [14] L. H. Ngo, M. Luong, N. M. Sirakov, T. Le-Tien, S. Guerif, and E. Viennet. Sparse representation wavelet based classification. In *25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pages 2974–2978, 7-10 October 2018, Athens, Greece 2018.
- [15] T.-S. Nguyen, J. Chaussard, M. Luong, H. Zaag, and A. Beghdadi. A no-reference measure for uneven illumination assessment on laparoscopic images. In *2022 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pages 4103–4107. IEEE, 2022.
- [16] T.-S. Nguyen, L. H. Ngo, M. Luong, M. Kaaniche, and A. Beghdadi. Convolution autoencoder-based sparse representation wavelet for image classification. In *2020 IEEE International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP)*, pages 1–6, September 2020.
- [17] N. Tan-Sy, C. John, L. Marie, Z. Hatem, and B. Azeddine. A no-reference measure for uneven illumination assessment on laparoscopic images. In *2022 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pages 4103–4107, 16-19 October 2022, Bordeaux, France 2022.
- [18] B. C. Thai and A. Mokraoui. Tone mapped HDR images contrast enhancement using piecewise linear perceptual transformation. In *2019 27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, pages 1–5, 2-6 Sep. 2019, Coruna, Spain.
- [19] B. C. Thai and A. Mokraoui. Performance analysis of the revisited tone mapped quality index for tone mapped HDR images evaluation. In *2019 26th International Conference on Telecommunications (ICT)*, pages 366–370, 8-10 April 2019, Hanoi, Vietnam.
- [20] B. C. Thai, A. Mokraoui, and B. Matei. Contrast enhancement and details preservation of tone mapped high dynamic range images. *Elsevier Journal of Visual Communication and Image Representation*, december, 16th, 2018.
- [21] B. C. Thai, A. Mokraoui, and B. Matei. Hdr image tone mapping approach based on near optimal separable adaptive lifting scheme. In *IEEE International Symposium on Signal, Image, Video and Communications (ISIVC)*, Rabat, Morocco, November 27-30, 2018.
- [22] B. C. Thai, A. Mokraoui, and B. Matei. Hdr image tone mapping approach based on near optimal separable adaptive lifting scheme. In *Signal processing Algorithms Architectures Arrangements and Applications Conference (SPA)*, Poznan, September 19-21, 2018.
- [23] B. C. Thai, A. Mokraoui, B. Matei, and M. Tabal. Image tone mapping approach using essentially non-oscillatory bi-quadratic interpolations combined with a weighting coefficients strategy. In *2017 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, ISSPIT 2017, Bilbao, Spain, December 18-20, 2017*, pages 89–94. IEEE Computer Society, 2017.
- [24] D. Tran, S. Li-Thiao-Té, M. Luong, T. Le-Tien, and F. Dibos. Patch-based image denoising : Probability distribution estimation vs. sparsity prior. In *25th European Signal Processing Conference, EUSIPCO 2017, Kos, Greece, August 28 - September 2, 2017*, pages 1490–1494. IEEE, 2017.
- [25] D.-V. Tran, S. Li-Thiao-Té, M. Luong, T. Le-Tien, and F. Dibos. Patch-based image denoising : Probability distribution estimation vs. sparsity prior. In *25th European Signal Processing Conference, EUSIPCO 2017*, pages 1490–1494, 28 August -2nd September 2017, Kos, Greece 2017.
- [26] D.-V. Tran, S. Li-Thiao-Té, M. Luong, T. Le-Tien, and F. Dibos. Number of useful components in gaussian mixture models for patch-based image denoising. In *8th International Conference on Image and Signal Processing, ICISP 2018*, pages 108–116, 2-4 July 2018, Cherbourg, France 2018.
- [27] X. Zhang, J. Le Roux, and T. Charnois. Higher-order dependency parsing for arc-polynomial score functions via gradient-based methods and genetic algorithm. In *Proceedings of the 2nd Conference of the Asia-Pacific Chapter of the Association for Computational Linguistics and the 12th International Joint Conference on Natural Language Processing*, pages 1158–1171, Online only, nov 2022. Association for Computational Linguistics.
- [28] Z. Zhang, R. Jiang, C. Zhang, B. Williams, Z. Jiang, C.-T. Li, P. Chazot, N. Pavese, A. Bouridane, and A. Beghdadi. Robust brain age estimation based on smri via nonlinear age-adaptive ensemble learning. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 30 :2146–2156, 2022.

2.3.2 Axe 2 : Calcul Haute-Performance, Systèmes distribués

- MCS (*Modélisation et Calcul Scientifique*) du LAGA
- AOC (*Algorithmes et Optimisation Combinatoire*) du LIPN
- LoVe (*Logique et Vérification*) du LIPN
- *Réseaux* du L2TI

Cet axe s'attaque à des problématiques transversales aux domaines du calcul haute-performance et des systèmes distribués. Il est organisé en deux thématiques complémentaires. L'objectif de la première thématique est de proposer des modèles mathématiques, des algorithmes et des systèmes de calcul distribués performants. Le principal verrou adressé est celui de la complexité (e.g. temps de calcul, stockage des données) inhérente aux calculs large échelle (e.g. phénomène physique complexe impliquant un grand volume de données). La seconde thématique se focalise sur l'étude des architectures logicielles des systèmes distribués. Ces systèmes distribués sont conçus pour le support du calcul haute-performance mais aussi pour contribuer à l'émergence de nouveaux services et usages réseaux. Une attention particulière est portée aux problématiques induites par la mobilité des utilisateurs, la sobriété énergétique des environnements matériels et logiciels, le support des applications sensibles à la latence, ainsi que la sécurité et la sûreté des services.

Les trois laboratoires ont une solide expérience dans le domaine du calcul haute-performance et des systèmes distribués. L'équipe MCS au LAGA travaille sur les méthodes de décomposition de domaines espace-temps pour le calcul distribué. L'équipe AOC au LIPN regroupe des chercheurs experts en optimisation combinatoire et en architectures logicielles distribuées. Les travaux se situent à l'intersection de l'algorithmique, des logiciels et des systèmes distribués. Les problématiques traitées concernent notamment, le calcul numérique parallèle et distribué et l'optimisation des services de cloud. Les chercheurs de la seconde équipe du LIPN impliquée dans cet axe, à savoir l'équipe LoVe conçoivent des modèles de spécifications formelles et des techniques de vérification destinées aux environnements logiciels modulaires et distribués. Une attention particulière est portée sur la sûreté et sécurité logicielle. Enfin, l'équipe *Réseaux* au L2TI mène des travaux de recherches sur les protocoles, les mécanismes et les architectures réseaux.

Le LAGA et le LIPN ont été moteurs dans la mise en place du cluster de calcul MAGI de l'université. Le LIPN et le L2TI collaborent sur les plateformes d'expérimentation de l'Internet des objets, du fog et du cloud.

L'activité scientifique de cet axe peut être résumée avec les éléments suivants :

- 3 Journées scientifiques :
 1. Journée MathSTIC *Propagation des ondes dans les milieux composites : modélisation et simulation*, organisée le 12 janvier 2017 sur le Campus Villetaneuse de l'USPN par Bérangère Delourme (MCS-LAGA). La journée a été sponsorisée par la fédération MathSTIC. <https://www.math.univ-paris13.fr/~delourme/journeeMathStic.html>
 2. Journée *MAGI Calcul scientifique*, organisée le 5 juillet 2017 sur le Campus de Villetaneuse par Christophe Cerin (AOC-LIPN). La journée a été co-sponsorisée par l'USPN et la fédération MathSTIC. <https://lipn.univ-paris13.fr/~cerin/VILLETANEUSE2017.html>
 3. Journée *Parallélisme et Contrôle*, organisé le 10 septembre 2021 sur le Campus de Villetaneuse par Laurence Halpern (MCS-LAGA), Bérangère Delourme (MCS-LAGA) et Julien Salomon (INRIA). La journée a été co-sponsorisée par le pôle MathSTIC et le projet ANR ALLOWAP. <https://www.math.univ-paris13.fr/~halpern/programmePC2021.html>
- Support à l'organisation de 2 Conférences internationales :
 1. *7th Workshop on Parallel-in-Time methods*. Organisée à Roscoff (France) du 2 au 5 Mai 2018. Organisée par Caroline Japhet (MCS-LAGA), Yvon Maday (UPMC) et Olga Mula (Université Paris Dauphine). La conférence a été co-sponsorisée par la fédération MathSTIC. <https://www.math.univ-paris13.fr/japhet/PINT2018>
 2. *18th Annual IFIP International Conference on Network and Parallel Computing*. Organisée à Paris du 3 au 5 novembre 2021. Organisée par Christophe Cerin (AOC - LIPN) et , avec la participation de Khaled Boussetta (Réseaux-L2TI). La conférence a été co-sponsorisée par la fédération MathSTIC. <https://npc2021.dnac.org/>.
- 2 co-encadrements de thèses soutenues
 1. Imad Kissami (Fayssal Benkhaldoun - Christophe Cerin) : *High Performance Computational Fluid Dynamics on Clusters and Clouds : the ADAPT Experience* (soutenue le 28-02-2017). Publications communes [3, 24, 25]

2. Mohammed Chahbar (Gladys Diaz - Christophe Cerin - Kamal Ghomid) : *Mécanismes d'orchestration des Slices Réseaux dans un contexte SDN/NFV* (soutenue le 12-11-2021). Publications communes [7, 6, 5]
- 2 stages Master 2 supportés par la fédération MathSTIC
 1. Zineb Benaicha (Gladys Diaz - Kais Klai) : *SDN et NFV : Vers une approche formelle pour la spécification, la vérification, la gestion et le déploiement des services réseau*. (4/2018 - 9/2018)
 2. Soumaya Sokakini (Fayssal Benkhaldoun - Christophe Cerin) : *Développement d'un code parallèle adaptif en Julia pour des écoulements fluides*. (6/2021 - 11/2021)
 - 4 professeurs invités
 1. 2017 : **Martin J. Gander** (Université de Genève) - invité par Laurence Halpern. Publications communes [14, 15, 9, 21, 19, 12, 16]
 2. 2018 : **Amin Rafieri** (Hakim Sabzevari University) invité par Fayssal Benkhaldoun. Publication commune [29].
 3. 2019 : **Jaroslav Fort** (Czech Technical University in Prague) invité par Fayassal Benkhaldoun. Publication commune [11]
 4. 2021 : **Martin J. Gander** (Université de Genève, 2021) invité par Laurence Halpern et Bérangère Delourme. Publications communes [13, 10, 18, 20]
 - 1 Post-doctorant sur une durée de 6 mois
 1. 2017-2018 : **Kissami Imad** (Fayssal Benkhaldoun). Publications [11, 26, 30, 27]

Parallélisation d'algorithmes gourmands en temps et en mémoire

L'élément fort des contributions dans cette thématique est la proposition de méthodes de calcul alliées au développement d'outils informatiques adéquats. Cela se décline par la conception d'algorithmes pour le calcul haute-performance associé au développement de plateformes de calcul distribuées de type cluster et cloud.

Calcul haute performance : Cette thématique est principalement portée par la collaboration entre Fayssal Benkhaldoun (MCS-LAGA) et Christophe Cerin (AOC-LIPN) dans le domaine du calcul à haute performance. Elle s'est développée après leur co-encadrement de la thèse d'Imad Kissami en élargissant leur champ d'application pour inclure des problèmes complexes tels que les fluides non newtoniens et la physique des plasmas. Leurs travaux ont été rendus possibles grâce à leur collaboration étroite avec l'UM6P au Maroc, l'université de Prague en République tchèque et le LSPM à l'Université SPN.

Les études se sont focalisées sur le développement de solutions originales pour optimiser la parallélisation des calculs avec pour but la minimisation du temps de calcul par un placement équilibré des tâches et une allocation optimisée des ressources, quelque soit la structure d'accueil de ces calculs, grilles ou cloud, par exemple, en utilisant toutes les ressources offertes par les différentes voies du parallélisme (MPI, OpenMP, Parallel I/O, ...). Ces travaux ont été présentés dans plusieurs articles [24, 25, 3] et ont abouti en 2022 à la création de la plateforme Manapy [27], qui a permis de réaliser les études évoquées dans la suite.

Une des applications marquantes de cette thématique a été la résolution de problèmes de propagation de décharge électronique en prenant en compte plusieurs types d'ions, voir [11, 26]. Ce travail a été rendu possible grâce à une collaboration avec J. Fort de l'Université de Prague, invité à l'USPN pendant un mois grâce à un financement MathStic. Cette collaboration a également eu un impact significatif sur la thèse et le post-doc de Imad Kissami qui a eu l'opportunité de réaliser plusieurs séjours nationaux et internationaux, notamment en République tchèque.

Une autre application importante concerne les écoulements de fluides complexes. L'utilisation de la nouvelle plateforme parallèle généraliste *Manapy* a permis de réaliser des calculs sur les équations d'Euler ainsi que sur le modèle de Bingham régi par les équations de Navier-Stokes incompressibles avec viscosité variable, comme rapporté dans l'article [28] et la référence [23].

Décomposition de domaines Le travail décrit dans cette thématique s'inscrit dans un axe fort développé au LAGA depuis plusieurs années. La création de la fédération MathStic avait permis de favoriser des liens entre les chercheurs impliqués au LAGA, dans un groupe de travail initié par Laurence Halpern et des chercheurs de l'équipe AOC, notamment Camille Coti. Cette collaboration avait notamment abouti à l'organisation en 2021 d'une journée d'études conjointes sur les liens entre parallélisme et contrôle, voir

plus haut. Le départ de Camille Coti pour Montréal en 2021 a rebattu les cartes et les développements présentés ci-dessous reposent très majoritairement sur des activités déployées au sein du LAGA seul.

Les travaux réalisés dans cet axe se sont focalisés sur le développement de méthodes originales et efficaces pour la parallélisation espace-temps appliquées à des problèmes de contrôle optimal. Les premiers travaux entamés reposent sur l’extension de la méthode ParaOpt [17] aux problèmes de propagation d’ondes.

La méthode ParaOpt est inspirée par la méthode pararéel. Elle consiste à décomposer le problème couplé en plusieurs sous-problèmes posés sur des sous-intervalles de temps disjoints. Ces sous-problèmes peuvent alors être résolus en parallèle. Les sous-problèmes sont couplés à travers des inconnues se situant aux interfaces entre deux intervalles de temps. Pour calculer ces inconnues, on utilise une discrétisation grossière en temps afin de diminuer le coût de résolution. L’efficacité de la méthode ParaOpt a été démontrée pour des problèmes diffusifs dans l’article initial. Le but, ici, était d’étendre et d’adapter ces travaux pour les appliquer au cadre hyperbolique linéaire (équation des ondes) dont la nature très différente (vitesse de propagation de l’information finie, notamment) pose des problèmes nouveaux. Le travail s’est articulé autour de la thèse de Dang Thanh Vuong, débutée en septembre 2020 et financée par une bourse de l’école doctorale Galilée et du postdoc de Duc Quang Bui, financé par le projet ANR Allowap. Le financement par la fédération MathStic de deux séjours de M. Gander (Univ. Genève, Suisse) ont grandement contribué à dynamiser ces recherches. Des premiers résultats ont ainsi été présentés dans une journée de travail organisée à USPN avec le soutien de la fédération MathStic en Juin 2021, voir plus haut, puis dans des conférences internationales spécialisées, voir notamment [4].

Protocoles réseaux : modélisation et optimisation

Optimisation des systèmes et des réseaux Les travaux présentés dans cette thématique s’inscrivent dans la continuité de la collaboration initiée par Gladys Diaz (Réseaux-L2TI) et Christophe Cerin (AOC-LIPN) depuis 2015. Ils ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Mohammed Chahabr, codirigée par Gladys Diaz et Christophe Cerin. La thèse se focalise sur le contexte des tranches de réseaux (*Network Slicing*) 5G et les problématiques inhérentes de déploiement et d’orchestration.

Le développement et l’émergence des cas d’usage des réseaux mobiles de cinquième génération (5G) ont conduit à l’adoption d’une nouvelle approche de gestion de réseau et d’instanciation de services appelée *Network Slicing* (NS). Un NS est instancié pour répondre à un cas d’usages ou à un ensemble de services prédéfinis avec des exigences similaires en qualité de service (QoS). Cette fonctionnalité est supportée par des technologies innovantes telles que les réseaux définis par logiciel (SDN) et la virtualisation des fonctions réseau (NFV). Le SDN facilite la programmabilité des réseaux alors que le NFV permet l’exécution des fonctions réseau sur des environnements virtuels. Ensemble, ils améliorent l’agilité des réseaux et accélèrent le déploiement de nouveaux services.

La première contribution du travail réalisé est la proposition d’un modèle de *Network Slicing* pour la 5G de bout en bout (E2E) qui sert de référence aux chercheurs et développeurs pour la réalisation de leurs solutions de NS. Précisément, un modèle de découpage du réseau E2E 5G a été fourni sur la base d’une analyse approfondie des travaux de modélisation publiés par les principaux organismes de normalisation tels que l’ETSI, la GSMA, le 3GPP et l’IETF. Ce modèle a été source d’un article revu publié dans [7]. La deuxième contribution concerne la définition d’une liste d’exigences qui devraient être satisfaites par un cadre de gestion de sous-réseau NS. La conception et les exigences du cadre appelé *NESSMA* sont dérivées du modèle de découpage du réseau E2E, fourni par la première contribution. *NESSMA* [6] est conçu pour gérer les sous-réseaux NS ainsi que les cycles de vie des services qu’ils supportent, en tenant compte de son intégration avec la technologie NFV-MANO. Enfin, un nouveau mécanisme d’optimisation de la bande passante dans les infrastructures déployant les *networks slicing* a été proposé. Ce mécanisme est appelé *Inter-Slice Bandwidth Resource Sharing* (InterS)[5]. L’approche est basée sur le modèle d’information appelé COMS de l’IETF qui introduit quatre niveaux de partage afin d’optimiser d’avantage le coût du réseau (en termes de largeur de bande passante utilisée) et donc d’augmenter les revenus de l’opérateur. Cette thèse a également fourni une preuve de concept qui met en œuvre et évalue les mécanismes proposés dans un réseau basé sur le SDN. Deux implémentations ont été réalisées sur GRID 5000 pour évaluer plusieurs cas de figure dans le cas des slices congestionnés.

Modèles de vérification formelle appliquée aux réseaux Les travaux décrits dans cette section ont été réalisés dans le cadre d’une collaboration initiée par Kais Klai (LoVe-LIPN) et Gladys Diaz (Réseaux-L2TI). Ils ont été matérialisés dans le cadre du stage Master 2 de Mme Zineb Benaïcha,

Les travaux se sont focalisés sur la proposition d’une approche formelle pour spécifier et vérifier le chaînage de services réseaux (SFC - *Service Function Chaining*) dans un contexte SDN et NFV. Le SFC est un procédé qui consiste à ordonnancer selon une séquence précise un ensemble de fonctions de service

réseaux virtualisées réparties sur plusieurs plateformes matérielles (e.g. clouds). Il a été introduit pour supporter l'automatisation des flux de trafic entre les différents services virtualisés, offrant ainsi de l'agilité quant à l'ajout, la suppression et la modification des fonctions de service.

L'implémentation de la politique de chaque fonction de service peut contenir des erreurs de configuration et l'ordonnancement des fonctions de service peut poser des difficultés, en particulier si elles doivent satisfaire des contraintes strictes de bout en bout (e.g. de fiabilité, de sécurité ou de latence).

Pour répondre à cette problématique le travail réalisé dans le cadre du stage de Mme Benaïcha a consisté à proposer une modélisation formelle permettant de représenter une SFC grâce aux réseaux de Petri colorés. La modélisation s'appuie sur une description du trafic initial traversant la SFC et la spécification de la politique de vérification. La coloration de jetons a été exploitée pour modéliser la diversité des champs des entêtes des paquets IP ainsi que les différents états internes des fonctions de service. L'espaces d'état de la SFC étudiée a ensuite été généré grâce à l'outil *CPN Tool*. Enfin la vérification des propriétés ont été établis grâce à la librairie *ASK-CTL*, qui permet d'analyser les espaces d'états au moyen d'une logique temporelle.

Références

- [1] S. Badreddine, I. Chollet, and L. Grigori. Factorized structure of the long-range two-electron integrals tensor and its application in quantum chemistry, 2022.
- [2] M. Bekhti, M. Garraffa, N. Achir, K. Boussetta, and L. Létocart. Assessment of multi-uavs tracking for data gathering. In *13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, IWCMC 2017, Valencia, Spain, June 26-30, 2017*, pages 1004–1009. IEEE, 2017.
- [3] F. Benkhaldoun, C. Cérin, I. Kissami, and W. Saad. Challenges of translating hpc codes to workflows for heterogeneous and dynamic environments. In *2017 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS)*, pages 858–863. IEEE, 2017.
- [4] D. Q. Bui, H. Laurence, and D. Bérangère. Domain decomposition method in time direction for transport control. In *International Domain Decomposition Conference, DD27*, 2022.
- [5] M. Chahbar, G. Diaz, and A. Dandoush. Inters : Towards inter-slice bandwidth resource sharing. In *22nd IEEE International Conference on High Performance Switching and Routing, HPSR 2021, Paris, France*.
- [6] M. Chahbar, G. Diaz, A. Dandoush, C. Cerin, and K. Ghomid. NESSMA : Network slice subnet management framework. In *10th International conference on the Network of the Future - NoF 2019, Rome, Italy*.
- [7] M. Chahbar, G. Diaz, A. Dandoush, C. Cérin, and K. Ghomid. A comprehensive survey on the E2E 5G network slicing model. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 18(1) :49–62, 2021.
- [8] I. Chollet, L. Lagardère, and J.-P. Piquemal. Ankh : A generalized O(N) interpolated ewald strategy for molecular dynamics simulations. *Journal of Chemical Theory and Computation*, 2023.
- [9] G. Ciaramella, M. J. Gander, L. Halpern, and J. Salomon. Methods of Reflections : relations with Schwarz methods and classical stationary iterations, scalability and preconditioning. *The SMAI Journal of computational mathematics*, 5 :161–193, 2019.
- [10] F. Cuvelier, M. J. Gander, and L. Halpern. Fundamental coarse space components for schwarz methods with crosspoints. In *Domain Decomposition Methods in Science and Engineering XXVI*, pages 41–52. Springer International Publishing, 2022.
- [11] J. Fořt, J. Karel, D. Trdlička, F. Benkhaldoun, I. Kissami, J.-B. Montavon, K. Hassouni, and J. Z. Mezei. Finite volume methods for numerical simulation of the discharge motion described by different physical models. *Advances in Computational Mathematics*, 45 :2163–2189, 2019.
- [12] M. Gander, L. Halpern, F. Hubert, and S. Krell. Optimized overlapping ddfv schwarz algorithms. In *Finite Volumes for Complex Applications IX - Methods, Theoretical Aspects, Examples*, pages 365–373. Springer International Publishing, 06 2020.
- [13] M. Gander, L. Halpern, F. Hubert, and S. Krell. Optimized schwarz methods with general ventcell transmission conditions for fully anisotropic diffusion with discrete duality finite volume discretizations. *Moroccan Journal of Pure and Applied Analysis*, 7 :182–213, 07 2021.
- [14] M. Gander, L. Halpern, and V. Martin. Multiscale analysis of heterogeneous domain decomposition methods for time-dependent advection reaction diffusion problems. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 344 :904–924, 06 2018.

- [15] M. Gander, L. Halpern, and K. Santugini-Repiquet. On optimal coarse spaces for domain decomposition and their approximation. In *Domain Decomposition Methods in Science and Engineering XXIV*, pages 271–280. LNCSE, Springer-Verlag, 01 2018.
- [16] M. Gander, L. Halpern, and K. Santugini-Repiquet. Comparison of continuous and discrete techniques to apply coarse corrections. In *Domain Decomposition Methods in Science and Engineering XXV*, pages 143–150. LNCSE, Springer-Verlag, 10 2020.
- [17] M. G. Gander, F. Kwok, and J. Salomon. PARAOPT : A parareal algorithm for optimality systems. *SIAM J. Sci. Comput.*, 42(5), 2020.
- [18] M. J. Gander and L. Halpern. A simple finite difference discretization for ventcell transmission conditions at cross points. In *Domain Decomposition Methods in Science and Engineering XXVI*, pages 257–264. Springer International Publishing, 2022.
- [19] M. J. Gander, L. Halpern, F. Hubert, and S. Krell. Discrete optimization of robin transmission conditions for anisotropic diffusion with discrete duality finite volume methods. *Vietnam Journal of Mathematics*, 49 :1349–1378, 2020.
- [20] M. J. Gander, L. Halpern, F. Hubert, and S. Krell. Overlapping DDFV schwarz algorithms on non-matching grids. In *Domain Decomposition Methods in Science and Engineering XXVI*, pages 373–380. Springer International Publishing, 2022.
- [21] M. J. Gander, L. Halpern, J. Rannou, and J. Ryan. A direct time parallel solver by diagonalization for the wave equation. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 41(1) :A220–A245, 2019.
- [22] M. Garraffa, M. Bekhti, L. Letocart, N. Achir, and K. Boussetta. Drones path planning for WSN data gathering : A column generation heuristic approach. In *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, (IEEE WCNC 2018)*, pages 1–6, Barcelona, Spain, 2018.
- [23] Z. Ghoudi, S. Maazioui, F. Benkhaldoun, and N. Hajjaji. A new rheological model for phosphate slurry flows. *Fluids*, 8(2) :57, 2023.
- [24] I. Kissami, C. Cérin, F. Benkhaldoun, and G. Scarella. Parallelization of the ADAPT 3D streamer propagation code. In *2016 IEEE Intl Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE Intl Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC) and 15th Intl Symposium on Distributed Computing and Applications for Business Engineering (DCABES)*, pages 242–245. IEEE, 2016.
- [25] I. Kissami, C. Cérin, F. Benkhaldoun, and G. Scarella. Towards parallel CFD computation for the adapt framework. In *Algorithms and Architectures for Parallel Processing : 16th International Conference, ICA3PP 2016, Granada, Spain, December 14-16, 2016, Proceedings 15*, pages 374–387. Springer, 2016.
- [26] I. Kissami, S. Maazioui, and F. Benkhaldoun. Parallel finite volume code for plasma with unstructured adaptive mesh refinement. *World Congress in Computational Mechanics and ECCOMAS Congress*, 2022.
- [27] I. Kissami and A. Ratnani. Manapy : MPI-based framework for solving partial differential equations using finite-volume on unstructured-grid, 2022.
- [28] S. Maazioui, I. Kissami, F. Benkhaldoun, and D. Ouazar. Numerical study of viscoplastic flows using a multigrid initialization algorithm. *Algorithms*, 16(1) :50, 2023.
- [29] A. Rafiei, M. Bollhöfer, and F. Benkhaldoun. A block version of left-looking AINV preconditioner with one by one or two by two block pivots. *Applied Mathematics and Computation*, 350 :366–385, 2019.
- [30] M. Ziggaf, I. Kissami, M. Boubekour, F. Benkhaldoun, and I. El Mahi. A three-dimensional FVC scheme on non-uniform tetrahedron meshes : application to the 3D Euler equation, 2022.

2.3.3 Axe 3 : Physique mathématique, Physique statistique, Combinatoire

• Équipes impliquées dans cet axe :

- *Probabilités et Statistiques* et *Systèmes Dynamiques* du LAGA,
- CALIN (*Combinatoire, ALgorithmique et INteractions*) du LIPN.

Cinq grandes thématiques ont été plus particulièrement identifiées ; elles correspondent à des objets étudiés à la fois au LIPN et au LAGA (parfois avec des approches, questions, et méthodes complémentaires, donnant d'ailleurs lieu à divers articles en communs, projets en communs, encadrements en commun, participations à des conférences/journées en commun).

Après un récapitulatif des actions financées, nous présentons ci-après, pour chacune de ces cinq thématiques, un bilan des travaux effectués sur la période écoulée.

L'activité scientifique peut être résumée avec les éléments suivants :

- un colloque international “Probabilités et combinatoire” (21-23 oct. 2019). Orateurs : Alexander Iksanov, Dariusz Buraczewski, Jean-Baptiste Gouéré, Vincent Beffara, Andrea Sportiello, Sergey Dovgal, Marie Thérêt, Robin Stephenson, Valentin Féray, Jacopo Borga, Anne-Laure Basdevant, Minmin Wang, Grégory Miermont.
- 12 journées scientifiques “MathSTIC” (avec notamment comme orateurs invités : Jérémie Bouttier, Michael Drmota, Samantha Fairchild, Cyril Marzouk, Benedikt Stufler, Guillaume Chapuy, Jérémie Bettinelli, Erik Slivken, Luis Fredes, Corentin Boissy, Vincent Delecroix, Quentin De Mourgues, Giovanni Forni, Vaibhav Gadre, Élise Goujard, Rodolfo Gutierrez, Carlos Matheus, Axel Bacher, Kilian Raschel, Arvind Singh, Niccolò Torri, Alexander Pilz, Thomas Budzinski, Lionel Pournin, Thomas Fernique et aussi de façon inter-axe : Andrew Cairns, Aline Carneiro Viana, Laurent Dumas, David Sarrut, Chi Tran).
- Une thèse débutée en 2020, soutenance prévue à l'automne 2023 : Théophile Buffière, “Aspects combinatoires et probabilistes des polytopes et zonotopes”. Co-encadrée par Lionel Pournin (LIPN) et Philippe Marchal (LAGA).
- 2 postdocs : Michael Wallner et Christian Bean.
- 4 professeurs invités (longue durée ~ 1 mois) : Christina Goldschmidt, Filippo Colomo, Hugo Parlier, Jayadsev Athreya.
- cofinancement des journées annuelles “Combinatorics and Arithmetic for Physics : special days at IHÉS” (2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022), organisées par Gérard Duchamp, Maxim Kontsevich, Hoang Ngoc Minh, Gleb Koshevoy, Sergei Nechaev, Karol Penson.

Cartes et modèles physiques. En probabilité, l'étude des cartes et surfaces aléatoires a fait l'objet d'une activité de recherche très intense ces dernières années suite notamment aux articles de Le Gall et Miermont sur la construction de la carte aléatoire brownienne. Cela a été particulièrement fructueux en offrant de nombreux ponts avec la combinatoire et la physique. C'est dans ce contexte que Valentin Bonzom et Joseph Ben Geloun se sont intéressés à des modèles de cartes non orientées liée à des phénomènes de hiérarchie (hiérarchies KP et BKP) issus de la mécanique des fluides mais qui trouvent une pertinence particulière dans ces modèles de cartes. Ils ont également étudié des modèles de tenseurs liés à ces questions.

Les surfaces aléatoires ont également fait l'objet de collaborations entre des chercheurs du LIPN et du LAGA. On notera par exemple les travaux de Banderier-Marchal-Wallner sur les surfaces aléatoires liées aux tableaux de Young, qui mettent en évidence l'apparition de lois limites liées aux lois de Mittag-Leffler (produit de lois gamma généralisées) qui élargissent la liste des lois limites fondamentales déjà connues pour cette famille de modèles (telle la loi gaussienne ou la loi de Tracy–Widom).

Permutations aléatoires. Bacher, Bodini et al. [7] ont introduit et analysé des algorithmes de génération aléatoire de permutations qui sont quasi-optimaux en termes de temps et nombre de bits aléatoires consommés et qui (comparés par exemple à l'algorithme classique de Fisher-Yates) sont parallélisables et locaux (donc se comportent bien vis-à-vis des mémoires caches). Cela a abouti à une implémentation particulièrement efficace, utilisant bien les capacités des processeurs modernes.

Depuis les travaux de Knuth liant algorithmes de tri par pile(s) et des contraintes structurelles dans les permutations (par exemple, des motifs exclus), tout un champ d'investigations a été plus largement initié sur les propriétés énumératives et asymptotiques de ces permutations. Ces dernières années, après des approches expérimentales suggérant que de telles permutations contraintes tendent (quand leur taille tend vers l'infini) vers des objets limites, des premiers résultats rigoureux ont enfin pu être établis, par exemple une limite brownienne pour les permutations séparables, ou pour des classes de permutations closes par substitution, voir les travaux de Bassino et al. [17, 16, 14], ainsi que l'étude de divers paramètres des cographes aléatoires et du graphon Brownien [13, 15, 18].

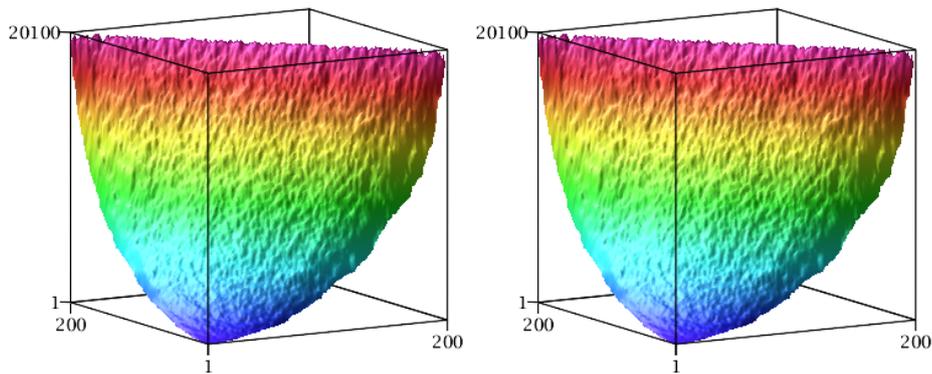


FIGURE 1 – Un tableau de Young de base $n = 200$. Pour n grand, la surface limite possède des fluctuations qui suivent une distribution de Mittag-Leffler généralisée, voir [6].

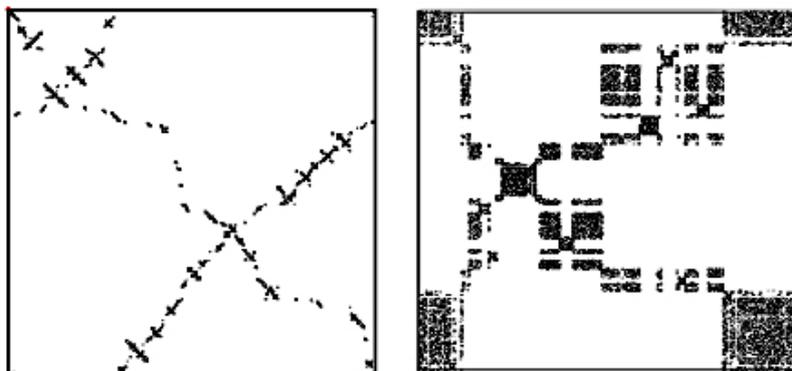


FIGURE 2 – Des exemples de formes limites de permutations contraintes.

Dans [4], Banderier et al. ont établi qu’une classe de permutations liée à un processus de flip n’avait pas une série génératrice D-finie, exhibant une asymptotique en $C^n n^\phi$, où ϕ est le nombre d’or. Ce modèle a servi de base à un résultat de théorie des nombres [10], prouvant la périodicité modulo m des récurrences polynomialement récurrentes, et prouvant à cette occasion plusieurs “super-congruences” (des propriétés de $a_n \bmod p^k$, pour p premier).

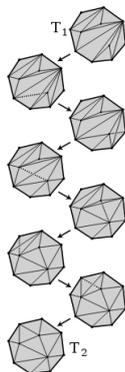


FIGURE 3 – Un exemple de flips.

Combinatoire des surfaces et des pavages. Une triangulation d’une surface orientable \mathcal{S} de type fini est une décomposition de \mathcal{S} en triangles dont les sommets appartiennent à un sous-ensemble préalablement fixé. Le graphe des flips correspondant est celui dont les sommets sont ces triangulations et dont les arêtes joignent deux triangulations qui diffèrent d’exactly deux triangles. Ce type de graphe apparaît tant en informatique, lorsque la surface est un disque et que les triangulations sont duales aux arbres binaires [37]

qu'en mathématiques où ils sont un modèle combinatoire du *mapping class group* de la surface [26]. Hugo Parlier de l'Université du Luxembourg a été invité par la fédération MathSTIC dans ce contexte en 2022. Lors de cette invitation, Lionel Pournin et lui ont obtenu une classification des surfaces en terme du nombre de chemins géodésiques entre deux triangulations [12]. Lorsque la longueur des chemins tend vers l'infini, ce nombre peut se comporter de façon polynomiale ou exponentielle, et ce comportement ne dépend (grossièrement) que du nombre de points marqués sur les bords de la surface.

Thomas Fernique et Carole Porrier ont travaillé sur la structure de pavages quasipériodiques [34, 35, 27], pour lesquels ils ont donné une procédure permettant d'obtenir des décorations particulières des tuiles, formant des "barres d'Ammann".

Marches aléatoires, arbres et structures apparentées. Les structures apparentées aux marches aléatoires et aux arbres sont un objet de recherches importantes, tant du point de vue combinatoire que probabiliste.

Cyril Banderier, Axel Bacher et al. [3, 2, 4, 5, 6] ont introduit une nouvelle méthode, la méthode du noyau *vectorielle*, qui permet d'étudier l'énumération et l'asymptotique de marche aléatoires ayant un "motif interdit". Cette méthode permet aussi d'étudier les paramètres dans des automates à piles, et les motifs dans les arbres, et les lois limites correspondantes.

Les marches aléatoires branchantes ou leurs limites en espace continu, à savoir le mouvement brownien branchant, forment un pan important de la recherche de l'équipe PS du LAGA. Ces modèles, où tant l'espace que le temps peuvent être discret ou continu, ont fait l'objet de nombreux articles autour de Yueyun Hu et Bastien Mallein. Ils concernent notamment des extensions d'études du cas classique brownien à des processus de Lévy [32, 24, 20], à des questions d'extremums [12], de théorie du potentiel (capacités [8], mesure d'occupations [21]), extension multidimensionnelles [1], branchement multitypes [28, 19]. Un modèle de physique statistique apparenté, introduit par Derrida et Retaux, a fait l'objet de plusieurs articles [22, 31, 30].

Certains modèles "exotiques" de marches aléatoires ont été étudiés par Laurent Tournier (modèle avec annihilation de particules [29], marches aléatoires sur des réseaux orientés [23], marches à activation aléatoire [36], modèle de la "nouille" infinie [25]). D'autres modèles d'arbres, construits par agrégation, ont été étudiés par Bénédicte Haas et N. Curien.

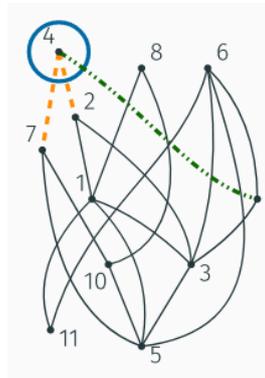


FIGURE 4 – Un exemple de DAG.

DAGs, lambdas-termes et posets. Les graphes dirigés sont un objet central en combinatoire et ont des applications très importantes en algorithmique puisqu'ils peuvent exprimer les conditions de précédence de tâches à effectuer lors de l'exécution d'un programme. Les travaux d'Olivier Bodini (avec Antoine Genitrini et coauteurs) sur les arbres croissants et leurs propriétés asymptotiques s'inscrivent dans cette optique. Une autre structure importante reliée est celle des lambda-termes, les structures de bases du lambda-calcul en logique, qui ont fait l'objet d'articles d'Olivier Bodini et de son doctorant Alexandros Singh. Enfin, un modèle alternatif à celui des DAGs (graphes dirigés sans cycles), appelé DOAGs, où on ajoute une structure planaire, a fait l'objet de travaux par Martin Pépin.

Références

- [1] R. Aguech, A. Althagafi, and C. Banderier. Height of walks with resets and the Moran model. *Séminaire Lotharingien de Combinatoire*, 2023.

- [2] A. Asinowski, A. Bacher, C. Banderier, and B. Gittenberger. Analytic combinatorics of lattice paths with forbidden patterns : asymptotic aspects. In J. A. Fill and M. D. Ward, editors, *29th International Conference on Probabilistic, Combinatorial and Asymptotic Methods for the Analysis of Algorithms (AofA 2018)*, volume 110 of *Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs)*, pages 1–14. Schloss Dagstuhl–Leibniz-Zentrum für Informatik, 2018.
- [3] A. Asinowski, A. Bacher, C. Banderier, and B. Gittenberger. Analytic combinatorics of lattice paths with forbidden patterns : enumerative aspects. In S. Klein, C. Martín-Vide, and D. Shapira, editors, *Language and Automata Theory and Applications. LATA 2018*, volume 10782 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 195–206. Springer, 2018.
- [4] A. Asinowski, A. Bacher, C. Banderier, and B. Gittenberger. Analytic combinatorics of lattice paths with forbidden patterns, the vectorial kernel method, and generating functions for pushdown automata. *Algorithmica*, 82 :386–428, 2020.
- [5] A. Asinowski and C. Banderier. On lattice paths with marked patterns : generating functions and multivariate Gaussian distribution. In *Proceedings of AofA 2020*, volume 159 of *Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs)*, pages 1 :1–1 :16, 2020.
- [6] A. Asinowski, C. Banderier, and V. Roitner. Generating functions for lattice paths with several forbidden patterns. *Séminaire Lotharingien de Combinatoire*, 84B :article #95, 12 pages, 2020. Proceedings of FPSAC 2020.
- [7] A. Bacher, O. Bodini, H.-K. Hwang, and T.-H. Tsai. Generating random permutations by coin tossing : classical algorithms, new analysis, and modern implementation. *ACM Trans. Algorithms*, 13(2) :43, 2017. Id/No 24.
- [8] T. Bai and Y. Hu. Capacity of the range of branching random walks in low dimensions. *Proc. Steklov Inst. Math.*, 316 :26–39, 2022.
- [9] C. Banderier, J.-L. Baril, and C. Moreira Dos Santos. Right-jumps and pattern avoiding permutations. *Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science*, pages 1–17, 2017.
- [10] C. Banderier and F. Luca. On the period mod m of polynomially-recursive sequences : a case study. *Journal of Integer Sequences*, 22 :19.5.2, 2019.
- [11] C. Banderier, P. Marchal, and M. Wallner. Periodic Pólya urns, the density method, and asymptotics of Young tableaux. *Annals of Probability*, 48(4) :1921–1965, 2020.
- [12] J. Barral, Y. Hu, and T. Madaule. The minimum of a branching random walk outside the boundary case. *Bernoulli*, 24(2) :801–841, 2018.
- [13] F. Bassino, M. Bouvel, M. Drmota, V. Féray, L. Gerin, M. Maazoun, and A. Pierrot. Linear-sized independent sets in random cographs and increasing subsequences in separable permutations. *Combinatorial Theory*, 2 :#15, 2022.
- [14] F. Bassino, M. Bouvel, V. Féray, L. Gerin, M. Maazoun, and A. Pierrot. Universal limits of substitution-closed permutation classes. *Journal of the European Mathematical Society*, 22 :3565–3639, 2020.
- [15] F. Bassino, M. Bouvel, V. Féray, L. Gerin, M. Maazoun, and A. Pierrot. Random cographs : Brownian graphon limit and asymptotic degree distribution. *Random Structures and Algorithms*, 60 :166–200, 2022.
- [16] F. Bassino, M. Bouvel, V. Féray, L. Gerin, M. Maazoun, and A. Pierrot. Scaling limits of permutation classes with a finite specification : a dichotomy. *Advances in Mathematics*, 405 :108513, 2022.
- [17] F. Bassino, M. Bouvel, V. Féray, L. Gerin, and A. Pierrot. The Brownian limit of separable permutations. *Annals of Probability*, 46 :2134–2189, 2018.
- [18] F. Bassino, M. Bouvel, V. Féray, L. Gerin, and A. Pierrot. Scaling limit of graph classes through split decomposition. *arXiv :2207.12253*, page preprint, 2022.
- [19] M. A. Belloum and B. Mallein. Anomalous spreading of reducible multitype branching Brownian motion. *Electron. J. Probab.*, 26(61) :1–39, 2021.
- [20] J. Bertoin and B. Mallein. Infinitely ramified point measures and branching Lévy processes. *Ann. Probab.*, 47(3) :1619–1652, 2019.
- [21] D. Chen, L. de Raphélis, and Y. Hu. Favorite sites of randomly biased walks on a supercritical Galton-Watson tree. *Stochastic Processes Appl.*, 128(5) :1525–1557, 2018.
- [22] X. Chen, V. Daggard, B. Derrida, Y. Hu, M. Lifshits, and Z. Shi. The Derrida-Retaux conjecture on recursive models. *Ann. Probab.*, 49(2) :637–670, 2021.

- [23] A. Collecchio, K. Hamza, and L. Tournier. A deterministic walk on the randomly oriented manhattan lattice. *Electronic Journal of Probability*, 24 :1–20, 2019.
- [24] A. Cortines and B. Mallein. The genealogy of an exactly solvable Ornstein-Uhlenbeck type branching process with selection. *Electron. Commun. Probab.*, 23(98) :13, 2018.
- [25] N. Curien, G. Kozma, V. Sidoravicius, and L. Tournier. Uniqueness of the infinite noodle. *Annales de l’Institut Henri Poincaré D*, 6(2) :221–238, 2019.
- [26] V. Disarlo and H. Parlier. The geometry of flip graphs and mapping class groups. *Transactions of the American Mathematical Society*, 372 :3809–3844, 2019.
- [27] T. Fernique and C. Porrier. Ammann bars for octagonal tilings, 2022.
- [28] B. Haas and R. Stephenson. Scaling limits of multi-type Markov branching trees. *Probab. Theory Relat. Fields*, 180(3-4) :727–797, 2021.
- [29] J. Haslegrave, V. Sidoravicius, and L. Tournier. Three-speed ballistic annihilation : phase transition and universality. *Selecta Mathematica*, 27(5) :1–38, 2021.
- [30] Y. Hu, B. Mallein, and M. Pain. An exactly solvable continuous-time Derrida–Retaux model. *Comm. Math. Phys.*, 375(1) :605–651, 2020.
- [31] Y. Hu, B. Mallein, and M. Pain. An exactly solvable continuous-time Derrida–Retaux model. *Commun. Math. Phys.*, 375(1) :605–651, 2020.
- [32] B. Mallein. N -branching random walk with α -stable spine. *Theory Probab. Appl*, 62(2) :295–318, 2018.
- [33] H. Parlier and L. Pournin. Getting lost in flip-graphs. *in preparation*, 2023.
- [34] C. Porrier and A. Blondin Massé. The Leaf function of graphs associated with Penrose tilings. *International Journal of Graph Computing*, 1 :1–24, 2020.
- [35] C. Porrier and T. Fernique. A general approach to ammann bars for aperiodic tilings. In A. Castañeda and F. Rodríguez-Henríquez, editors, *LATIN 2022 : Theoretical Informatics*, pages 574–589, Cham, 2022. Springer International Publishing.
- [36] L. Rolla and L. Tournier. Non-fixation for biased activated random walks. *Annales de l’Institut Henri Poincaré, Probabilités et Statistiques*, 54(2) :938–951, 2018.
- [37] D. Sleator, R. Tarjan, and W. Thurston. Rotation distance, triangulations, and hyperbolic geometry. *Journal of the American Mathematical Society*, 1 :647–681, 1988.

2.3.4 Axe 4 : Catégories : entre calcul et topologie

Équipes impliquées dans l'axe 4 :

- TA (*Topologie Algébrique*) du LAGA,
- LoVe (*Logique et Vérification*) et CALIN (*Combinatoire, ALgorithmique et INteractions*) du LIPN.

Il y a une forte intersection sur les thématiques liées aux catégories et aux structures algébriques, avec souvent des objets communs (par exemple les catégories supérieures) étudiés pour des raisons différentes (sémantique des programmes côté LIPN, théorie de l'homotopie côté LAGA) ou par des méthodes différentes.

L'axe 4 est centré sur ces thématiques communes : opérades et monades, catégories supérieures, invariants homologiques et topos.

L'axe a été créé au printemps 2022. Dans le compte-rendu qui suit, nous incluons aussi des activités et publications qui sont antérieures à la création de l'axe (mais toujours sur la période 2017–2022), car elles sont pertinentes à l'exposition de ses thématiques et travaux. La création très récente de l'axe explique l'absence de résultat commun et de publication inter-laboratoire sur la période d'évaluation.

Pour l'instant, les activités de l'axe se sont matérialisées par le recrutement d'un postdoctorant (Morgan Rogers, 16 mois de postdoc) et par l'organisation d'un groupe de travail hebdomadaire (une dizaine de participants réguliers).

L'activité scientifique peut être résumée avec les éléments suivants :

- Journée "Opérades" en novembre 2020, Coorganisé par Thomas Seiller et Eric Hoffbeck, 4 exposés en ligne. Une cinquantaine de participants, Site web : <https://operades20.sciencesconf.org/>
- Postdoc : Morgan Rogers sur deux contrats de 8 mois, depuis janvier 2022.
- Groupe de travail "Théorie des catégories", Organisé par Morgan Rogers, quasi-hebdomadaire (28 séances sur la période janvier 2022–février 2023). Nombre d'exposants : 10 internes et 5 externes. Les séances sont en mode hybride (elles sont retransmises en ligne pour permettre la participation à distance), et sont enregistrées. Les enregistrements sont publiquement accessibles : <https://bbb.lipn.univ-paris13.fr/b/rog-vao-uwm-s2j>

Opérades et monades L'étude des opérades a été amorcée dès les années 70 pour l'étude de structures algébriques et de structures à homotopie près. Elle a connu une renaissance dans les années 90 et le domaine a explosé depuis, que ce soit en interaction avec d'autres domaines (physique, géométrie symplectique, par exemple) ou dans diverses généralisations (propérades, infini-opérades, par exemple).

L'interface entre les opérades et la programmation est déjà assez bien développée, par plusieurs chercheurs en France et à l'étranger. C'est un thème de recherche présent au LAGA et qui occupe un rôle central dans certaines approches de la syntaxe des langages de programmation, étudiées dans l'équipe LoVe du LIPN. Mentionnons notamment l'utilisation de 2-opérades (multicatégories enrichies sur les catégories) pour l'axiomatisation des systèmes de types avec intersection [17, 18].

Une autre approche, encore plus générale et d'intérêt reconnu en sémantique de la programmation, repose sur la notion de monade, ou sur des variantes de celle-ci. Dans certains cas, monades et opérades sont interchangeables et le passage d'une structure à l'autre peut offrir un point de vue supplémentaire [13]. L'intérêt des monades en sémantique des langages de programmation est bien établi [20] et la notion est aujourd'hui développée dans l'équipe LoVe surtout dans sa version *gradée* [9], avec des applications à la sémantique aux langages de programmation probabiliste [3]. Cette thématique de recherche a été l'objet d'un projet ANR JCJC porté par un membre de l'équipe LoVe sur la période 2019–2022 (<https://lipn.univ-paris13.fr/~breuvert/CoGITARe/>).

Il faut aussi souligner que les opérades ont plusieurs applications en combinatoire, et des membres de l'équipe CALIN du LIPN ont manifesté leur intérêt à interagir sur ce sujet. Notamment l'étude combinatoire de l'associaèdre et d'autres polytopes associés à des structures algébriques est menée côté LAGA par Bruno Vallette [16] et côté LIPN par Lionel Pournin [22]. Une thèse liée aux thématiques polytopales, financée par MathSTIC, est co-dirigée par Bruno Vallette et Roland Grappe (AOC, LIPN), à l'interface entre axe 3 et axe 4.

Une journée LAGA/LIPN sur les opérades a été organisée en novembre par Eric Hoffbeck et Thomas Seiller, avec succès (une cinquantaine de participants, en ligne, <https://operades20.sciencesconf.org/>)

Participants à cette thématique (permanents et non-permanents) :

- LAGA : Grégory Ginot, Eric Hoffbeck, Geoffroy Horel, Bruno Vallette, Coline Emprin (doc), Oisín Flynn-Connolly (doc), Francesca Pratali (doc)
- LIPN : Flavien Breuvert, Damiano Mazza, Lionel Pournin, Thomas Seiller

Publications : [17], [3], [18], [16]

Structures catégoriques supérieures La réécriture, notion clé pour la sémantique opérationnelle des langages de programmation, peut être formulée dans un cadre 2-catégorique [23]. Des développements récents montrent que la sémantique dénotationnelle peut aussi être reformulée de façon 2-catégorique, en remplaçant des égalités par des isomorphismes [8]. Plus généralement, les notions d’enrichissement sont très importantes en logique et programmation. L’équipe LoVe a développé cette thématique par le biais des 2-opérades susmentionnées [17, 18] mais aussi par les foncteurs polynomiaux, qui ont été utilisés pour construire un nouveau modèle 2-catégorique du λ -calcul [7].

La réécriture est également présente du côté mathématiques, pour mieux comprendre les présentations (de monoïdes [10], d’algèbres [11], d’opérades [12, 5]) et permet d’obtenir des méthodes explicites pour des calculs d’homologie. Elle s’inscrit naturellement dans un cadre de catégories supérieures, par le point de vue globulaire notamment, où les relations sont interprétées comme des 1-cellules, les relations entre relations comme des 2-cellules, etc. Cette interprétation de la réécriture permet ainsi de mieux comprendre des actions de monoïdes sur des catégories [10].

Le cadre catégorique supérieur (les $(\infty, 1)$ -catégories et leurs variantes) trouve ses sources en topologie algébrique depuis les années 2000, et est notamment devenu fondamental dans l’étude des structures algébriques à homotopie près (sujet qui a émergé dès les années 70 avec l’étude des espaces de lacets) [26]. Les membres de l’équipe TA du LAGA impliqués dans l’axe 4 ont une expertise dans ce domaine.

Participants à cette thématique (permanents et non-permanents) :

- LAGA : Grégory Ginot, Eric Hoffbeck, Geoffroy Horel, Bruno Vallette, Coline Emprin (doc), Oisín Flynn-Connolly (doc), Francesca Pratali (doc)
- LIPN : Flavien Breuvert, Damiano Mazza, Marie Kerjean, Thomas Seiller, Aloÿs Dufour (doc), Nicolas Munnich (doc), Morgan Rogers (postdoc), William Troiani (doc)

Publications : [7], [11], [26]

Invariants topologiques, complexité algébrique Des recherches récentes de l’équipe LoVe du LIPN montrent qu’un certain nombre de résultats de bornes inférieures en théorie de la complexité (c’est-à-dire, des preuves que certains problèmes ne peuvent pas être résolus avec une quantité de ressources bornées d’une certaine façon) sont reformulables dans un cadre unifié basé sur un invariant nommé *entropie topologique* [21]. Pour l’instant, dans l’équipe LoVe les travaux sur cette thématique se sont concentrés sur une approche faisceautique aux α -graphes, qui constituent des programmes adhérent au paradigme “action de monoïde comme modèle de calcul” introduit dans [21].

Du côté LAGA, les invariants (co)homologiques venant de contextes topologiques ou algébriques sont un des thèmes fédérateurs de l’équipe TA du LAGA.

Participants à cette thématique (permanents et non-permanents) :

- LAGA : Christian Ausoni, Aurélien Djament, Grégory Ginot, Bruno Vallette
- LIPN : Damiano Mazza, Thomas Seiller, Aloÿs Dufour, Morgan Rogers

Publications : [21]

Théorie des catégories et des topos La théorie des topos peut fournir un cadre qui permet de comprendre les actions de monoïdes et de groupes pertinentes à la théorie de la complexité algorithmique, comme expliqué dans des travaux récents de l’équipe LoVe [24, 21]. Morgan Rogers, un post-doctorant expert en théorie des topos, a été recruté au LIPN pour poursuivre ce genre de travaux, ainsi que pour développer des liens avec d’autres sujets d’intérêt pour l’axe “Catégories” de MathSTIC. Mises à part les recherches mentionnées ci-dessus portant sur les α -graphes, les directions suivantes ont été explorées :

- en collaboration avec Axel Osmond, Morgan Rogers a obtenu une caractérisation intrinsèque des morphismes pro-étales présents dans le système de factorisation qu’Axel Osmond a découvert récemment.
- Les théorèmes de complétude dans la théorie des topos fournissent des conditions suffisantes pour qu’un topos ait assez de points, avec pour conséquence que lorsqu’un topos classifiant une théorie donnée possède cette propriété, la théorie est complètes (pour ses modèles ensemblistes). Les deux résultats de complétude les plus connus sont ceux de Deligne et de Makkai et Reyes concernant respectivement les topos sur des sites dits localement cohérents et séparables (dénombrables). Les deux résultats ont des preuves notoirement difficiles, et bien qu’ils aient été étendus à des cardinalités plus élevées, on ne connaît pas encore à quel point ils pourraient être étendus. Morgan Rogers a

étudié ce problème en collaboration avec Ivan Di Liberti, en présentant ses travaux à la conférence TACL.

- Un résultat de la théorie des modèles indique que les sous-groupes fermés du groupe d'automorphisme topologisé d'un ensemble correspondent à des structures relationnelles sur cet ensemble. En utilisant la théorie topologique semi-galoisienne construite dans sa thèse, Morgan Rogers a étendu ce résultat à une correspondance entre des sous-monoïdes fermés du monoïde d'endomorphisme de structures plus riches et des extensions convenante à ces structures.

Une autre direction de recherche, qui ne porte pas sur les topos mais qui rentre plus généralement dans le cadre de la théorie des catégories, concerne la construction des catégories différentielles [2]. Ceci représentent une axiomatisation catégorique de modèle de la logique linéaire différentielle (DiLL), une extension de la logique linéaire. Bien que ceux-ci soient très utilisés et étudiés en soit, leur étude manque de liens solides avec le reste de la théorie des catégories. Nous visons à exporter les idées de DiLL vers d'autres domaines de l'informatique comme la programmation différentiable, et pour cela nous avons besoin d'une axiomatisation catégorique de DiLL qui nous rapproche de la sémantique catégorique des langages de programmation en général, dans le sens des travaux récents de l'équipe LoVe [14, 15].

Participants à cette thématique (permanents et non-permanents) :

- LAGA : Christian Ausoni, Aurélien Djament
- LIPN : Damiano Mazza, Marie Kerjean, Thomas Seiller, Aloÿs Dufour, Baptiste Chanus, Morgan Rogers, William Troiani

Publications : [14], [15]

Références

- [1] H. P. Barendregt. *The lambda calculus - its syntax and semantics*, volume 103 of *Studies in logic and the foundations of mathematics*. North-Holland, 1985.
- [2] R. Blute, J. R. B. Cockett, and R. A. G. Seely. Differential categories. *Math. Struct. Comput. Sci.*, 16(6) :1049–1083, 2006.
- [3] F. Brevart and U. Dal Lago. On intersection types and probabilistic lambda calculi. In *Proceedings of the 20th International Symposium on Principles and Practice of Declarative Programming (PPDP)*, pages 8 :1–8 :13. ACM, 2018.
- [4] F. Brevart, T. Ehrhard, N. Munnich, and F. Olimpieri. A fibrational approach to indexed linear logic. 2022.
- [5] V. Dotsenko and A. Khoroshkin. Gröbner bases for operads. *Duke Math. J.*, 153(2) :363–396, 2010.
- [6] C. Eberhart, T. Hirschowitz, and T. Seiller. An intensionally fully-abstract sheaf model for π . *Log. Methods Comput. Sci.*, 13(4), 2017.
- [7] E. Finster, S. Mimram, M. Lucas, and T. Seiller. A cartesian bicategory of polynomial functors in homotopy type theory. In *Proceedings of the 37th Conference on Mathematical Foundations of Programming Semantics (MFPS)*, volume 351 of *EPTCS*, pages 67–83, 2021.
- [8] M. Fiore, N. Gambino, M. Hyland, and G. Winskel. The cartesian closed bicategory of generalised species of structures. *Journal of the London Mathematical Society*, 77(1) :203–220, 2008.
- [9] M. Gaboardi, S. Katsumata, D. A. Orchard, F. Brevart, and T. Uustalu. Combining effects and coefficients via grading. In *Proceedings of the 21st ACM SIGPLAN International Conference on Functional Programming (ICFP)*, pages 476–489. ACM, 2016.
- [10] S. Gaussent, Y. Guiraud, and P. Malbos. Coherent presentations of Artin monoids. *Compos. Math.*, 151(5) :957–998, 2015.
- [11] Y. Guiraud, E. Hoffbeck, and P. Malbos. Convergent presentations and polygraphic resolutions of associative algebras. *Math. Z.*, 293(1-2) :113–179, 2019.
- [12] E. Hoffbeck. A Poincaré-Birkhoff-Witt criterion for Koszul operads. *Manuscr. Math.*, 131(1-2) :87–110, 2010.
- [13] M. Hyland and J. Power. The category theoretic understanding of universal algebra : Lawvere theories and monads. In *Computation, Meaning, and Logic : Articles dedicated to Gordon Plotkin*, volume 172 of *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, pages 437–458. Elsevier, 2007.
- [14] M. Kerjean. A logical account for linear partial differential equations. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science, (LICS)*, pages 589–598. ACM, 2018.

- [15] M. Kerjean and J. P. Lemay. Higher-order distributions for differential linear logic. In *Proceedings of the 22nd International Conference on Foundations of Software Science and Computation Structures (FOSSACS)*, volume 11425 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 330–347. Springer, 2019.
- [16] N. Masuda, H. Thomas, A. Tonks, and B. Vallette. The diagonal of the associahedra. *J. Éc. Polytech., Math.*, 8 :121–146, 2021.
- [17] D. Mazza. *Polyadic Approximations in Logic and Computation*. Habilitation thesis, Université Paris 13, 2017.
- [18] D. Mazza, L. Pellissier, and P. Vial. Polyadic approximations, fibrations and intersection types. *Proc. ACM Program. Lang.*, 2(POPL) :6 :1–6 :28, 2018.
- [19] P.-A. Melliès. *Une étude micrologique de la négation*. Habilitation à diriger des recherches, Université Paris 7, 2017.
- [20] E. Moggi. Notions of computation and monads. *Inf. Comput.*, 93(1) :55–92, 1991.
- [21] L. Pellissier and T. Seiller. Lower bounds for PRAMS over Z. *CoRR*, abs/2002.10888, 2020.
- [22] L. Pournin. The diameter of associahedra. *Adv. Math.*, 259 :13–42, 2014.
- [23] R. A. G. Seely. Modelling computations : A 2-categorical framework. In *Proceedings of the Symposium on Logic in Computer Science (LICS)*, pages 65–71. IEEE Computer Society, 1987.
- [24] T. Seiller. Interaction graphs : Non-deterministic automata. *ACM Trans. Comput. Log.*, 19(3) :21 :1–21 :24, 2018.
- [25] T. Univalent Foundations Program. *Homotopy Type Theory : Univalent Foundations of Mathematics*. Institute for Advanced Study, 2013.
- [26] B. Vallette. Homotopy theory of homotopy algebras. *Ann. Inst. Fourier*, 70(2) :683–738, 2020.

2.4 Budgets 2017/2022

Les recettes varient selon les années, car les laboratoires complètent les financements de l'université et du CNRS selon les besoins de la fédération et selon leur capacité. Ainsi, le CNRS finance à hauteur de 5 K€ depuis 2016 et l'Université Sorbonne Paris Nord à hauteur de 91,5 K€. Côté laboratoires, le financement est très variable en fonction des années. En règle générale, le LAGA et le LIPN ont financé à hauteur maximale de 10 K€ chacun et le L2TI de 5 K€.

Au total, la fédération a pu disposer de 105 à 125 K€ sur la période 2017–2022.

Le tableau suivant résume la répartition des dépenses entre 2017 et 2022 (en K€), sans y inclure les financements des contrats doctoraux :

année	Journées	Invitations	Missions	Stages	Post-doc	Bibli/matériel	Tot
2017	2,5	9,4	2,5	4,7	38,3	47,8	105,2
2018	7,4	11,7	17,6	3,0	38,3	47,8	125,8
2019	9,5	8,1	6,9	3,2	38,3	48,0	114,8
2020	1,5	10,3	0,0	0,0	38,3	55,1	105,2
2021	7,4	0,1	0,0	3,0	38,3	56,2	105,0
2022	2,5	4,4	4,8	3,2	38,3	57,5	110,7

En rouge sont mises en évidence les perturbations attribuables à la pandémie de Covid

3 Projet scientifique pour la période 2023–2028

3.1 Projets scientifiques et effets structurants

Les objectifs mentionnés dans le rapport pour la période 2013-2017 restent d'actualité pour le quinquennat à venir. De même, l'organigramme et le pilotage resteront similaires. Les seules modifications sont liées aux changements de direction des laboratoires au 1er janvier 2024. Dans les paragraphes suivants nous exposons les lignes de recherche que chaque axe entend entreprendre et/ou poursuivre au cours des cinq prochaines années

3.1.1 Axe 1 : Optimisation et Apprentissage appliqués aux contenus numériques

• Équipes impliquées dans cet axe :

- MT2I (*Mathématiques pour le traitement de l'information et de l'image*) du LAGA,
- AOC (*Algorithmes et Optimisation Combinatoire*), A³ (*Apprentissage Artificiel & Applications*) et RCLN (*Représentation des Connaissances et Langage Naturel*) du LIPN,
- Multimedia du L2TI.

Ci-dessous les thèmes que nous envisageons de développer pendant la période à venir.

Intelligence, Reconnaissance de formes et Qualité L'expertise scientifique et la complémentarité des équipes est un atout indéniable pour le développement des travaux entamés. Le bilan scientifique, sur la période écoulée, nous amène à positionner nos travaux autour de l'intelligence, de la reconnaissance de formes où la qualité visuelle joue un rôle important notamment pour l'imagerie médicale. Quatre principaux thèmes sont envisagés :

1. Le débruitage, la restauration, la classification et la détection d'anomalies dans le contexte d'images médicales impliquant les membres des équipes MBI et multimédia.
2. De nombreux défis à la fois scientifiques et technologiques restent à relever au niveau du LabCom IRISER. Le contexte d'apprentissage notamment en régime few-shot sera poursuivi. Ces thématiques impliquent les membres des équipes A³ et multimédia.
3. Le codage source (notamment de contenus visuels) basé sur des approches d'apprentissage profond suscite des investigations notamment pour traiter le problème de l'optimisation débit-distorsion qui reste extrêmement coûteux dans les solutions disponibles dans la littérature scientifique. Ce thème implique les membres des équipes multimédia et AOC.
4. Le méta apprentissage pour un apprentissage intelligent sera poursuivi. Ce thème implique des membres des équipes MBI et A³.

Optimisation et Traitement Automatique des Langues (TAL) Les méthodes de décomposition du dual lagrangien pour le traitement automatique des langues sont maintenant bien établies. Nous avons montré à travers différentes tâches d’analyse syntaxique qu’elles permettaient d’obtenir des résultats à l’état-de-l’art. Cependant, ces méthodes reposent sur des algorithmes itératifs de reparamétrisation des sous-systèmes (*e.g.* méthodes du sous-gradient, bundle, lagrangien augmenté...) qui convergent lentement, et les temps de convergence dépendent de conditions initiales difficiles à maîtriser. Nous avons donc proposé un projet autour des méthodes semi-amorties pour la relaxation lagrangienne, c’est-à-dire l’utilisation de l’apprentissage automatique pour prédire les valeurs initiales des reparamétrisations. Concrètement ce projet prend deux formes : tout d’abord la thèse (en cours) de Francesco Demelas (supervisée par R. Wolfler-Calvo et M. Lacroix, en collaboration avec E. Traversi et J. Le Roux) qui travaille sur ces méthodes pour un problème de routage dans les réseaux, et à travers une soumission ANR AAPG23 (portée par J. Le Roux, toujours en cours d’évaluation) sur l’extension de ces méthodes pour des tâches applicatives en IA, notamment le traitement automatique des langues. Des discussions au sein du MathSTIC ont également montré que ces méthodes pourraient avoir des applications au sein d’autres projets de l’axe (en vision), et même au-delà (cf. Axe 2, travaux de K. Bousseta).

3.1.2 Axe 2 : Calcul Haute-Performance, Systèmes distribués

• Équipes impliquées dans cet axe :

- MCS (*Modélisation et Calcul Scientifique*) et PS (Probabilités et Statistiques) du LAGA,
- AOC (*Algorithmes et Optimisation Combinatoire*) et LoVe (ex-LCR), (*Logique et Vérification*) du LIPN,
- Réseau du L2TI.

Le bilan du précédent quinquennal a été marqué par la consolidation des collaborations initiées avant 2017. Les thématiques ont été portées par des collègues moteurs des trois laboratoires. Toutefois, tous les projets prévus n’ont pas pu être réalisés à cause de la crise sanitaire liée au Covid, mais aussi du fait du départ de certains collègues qui porteurs sur certaines actions. C’est notamment le cas suite au départ de Camille Coti (AOC-LIPN) qui était motrice sur la thématique des Algorithmes Parallèles pour l’Exascale Robuste.

Le projet pour le prochain quinquennal a été conçu afin d’amplifier la collaboration mais aussi pour impliquer un plus grand nombre de collègues des équipes AOC (LIPN), LoVe (LIPN), MCS (LAGA) et Réseaux (L2TI). A cette fin, nous souhaitons développer dans l’axe 2 les projets autour de l’Optimisation appliquées au HPC et aux Réseaux.

Calcul Haute-Performance La collaboration tripartite entre le LAGA, le LIPN et le MSDA (UM6P, Maroc) animée notamment par F. Benkhaldoun, C. Cerin et I. Kissami, a vocation à se poursuivre. Il s’agit de continuer à travailler sur le développement de plateformes numériques généralistes optimisées de type Manapy [27]. Ces plateformes ont pour objectif de permettre la résolution numérique en volumes finis d’une large gamme de problèmes issus de la physique. Elles supporteront l’évolution dynamique des maillages et le calcul distribué via l’utilisation de bibliothèques de partitions de domaines et des solveurs numériques de systèmes performants. Une attention particulière sera également portée à la sobriété énergétique de ces plateformes. L’appui du pôle MathStic, notamment pour la plateforme MAGI mais aussi en terme de financement d’invitations mutuelles et aussi pour des thèses et des postdocs, sera précieux.

Chimie computationnelle Le recrutement en septembre 2022 d’I. Chollet au LAGA nous permet d’envisager la création d’un nouvel axe de collaboration autour de la chimie computationnelle. Que ce soit pour des applications en dynamique moléculaire, en chimie quantique ou en chimie assistée par informatique quantique, les simulations réalistes imposent le développement de méthodes à la fois scalables à large échelle et adaptées aux architectures de calcul modernes (notamment multi-GPU). Au cœur des codes de simulations dans ce domaine, les méthodes de résolution approchées de problèmes à N corps pour les interactions atomiques comme de compression de tenseurs pleins des Hamiltoniens de la chimie quantique, ainsi que l’évaluation rapide et scalable de tenseurs creux des simulateurs quantiques, créent le besoin de développement de bibliothèques portables et efficaces. En particulier, des avancées mathématiques récentes, [8, 1] ouvrent la voie pour un usage généralisé des méthodes hiérarchiques et de compression à ces problématiques, mais leur parallélisation, leur portage GPU comme la mesure mathématique de leur erreur demeurent des tâches difficiles. Plus globalement, l’omniprésence de tenseurs en grande dimension dans les applications évoquées demande la mise en place de méthodes générales capables de traiter et compresser les objets en jeu, adaptées aux architectures modernes et distribuées et disposant d’interfaces autorisant la

manipulation dans des cas variés. La combinaison d’approches type BLAS, multi-précisions, de compression de tenseurs type tensor-train et de méthodes hiérarchiques ou de compression algébrique minimisant les communications apparaît donc comme un axe de recherche aux implications importantes dans la chimie computationnelle. Cet axe de travail fait écho à plusieurs axes de recherche menées au sein de l’équipe AOC du LIPN et la fédération MathStic compte donc utiliser ses ressources pour créer une synergie sur ce sujet important.

Placement et chainage optimisés des fonctionnalités réseaux virtualisées La virtualisation est une tendance confirmée dans les nouvelles technologies réseaux, comme dans la 5G. Le découplage avec le matériel permet de déployer de façon agile de nouveaux services, tout en assurant un usage plus efficace des ressources grâce à l’élasticité offerte pour le edge/fog/cloud computing. Néanmoins, la mise en place des services réseaux virtualisés pose encore de nombreuses difficultés car l’écosystème autour des SDN, NFV, slicing, SFC est évolutif, complexe et requiert un haut niveau d’expertise.

En outre, le déploiement et le chainage des fonctionnalités réseaux est un problème difficile à cause de la multiplicité et de la variété des services, de la complexité et de la taille du graphe de dépendance des fonctions qui peuvent composer chaque service, du grand nombre potentiel des nœuds (serveur, switch, routeurs, point d’accès) où peuvent être déployés les fonctionnalités, de la variété et de l’élasticité des ressources disponibles sur chaque nœud et de la multiplicité de paramètres de qualité de service (e.g. latence) et des contraintes fonctionnelles (e.g. sécurité) à respecter de bout en bout sur les flux de données. De ce fait, le déploiement et le chainage se fait assez souvent encore de façon manuel et statique. L’objectif des travaux est de pouvoir le réaliser à la demande et de façon quasi-autonome. C’est à dire, de permettre la mise en place des nouveaux services réseau de façon agile, quasi-autonome et efficace.

Plusieurs membres de l’équipe Réseaux au L2TI et de l’équipe AOC ont des travaux sur les placements et le chainage des service réseaux. Ils sont essentiellement formalisés comme étant des problèmes d’optimisation combinatoire (*knapsack*, *bin-packing*, *facility location*). Les membres de ces deux équipes ont une bonne connaissance de ces problématiques et partagent aussi les mêmes outils. La complémentarité réside dans l’expertise de l’équipe Réseaux pour formaliser de façon précise ces problématiques de placement et de chainage et d’en évaluer de façon réaliste ses performances (e.g. utilisation de simulateurs dédiés, développement de prototypes et plateformes d’expérimentation) et la maîtrise par l’équipe AOC dans la conception d’algorithmes d’optimisation performants.

En outre, deux thèses ont récemment démarré sur ces problématiques et sont susceptibles de soutenir les travaux de cette thématique :

1. La thèse de Seyyid Ahmed Lahmer, qui a démarrée en janvier 2023, co-encadrée par C. Cerin, G. Diaz et K. Boussetta et supportée par un financement de la BPI dans le cadre du projet *FogSLA*
2. La thèse Cifres avec Orange de Schneider Alexis intitulée *Etude du problème d’intégration de réseaux virtuels pour le placement des slices 5G*. La thèse est co-encadrée par de L. Létocart (AOC), P. Fouilhoux (AOC), Nancy Perrot (Orange) et Amal Benhamiche (Orange).

Routage optimisé dans les réseaux mobiles Les travaux sur le routage dans les réseaux mobiles représentent une thématique forte au sein de l’équipe Réseaux au L2TI. Il s’agit essentiellement de concevoir des protocoles et mécanismes assurant la transmission des données de bout en bout sur un ensemble de nœuds potentiellement mobiles et interconnectés par les liens radio. La problématique posée est difficile lorsqu’il s’agit de garantir pour certains services (e.g. véhicules autonomes, e-santé) la qualité de service (faible latence, fiabilité, résilience), la sureté et la sécurité alors que la bande passante, l’autonomie énergétique et les capacités de traitement et de stockage des nœuds mobiles sont limitées.

Cette problématique de routage dans les réseaux mobiles a été abondamment étudiée depuis trois décennies. Elle est toutefois renouvelée du fait de l’évolution continue des nouvelles technologies réseaux (e.g. 5G, 6G, WiFi6) et de l’émergence de nouveaux usages (véhicules autonomes, essais de drones, réseaux de capteurs pour l’IoT). Les collaborations entre les équipes AOC et Réseaux sur cette thématique sont établies [2, 22] mais la dynamique s’est essoufflée après la crise sanitaire. Nous souhaitons nous appuyer sur les nouveaux recrutements dans les équipes AOC (e.g. Prof. Pierre Fouilloux) et Réseaux (e.g. Prof. Mai-Trang Nguyen) pour créer de nouvelles opportunités et pour renforcer la synergie entre les deux équipes autour de cette thématique. Nous avons identifié plusieurs cas d’usage adressés par les chercheurs de ces deux équipes. Entre-autres : la communication multi-sauts dans les réseaux maillés 5G, les réseaux de véhicules autonomes, la mobilité intelligente, les réseaux de drones, les réseaux de capteurs sans fil, les jeux vidéo en mode ad-hoc ou encore les services de collecte participative des données sur terminaux mobiles (e.g. mesure de la pollution ou les risques d’infection). Les verrous scientifiques qui se posent sont ceux de

la caractérisation et la modélisation de la mobilité, la conception d’algorithmes distribués pour assurer le routage tolérant aux pertes, efficace en énergie, résilients et sécurisé.

La démarche scientifique consiste d’une part à caractériser ces systèmes en s’appuyant soit sur les plateformes d’expérimentation développées par l’équipe Réseaux ou bien sur l’utilisation de formalismes appropriés (e.g. graphes dynamiques) pour construire des modèles. Ces modèles peuvent ensuite être utilisés pour déterminer les mécanismes de routage optimaux. Outre les outils d’optimisation (nécessaires pour construire une solution initiale ou pour calibrer les paramètres des mécanismes) la prise en charge de la dynamique du système peut être traitée en utilisant des techniques issues de l’IA, comme l’apprentissage par renforcement.

Vérification formelle des systèmes distribués Avec l’avènement du cloud et la virtualisation, le développement des applications distribuées et des services réseaux a connu ses dernières années de nombreuses évolutions radicales. L’architecture monolithique est remplacée par les paradigmes de micro-services et de *serverless computing* (informatique sans serveur). L’architecture modulaire de ces nouveaux services est complexe, à large échelle et est dynamique dans le temps et dans l’espace. Pour autant, les services fournis doivent être sûres, sécurisés et satisfaire les contraintes de qualité de services (e.g. latence de bout en bout, fiabilité). Le développement de modèles et techniques de vérification formelle de ces systèmes est donc un sujet chaud. La dynamique temporelle et le passage à l’échelle étant les verrous les plus durs.

L’axe 2 compte développer la synergie entre les équipes LoVe et Réseaux sur la problématique de la Vérification formelle des systèmes distribués. Ce développement peut s’appuyer sur la coopération établie entre K. Klai et G. Diaz, qui pourra être consolidé à l’occasion de la visite prévue en 2023 d’Alberto Trombetta (MCF, Université d’Insubria, Italie) ou encore via la thèse de Janeth Aguilar, doctorante au L2TI avec double compétences Réseaux-Vérification formelle, co-encadrée par Gladys Diaz et Khaled Boussetta sur le sujet de la collecte de données pour la mesure de la pollution interne.

Cette base pourra être élargie à d’autres collègues des deux équipes grâce à l’organisation de journées thématique avec l’implication notamment des nouveaux recrutés dans les deux laboratoires.

3.1.3 Axe 3 : Physique mathématique, Physique statistique, Combinatoire

• Équipes impliquées dans cet axe :

- *Probabilités et Statistiques* et *Systèmes Dynamiques* du LAGA,
- CALIN (*Combinatoire, ALgorithmique et INteractions*) du LIPN.

Cartes et modèles physiques. Un objet d’étude particulièrement prometteur est celui des grandes matrices aléatoires sur des corps finis. Ce modèle apparaît dans l’étude des propriétés à basse température des verres de spin en mécanique statistique des systèmes désordonnés. Pour les matrices denses de taille $n \times n$, le noyau est (avec grande probabilité) de dimension $\Theta(1)$ quand n tend vers l’infini, et les vecteurs propres (associés à la valeur propre 0) sont essentiellement aléatoires : la distance de Hamming entre les vecteurs propres est distribuée asymptotiquement comme celle entre les vecteurs dans l’espace total. Pour les matrices creuses, la situation change de manière importante et dépend fortement du modèle étudié. Jusqu’ici, les études ont porté sur le cas avec degré fixe sur les lignes, et degré aléatoire poissonnien sur les colonnes. Dans ce cas, on prouve que le noyau est de dimension $\Theta(n)$ avec grande probabilité. Tandis que pour des degrés fixés ≥ 3 (à la fois sur les lignes et sur les colonnes), des heuristiques indiquent que le noyau a alors dimension $\Theta(1)$ avec grande probabilité. Ce résultat préliminaire est encourageant pour l’étude de matrices aléatoires définies non pas par un modèle probabiliste (de manière analogue aux graphes d’Erdős–Rényi), mais plutôt par un modèle géométrique où les coefficients non nuls de la matrice sont associés aux arêtes d’un réseau aléatoire plongé en dimension finie.

Des résultats empiriques sur des graphes réguliers à deux dimensions, avec des orientations aléatoires qui déterminent le graphe factoriel, montrent une caractéristique intéressante : tout comme dans la célèbre solution de Parisi pour le modèle de Sherrington–Kirkpatrick, il existe des paires de solutions qui ont une petite distance de Hamming (“intracluster”), et des paires de solutions qui ont une grande distance de Hamming (“extracuster”), un peu comme des vecteurs aléatoires indépendants dans un espace vectoriel. Jusqu’ici, un tel comportement a été rigoureusement établi uniquement pour les verres de spins en champ moyen.

Il semble intéressant d’étudier une construction analogue sur des graphes planaires aléatoires. D’un côté, il est bien connu (via la relation KPZ) que ces graphes doivent suivre la classification des classes d’universalité des modèles critiques bidimensionnels. D’un autre côté, principalement via la décomposition de Tutte et la méthode quadratique, nombre de ces modèles sont exactement résolubles, et on peut donc espérer une preuve rigoureuse de la loi des observables analogue à ce que donne la solution de Parisi.

Combinatoire des surfaces et des pavages. La constante de Cheeger d'un graphe permet d'identifier si celui-ci admet des goulots d'étranglement. Cette quantité a été introduite par Jeff Cheeger dans le contexte de la géométrie riemannienne. Récemment, Daniel Frischberg et David Eppstein ont montré que la constante de Cheeger du graphe des flips d'un polygone tend vers 0 lorsque le nombre de sommets du polygone tend vers l'infini [8], résolvant un problème ouvert posé dans plusieurs communautés. Le pendant de cette question existe et reste ouvert dans le cas des surfaces (orientables et de type fini). Le résultat de Frischberg et Eppstein suggère une construction similaire dans ce cas que nous nous proposons d'étudier en nous appuyant sur notre expertise des aspects métriques des graphes de flips des surfaces topologiques [9, 10, 11, 12].

Permutations aléatoires. Cyril Banderier, Philippe Marchal et Michael Wallner [6, 5, 7] ont développé une nouvelle méthode de génération aléatoire, la méthode des densités, qui repose sur une interaction continu/discret (des récurrences de volumes de polytopes), pour générer des permutations contraintes et diverses familles de posets. Cela permet d'obtenir des formules efficaces (de coût polynomial) pour calculer différentes structures qui n'avaient jusqu'ici que des énumérations de coût exponentiel (même en utilisant les méthodes avancées des P-partitions de Stanley, etc.). Ces formules font intervenir des récurrences d'un nouveau type ($a_{n+1}(x) = \int_y P(x, y) a_n(y) dy$, et des intégrales multiples du même type), l'énumération est alors donnée par la suite $a_n = \int_0^1 a_{n-1}(x) dx$, dont l'asymptotique présente de nombreux défis : on aboutit notamment à des asymptotiques inusuelles en $\exp(cn^r)$, r rationnel, c transcendant. Des méthodes à bases d'approximation par des équations différentielles permettent d'obtenir r , et la nature de c est liée aux zéros de fonctions D-finies.

Banderier et al. [3, 1, 2, 4] ont aussi étudié divers processus sur les permutations (dont l'algorithme de tri flip-sort) qui aboutit à des équations catalytiques pour lesquelles obtenir le comportement asymptotique reste un challenge.

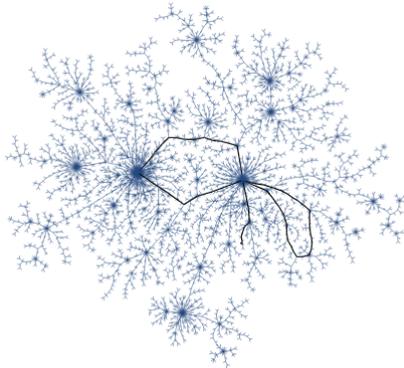


FIGURE 5 – Un exemple d'un graph stable.

Marches aléatoires, arbres et structures apparentées. Un modèle de graphes avec peu de cycles, apparentés aux-graphes d'Erdős–Rényi, a été au centre d'attentions particulières ces dernières années (voir notamment les travaux de Christina Goldschmidt, certains en collaboration avec Bénédicte Haas) et l'étude de leurs propriétés est un objet d'étude qui semble prometteur. L'étude des phénomènes de parking sur les arbres, avec entre autres des articles récents de Goldschmidt, Curien et autres, pose de nombreuses questions qui font notamment l'objet d'un sujet de thèse entamé récemment par Vincent Viau sous la co-direction de Bénédicte Haas et Nicolas Curien.

Les phénomènes de marches aléatoires ou processus (mouvement brownien, processus de Lévy) avec branchement recèlent de nombreuses questions, de même que le modèle de Derrida–Retaux, sur lequel continuent de travailler Yueyun Hu et Bastien Mallein. Plusieurs chercheurs de l'équipe CALIN du LIPN s'intéressent à des questions de ce type concernant les graphes, comme Cyril Banderier ou Frédérique Bassino. En outre Thierry Monteil, de l'équipe CALIN du LIPN a commencé à travailler sur les modèles de graphes aléatoires et pourrait lui aussi collaborer à ce projet.

DAGs, lamda-termes et posets. Les graphes dirigés sans cycles (ou DAGs en forme courte) sont une structure centrale en théorie des graphes et en modélisation. Cependant notre compréhension de leurs propriétés asymptotiques reste limitée si on se compare au cas non dirigé. En effet, les propriétés des graphes

d’Erdős–Rényi sont bien comprises à différentes échelles, en particulier près de sa transition de phase, où l’on sait décrire précisément le passage du cas sous critique au cas sur critique. Une limite d’échelle de ces graphes est par ailleurs connue dans le cas critique. Des travaux récents permettent d’étudier des propriétés similaires pour les graphes dirigés à l’aide des outils de la combinatoire analytique. Notre objectif est d’attaquer l’étude des DAGs pour lesquels la méthode probabiliste, basée sur une correspondance entre DAGs et une certaine classe de matrices aléatoires, semble offrir des pistes prometteuses. De plus, il semble que la combinatoire analytique s’applique dans ce contexte aussi offrant un second angle d’attaque sur le problème, complémentaire du premier. Enfin, un second objectif de ce travail est le développement d’outils de génération aléatoire efficaces pour les DAGs, ces outils étant encore assez peu développés. En plus de permettre des applications concrètes en modélisation et en test logiciel, ces générateurs seront aussi un outil clef pour l’étude expérimentale des propriétés des grands DAGs aléatoires.

Cette thématique de recherche est liée aux travaux menés au sein des équipes CALIN du LIPN (notamment par Olivier Bodini, Martin Pépin) et *Probabilités et Statistiques* du LAGA (notamment Philippe Marchal), et a aussi impliqué un postdoctorant MathSTIC (Michael Wallner).

Références

- [1] A. Asinowski, C. Banderier, S. Biley, B. Hackl, and S. Linusson. Pop-stack sorting and its image : Permutations with overlapping runs. *Acta Math. Univ. Comenianae*, LXXXVIII :395–402, 2019. Proceedings of Eurocomb 2019.
- [2] A. Asinowski, C. Banderier, and B. Hackl. On extremal cases of pop-stack sorting. In *Proceedings of Permutation Patterns 2019 (Zurich, Switzerland)*, pages 33–77, 2019.
- [3] A. Asinowski, C. Banderier, and B. Hackl. Flip-sort and combinatorial aspects of pop-stack sorting. *Discrete Mathematics & Theoretical Computer Science*, 22 :article #4, 39 pages, 2021.
- [4] C. Banderier, J.-L. Baril, and C. Moreira Dos Santos. Right-jumps and pattern avoiding permutations. *Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science*, pages 1–17, 2017.
- [5] C. Banderier, P. Marchal, and M. Wallner. Rectangular young tableaux with local decreases and the density method for uniform random generation (short version). In L. Ferrari and M. Vamvakari, editors, *Proceedings of the 11th International Conference on Random and Exhaustive Generation of Combinatorial Structures (GASCom 2018), Athens, Greece, June 18-20, 2018. CEUR Workshop Proceedings*, volume 2113, pages 60–68. CEUR Workshop Proceedings, 2018.
- [6] C. Banderier, P. Marchal, and M. Wallner. Periodic Pólya urns, the density method, and asymptotics of Young tableaux. *Annals of Probability*, 48(4) :1921–1965, 2020.
- [7] C. Banderier and M. Wallner. Young tableaux with periodic walls : counting with the density method. *Séminaire Lotharingien de Combinatoire*, 85B(article #47) :1–12, 2021. Proceedings of FPSAC 2021.
- [8] D. Eppstein and D. Frishberg. Improved mixing for the convex polygon triangulation flip walk. *arXiv :2207.09972*, page preprint, 2022.
- [9] H. Parlier and L. Pournin. Flip-graph moduli spaces of filling surfaces. *Journal of the European Mathematical Society*, 19 :2697–2737, 2017.
- [10] H. Parlier and L. Pournin. Modular flip-graphs of one holed surfaces. *European Journal of Combinatorics*, 67 :158–173, 2018.
- [11] H. Parlier and L. Pournin. Once punctured disks, non-convex polygons, and pointihedra. *Annals of Combinatorics*, 22 :619–640, 2018.
- [12] H. Parlier and L. Pournin. Getting lost in flip-graphs. *in preparation*, 2023.

3.1.4 Axe 4 : Catégories : entre calcul et topologie

Équipes impliquées dans l’axe 4 :

- TA (*Topologie Algébrique*) du LAGA,
- LoVe (*Logique et Vérification*) et CALIN (*Combinatoire, ALgorithmique et INteractions*) du LIPN.

Pour les prochains cinq ans, nous envisageons une évolution de nos interactions sur trois thématiques principales :

- opérades et monades ;
- structures catégoriques supérieures ;
- invariants topologiques, complexité algorithmique.

Le troisième thème intégrera la thématique *théorie des catégories et topos* décrite dans la partie « bilan », qui ne sera plus développée à part mais en tant que source d’outils pour les invariants topologiques.

Opérades et monades La notion d’infini-opérades a été développée indépendamment par Lurie et Moerdijk, généralisant à la fois les catégories supérieures et les opérades. Elles sont fortement utiles en théorie moderne de l’homotopie et pour les structures algébriques supérieures. Le modèle proposé par Moerdijk est préfaisceautique par essence.

Une autre structure importante sont les propérades, un intermédiaire entre les opérades et les PROP. Plutôt que des arbres, ce sont des graphes connexes qui entrent en jeu pour décrire des compositions d’opérations (à plusieurs entrées et plusieurs sorties). La monade des graphes est sensiblement plus complexe que celle des arbres, ce qui complique leur étude.

Les structures de (co)monade et le point de vue préfaisceautique sont fondamentaux à la compréhension de ces structures. L’expertise du LIPN est côté monades et préfaisceaux, l’expertise du LAGA est côté (infini-)opérades et propérades. De nombreux exposés du groupe de travail ont permis de lancer des discussions sur les interactions possibles. Francesca Pratali travaille actuellement, sous la direction d’Eric Hoffbeck, à une description d’infini-opérades comme certaines cogèbres sur des comonades.

Structures catégoriques supérieures La sémantique 2-catégorique des langages de programmation est actuellement en plein essor et nous prévoyons de construire des interactions fructueuses sur ce sujet. La thèse d’Aloÿs Dufour (équipe LoVe, LIPN) a comme objectif de développer un modèle du λ -calcul où les termes/programmes sont interprétés par des espaces topologiques “avec bords” et les réécritures par des fonctions continues entre ces espaces. Ces objets ressemblent aux objets employés dans la théorie du cobordisme, étudiée au LAGA, entre autre, par Grégory Ginot. Cela suggère que cette thèse pourrait être le point de départ pour des collaborations.

Une autre source d’interactions concerne l’étude du λ -calcul (et, plus généralement, des langages de programmation et des systèmes logiques associés) du point de vue de la réécriture supérieure. Le modèle mentionné ci-dessus repose sur le fait que le λ -calcul forme naturellement une 2-catégorie, avec les types comme objets, les termes/programmes comme morphismes et les réécritures/chemins de calculs comme 2-morphismes. Cependant, la syntaxe du λ -calcul ne s’arrête pas à la dimension 2 : la notion de *standardisation* [1], un concept étudié depuis des dizaines d’années en théorie des langages de programmation, peut être vue comme l’existence de 3-morphismes entre réécritures, et ces 3-morphismes peuvent eux-mêmes être reliés par des isomorphismes non-triviaux [2]. La syntaxe du λ -calcul semble donc former une structure catégorique supérieure (par exemple, dans le cas non-typé, un opérade supérieure), qui est censée être canonique d’une certaine façon. À ce jour, il n’existe pas de description explicite de cette structure et la recherche d’une présentation par générateurs et relations, comme celles introduites et étudiées notamment par Eric Hoffbeck, sera un objectif concret de cet axe pour le futur à court/moyen terme.

Une autre piste d’interactions dans le domaine de la réécriture supérieure (plus précisément dans le cadre polygraphique) concerne les propérades. Comme pour les opérades, de nombreuses propérades sont décrites par générateurs et relations, et il n’existe pas encore de bonnes notions de réécriture dans ce contexte. Cette direction de recherche, développée au LAGA par Eric Hoffbeck et Bruno Vallette, intéresse aussi le LIPN, où les recherches de Flavien Breuvert, Marie Kerjean, Damiano Mazza et Thomas Seiller sont souvent basées sur les *réseaux de preuve*, une syntaxe propéradique de la logique linéaire. Il semble raisonnable d’espérer avancer ensemble dans cette direction.

Le lien entre les $(\infty, 1)$ -catégories et la théorie des types [3] offre une source d’interaction potentielle entre mathématiques et informatique. Même si la théorie des types homotopique n’est développée ni au LAGA ni au LIPN, certains travaux s’y approchent (par exemple [7]) et il s’agit clairement d’une source potentielle d’interactions. Pour cette raison, il est envisagé d’organiser un groupe de travail sur cette thématique.

Invariants topologiques, complexité algorithmique Un certain nombre de pistes de recherche développées au sein de l’équipe LoVe reposent sur l’idée de pouvoir appliquer aux programmes ou à des représentations logiques d’algorithmes des invariants de type homologique ou cohomologique, généralisant, en quelque sorte, l’entropie utilisée dans les travaux susmentionnés sur la complexité algébrique [21]. La notion d’entropie est aussi liée à la complexité en moyenne, un sujet important pour l’équipe CALIN du LIPN.

Les invariants (co)homologiques font parties des thématiques centrales de tous les membres de l’équipe TA du LAGA, où il y a des personnes qui travaillent sur la théorie des représentations, un sujet assez riche en relation avec la complexité algébrique.

Nous ne sommes pas encore arrivés à des réalisations utiles/utilisables de ces programmes de recherche, mais pensons que l'interaction entre les deux laboratoires pourrait aider à développer/débloquer ce type d'approches.

Par exemple, Damiano Mazza a un programme de recherche à l'intersection de la théorie descriptive de la complexité et de la logique catégorique. Il a étudié des théories du premier ordre en utilisant les catégories booléennes, qui portent la structure requise pour interpréter la logique cohérente classique. Ces objets ont des présentations de forme étonnamment similaires à celles des anneaux, ce qui a motivé une tentative de recréer des outils de géométrie algébrique avec lesquels les étudier. Une collaboration entre Damiano Mazza et Morgan Rogers s'est établie à ce sujet. Plutôt que de procéder par analogie, nous axiomatisons les composants essentiels des catégories booléennes et identifions des catégories apparentées associées aux anneaux, dans le but de transporter les constructions de la géométrie algébrique à une généralisation commune qui peut ensuite être appliquée dans le contexte des catégories booléennes.

Il semble clair que l'utilisation d'invariants topologiques dans ce contexte nécessitera une théorie plus générale que celle pour les espaces "habituels", et il est assez naturel de penser aux *topos* comme le cadre idéal pour des tels développements. Morgan Rogers, expert de ce sujet, a été recruté comme post-doc dans l'équipe LoVe du LIPN pendant 16 mois, sur financement MathSTIC. De nombreuses séances du groupe de travail ont été consacrées à ce thème, qui intéresse plusieurs membres des deux laboratoires.

Références

- [1] H. P. Barendregt. *The lambda calculus - its syntax and semantics*, volume 103 of *Studies in logic and the foundations of mathematics*. North-Holland, 1985.
- [2] P.-A. Mellès. *Une étude micrologique de la négation*. Habilitation à diriger des recherches, Université Paris 7, 2017.
- [3] T. Univalent Foundations Program. *Homotopy Type Theory : Univalent Foundations of Mathematics*. Institute for Advanced Study, 2013.

Table des matières

1	Contexte scientifique	1
1.1	Laboratoires impliqués	1
1.2	Contexte scientifique local, positionnement régional/national/international	2
1.3	Réalité du besoin	3
1.4	Caractère structurant pour l'Université Sorbonne Paris Nord	3
1.4.1	Master EUR M&CS	3
2	Rapport scientifique 2017–2022	4
2.1	Organisation: gouvernance et management	4
2.2	Politique scientifique	4
2.2.1	Types d'actions entreprises	4
2.2.2	Journées scientifiques, workshops thématiques, actions à l'international	6
2.3	Résultats scientifiques par axe	7
2.3.1	Axe 1 : Optimisation et Apprentissage appliqués aux contenus numériques	7
2.3.2	Axe 2: Calcul Haute-Performance, Systèmes distribués	14
2.3.3	Axe 3: Physique mathématique, Physique statistique, Combinatoire	19
2.3.4	Axe 4: Catégories: entre calcul et topologie	24
2.4	Budgets 2017/2022	28
3	Projet scientifique pour la période 2023–2028	28
3.1	Projets scientifiques et effets structurants	28
3.1.1	Axe 1: Optimisation et Apprentissage appliqués aux contenus numériques	28
3.1.2	Axe 2: Calcul Haute-Performance, Systèmes distribués	29
3.1.3	Axe 3: Physique mathématique, Physique statistique, Combinatoire	31
3.1.4	Axe 4: Catégories: entre calcul et topologie	33