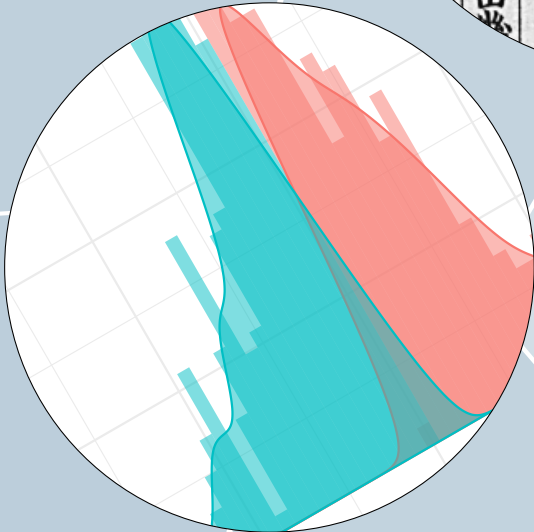
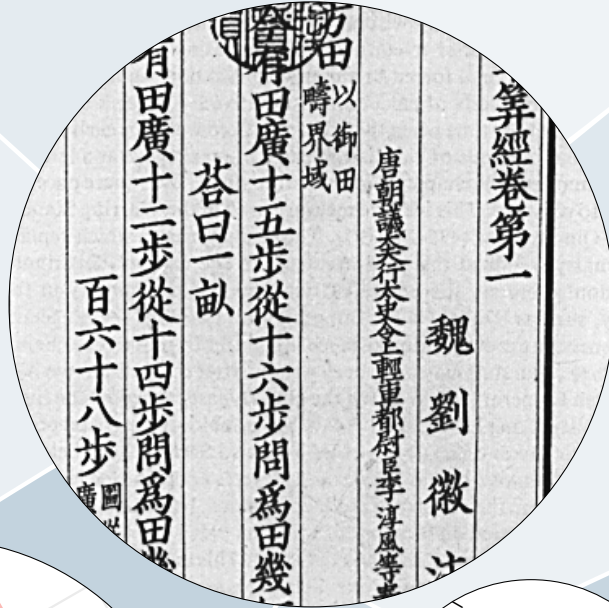


# MATAPLI



$$\frac{u_i^n - u_{i-1}^n}{\Delta x} = \left( \frac{\partial u}{\partial t} + a \right) = \frac{\Delta t}{2} \left( a^2 \right)$$

## Comité de rédaction

---

### Rédacteur en chef

Équipe ANGE, INRIA Paris

**Julien SALOMON**

salomon@inria.fr

### Rédacteur en chef adjoint

CEREMADE, CNRS, Université Paris-Dauphine

**Maxime CHUPIN**

chupin@ceremade.dauphine.fr

## Rédacteurs et rédactrices

---

### Congrès et colloques

Institut Denis Poisson, Université d'Orléans

**Thomas HABERKORN**

thomas.haberkorn@univ-orleans.fr

### Du côté de l'INRIA

INRIA Paris

**Arthur VIDARD**

Arthur.Vidard@inria.fr

### Du côté des écoles d'ingénieurs Emmanuel AUDUSSE et Olivier LAFITTE

LAGA, Université Paris XIII

eadusse@yahoo.fr, lafitte@math.univ-paris13.fr

### Du côté du réseau MSO

LMI, INSA, Rouen

**Christian GOUT**

christian.gout@insa-rouen.fr

### Nouvelles du CNRS

ENS

**Nicolas THOLOZAN**

Nicolas.Tholozan@ens.fr

### Résumés de livres

Université de Lille 1

**Ana MATOS**

ana.matos@univ-lille1.fr

### Résumés de thèses et HDR

Institut Denis Poisson, Université d'Orléans

**Cécile LOUCHET**

cecile.louchet@univ-orleans.fr

### Vie de la communauté

Laboratoire J.A. Dieudonné, Université Côte d'Azur

**Claire SCHEID**

claire.scheid@univ-cotedazur.fr

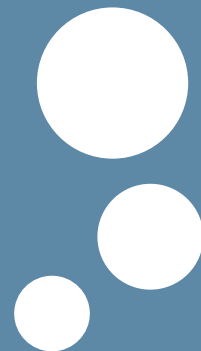
**MATAPLI — Bulletin n° 138 — novembre 2025.**

Édité par la Société de Mathématiques Appliquées et Industrielles

**Directeur de la publication**  
**Composition, mise en page**  
**Impression**

Samir ADLY, Président de la SMAI  
Julien SALOMON et Maxime CHUPIN  
Présence Graphique,  
2 rue de la Pinsonnière, 37260 Monts

# Sommaire



ÉDITO	— 3
COMPTES RENDUS DU CA DE LA SMAI	— 7
SMAI : EXERCICE 2024	— 23
BILAN DE MANDAT SECTION 41 DU CoNRS	— 33
PRIX NEVEU : STATISTIQUE POUR DÉMÊLER LE DÉSORDRE DES PROTÉINES	— 49
ENTRETIEN CROISÉ : ANNE CANTEAUT, KARINE CHEMLA	— 65
COMPTE RENDU CEMRACS 2025	— 91
HOMMAGE À PETER D. LAX (1926-2025)	— 101
HOMMAGE À JEAN-FRANÇOIS MAITRE (1937-2025)	— 125
LE RT MATHRICE	— 141
PROJETS BOUM	— 149
DU CÔTÉ DU LABEX AMIES	— 155
RÉSUMÉS DE THÈSES ET HDR	— 157
ANNONCES DE COLLOQUES	— 197
CORRESPONDANTES ET CORRESPONDANTS LOCAUX	— 199

*Date limite de soumission des textes pour le Matapli 139 :*  
**15 février 2026**

*SMAI – Institut Henri Poincaré – 11 rue Pierre et Marie Curie – 75231 Paris Cedex 05  
Tél. : 01 44 27 66 62 – Télécopie : 01 44 07 03 64  
MATAPLI - ISSN 0762-5707  
[smai@emath.fr](mailto:smai@emath.fr) – <http://smai.emath.fr>*

## PRIX DES PUBLICITÉS ET ENCARTS DANS MATAPLI POUR 2025

- 150 € pour une demi-page intérieure
- 250 € pour une page intérieure
- 400 € pour la 3<sup>e</sup> de couverture
- 450 € pour la 2<sup>e</sup> de couverture
- 500 € pour la 4<sup>e</sup> de couverture
- 300 € pour le routage avec Matapli d'une affiche format A4 (1500 exemplaires)

(nous consulter pour des demandes et prix spéciaux)

*Envoyer un bon de commande au secrétariat de la SMAI*

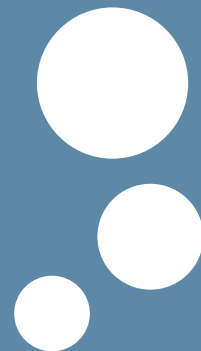
*SMAI – Institut Henri Poincaré – 11 rue Pierre et Marie Curie – 75231 Paris Cedex 05*

*Tél : 01 44 27 66 62 – Télécopie : 01 44 07 03 64*

*[smai@math.fr](mailto:smai@math.fr)*

Site internet de la SMAI :

<http://smai.emath.fr/>



*par :*

---

*Samir ADLY<sup>1</sup> — Université de Limoges, Laboratoire  
XLIM*

Chères et chers collègues,

L'année 2025 a été particulièrement riche pour la SMAI. De nombreux rendez-vous scientifiques, actions collectives et initiatives éditoriales ont marqué le paysage de notre communauté, confirmant le rôle central de notre société dans la promotion des mathématiques appliquées et industrielles.

## Congrès et assemblée générale

---

Le 12<sup>e</sup> congrès de la SMAI, tenu à Carcans-Maubuisson du 2 au 6 juin, a rassemblé un large public autour d'un programme dense et diversifié, mêlant conférences plénières, minisymposia, présentations orales et posters. L'Assemblée Générale, organisée le 4 juin en format hybride, a permis de dresser le bilan moral et financier de l'année écoulée, de renouveler le Conseil d'Administration et d'échanger sur les perspectives à venir. Les interventions des vice-présidentes et vice-présidents, ainsi que les présentations des groupes thématiques, ont mis en lumière la vitalité de notre société savante.

La préparation du CANUM 2026, confié à l'IRMAR à Rennes, s'est poursuivie au cours de l'été, la convention d'organisation étant désormais finalisée.

## Projets et prix

---

Six projets BOUM, dont deux hébergés au CIRM, ont été retenus à l'issue de l'appel d'automne, couvrant un ensemble varié de thématiques en mathématiques appliquées.

---

1. [samir.adly@unilim.fr](mailto:samir.adly@unilim.fr)

Les jurys des prix Jean-Jacques Moreau et Marc Yor ont également achevé leurs travaux et désigné les lauréats 2025, qui seront dévoilés lors de la cérémonie de l'académie des sciences du 25 novembre 2025.

## Écoles

---

L'École Jacques-Louis Lions 2025, organisée à Madrid du 16 au 20 juin en partenariat avec la SeMA, a rencontré un large écho auprès des jeunes chercheuses et chercheurs. Les échanges scientifiques et humains qui s'y sont noués confirment la pertinence de cette formule. Une réflexion est engagée pour proposer en 2026 une édition symétrique en France, avec la perspective d'une alternance durable : une école en Espagne les années impaires et en France les années paires.

Le CEMRACS 2025, accueilli au CIRM du 15 juillet au 22 août, a porté sur le calcul quantique et ses applications en cryptographie et en calcul scientifique. Le compte-rendu détaillé de cet évènement scientifique se trouve plus loin dans MATAPLI.

Le Conseil Scientifique de la SMAI a par ailleurs validé le projet scientifique du CEMRACS 2026, consacré à la modélisation pour la transition environnementale.

## Actions intersociétés et valorisation

---

La SMAI poursuit à l'automne 2025 ses actions conjointes avec la SMF et la SFdS. Deux rendez-vous majeurs figurent à l'agenda :

- la journée Mathématiques & IA, prévue le 18 novembre à l'Institut Henri Poincaré;
- la Journée d'Accueil en Mathématiques (JAM 2025), programmée le 10 décembre à Paris et dédiée aux maîtresses et maîtres de conférences, aux chargés et chargées de recherche ainsi qu'à toutes les personnes en lien avec la recherche en mathématiques recrutées en 2023 et en 2024.

En parallèle, la troisième édition du Mois des Mathématiques Appliquées et Industrielles (MA2I) se déroule à Montpellier, autour de conférences de vulgarisation illustrant la diversité des thématiques portées par la SMAI.

## Éditions et groupes thématiques

La collection *Lecture Notes on Applied Deterministic and Stochastic Mathematics*, conduite en partenariat avec la SFdS et EDP Sciences, s'est poursuivie avec la parution de nouveaux volumes en accès ouvert. Les groupes thématiques ont d'ores et déjà engagé la préparation de leurs manifestations pour 2026 :

- les journées MODE auront lieu à l'Université Côte d'Azur à Nice;
- les journées MAS se tiendront également à Nice;
- la conférence Curves and Surfaces, organisée par le groupe SIGMA, se déroulera à Saint-Malo.

## Conclusion

Je remercie l'ensemble des collègues et partenaires qui, tout au long de l'année 2025, ont contribué par leur engagement à la vitalité de la SMAI. Les projets déjà lancés pour 2026, notamment le CANUM à Rennes et le CEMRACS sur la transition environnementale, s'inscrivent dans la continuité d'une dynamique collective que nous avons à cœur de maintenir et de renforcer.

Bien à vous,

### Samir ADLY



Président de la SMAI. Professeur en mathématiques à l'Université de Limoges, Laboratoire XLIM. Mes thématiques de recherches sont : Optimisation, analyse variationnelle et non-lisse.

**Email :** [samir.adly@unilim.fr](mailto:samir.adly@unilim.fr)

**Site web :**

[https://www.unilim.fr/pages\\_perso/samir.adly/](https://www.unilim.fr/pages_perso/samir.adly/)



# Comptes rendus du conseil d'administration de la SMAI

par :

Marianne AKIAN<sup>1</sup> – Secrétaire générale de la SMAI

## COMPTE RENDU DU CA DE LA SMAI DU 11 AVRIL 2025

**Présents :** M. Akian, S. Adly, F. Barbaresco, T. Bayen, P. Calka, M. Colin, A.-L. Dalibard, O. Goubet, L. Goudenège, B. Liquet, C. Maugis-Rabusseau, J. Mathiaud, F. Nacry, A. Véber.

**Représentés :** Y. Demichel (P. Calka), A. Nouy (M. Akian).

**Excusés :** C. Cancès, F. Charles, C. Choquet, J. Delon, N. Forcadel, R. Hadiji, V. Leclere, V. Lleras, F. Sueur, L. Weynans.

**Démissionnaire :** G. Chapuisat.

Cette réunion du Conseil d'Administration de la SMAI a eu lieu le vendredi 11 avril 2025 à partir de 14h, en mode hybride – en présentiel à l'IHP et en visio conférence. Elle s'est terminée à 16h28.

## 1 Principaux points à l'ordre du jour

### 1.1 Point sur le secrétariat

Samir Adly vient d'effectuer l'entretien annuel d'activité des deux secrétaires de la SMAI.

1. [marianne.akian@inria.fr](mailto:marianne.akian@inria.fr)

## 1.2 Point sur les publications

Amandine Véber fait le point sur les publications.

Les revues co-publiées par la SMAI et EDP-Sciences sous le modèle *Subscribe to Open* continueront à publier leurs articles en accès ouvert sans frais pour les auteurs en 2025. La SMAI est reconnaissante envers l'Insmi pour sa contribution à ce succès. Le comité de suivi du *Subscribe to Open* s'est réuni courant mars pour faire un point sur le programme S2O de la SMAI et EDP Sciences.

Le mandat de Thierry Goudon en tant qu'éditeur en chef de la revue SMAI-JCM s'achève au printemps 2025. La SMAI le remercie très chaleureusement pour toute l'expertise et le travail dont il a fait bénéficier cette revue depuis sa création. C'est Martin Frank, du Karlsruher Institut für Technologie, qui prend sa suite en binôme avec Pascal Omnès, éditeur en chef depuis 2022.

Suivant le vote du CA ayant eu lieu par mail, la prochaine équipe d'éditeurs en chef d'*ESAIM : Proceedings and Surveys* sera constituée de Clément Cancès (INRIA et Université de Lille), Marie Doumic (INRIA et École Polytechnique), Sébastien Gadat (Toulouse School of Economics) et Ludovic Goudenège (CNRS et Université d'Evry). La SMAI remercie grandement Quentin Mérigot, dont le mandat d'éditeur en chef se termine prochainement, pour son excellent travail au service de la revue.

Les journées Sciences et Médias 2025, co-organisées par 6 sociétés savantes (dont la SMAI) et l'AJSPI, se sont déroulées les 27 et 28 mars 2025 sur le thème « Journalistes et scientifiques : qui contrôle qui ? ». Plusieurs interventions ont également permis de discuter de la liberté académique et de la liberté de la presse face à la situation américaine. L'enregistrement des interventions peut être retrouvé sur le site web de l'événement : <https://sciencesetmedias.org/>.

## 1.3 Point sur les relations avec l'industrie/CEMRACS/FEM

Samir Adly fait le point sur les actions en relation avec l'industrie, notamment en transmettant les informations données par Vincent Leclere lors de la réunion du bureau qui a eu lieu le matin même.

Concernant le CEMRACS 2026, Peter Tankov serait partant pour présider l'organisation d'un CEMRACS dont la thématique comprendrait l'économie environnementale et la finance verte. Il faut maintenant qu'il présente une lettre d'intention pour le prochain CS du CIRM.

Le prochain FEM aura lieu au CNAM le 7 octobre 2025. Vincent a organisé une session sur les collaborations des chercheurs avec l'industrie, mais cette session aura lieu le matin et il ne pourra finalement pas être présent. Il cherche donc un volontaire pour animer cette session.

L'organisation de la journée « Mathématiques et IA » avance bien : elle aura lieu le 18 novembre 2025 à l'IHP et la liste des intervenants est fixée.

### 1.4 Nouvelles des groupes thématiques

---

#### ■ SMAI-MODE : Térance Bayen donne des nouvelles du groupe MODE.

Le groupe diffuse la lettre-Mode qui est envoyée par Franck Iutzeler (Toulouse) et a environ 420 abonnés. Les discussions du comité de liaison ont lieu en visio, mais aussi par email, en particulier quand il s'agit de proposer des membres de jury de prix. Le groupe a fait des appels à financement de projets pour un montant total de 3000 euros cette année.

Les prochaines Journées MODE auront lieu fin mars 2026 à Nice (sur le campus de Valrose) et seront organisées par Samuel Vaiter et Jean-Baptiste Caillaud.

Le comité de liaison ainsi que le poste de responsable seront renouvelés prochainement.

#### ■ SMAI-SIGMA : Marianne Akian donne les nouvelles du groupe SIGMA transmises par Antony Nouy.

Un workshop « *Nonlinear Approximation for High-Dimensional Problems* » est organisé en l'honneur d'Albert Cohen du 30 juin au 4 juillet à Paris : <https://albertcohen.sciencesconf.org/>. Le groupe SIGMA sponsorise l'événement.

L'organisation de la conférence Curves and Surfaces 2026 suit son cours. Concernant la gestion des inscriptions, le groupe a obtenu trois devis de DakiniPCO, VertCom et Aleou meeting pro. DakiniPCO est bien plus cher que les autres. Antony est actuellement en discussion avec VertCom.

#### ■ SMAI-GAMNI : Marianne Akian donne les nouvelles du groupe GAMNI transmises par Olivier Lafitte.

Le jury du prix de thèse SMAI-GAMNI a proposé de nommer Yvonne Alama BRONSART comme lauréate de ce prix.

### 1.5 Projets BOUM

---

Nous avons reçu 10 propositions. Le CA décide de financer 7 projets, dont 4 projets BOUM au CIRM, le tout à hauteur de 4570 euros.

## 1.6 Biennale 2025

---

Mathieu Colin est invité à présenter les avancées de l'organisation de la Biennale SMAI 2025.

Le nombre d'inscriptions est actuellement de 190, mais les organisateurs espèrent jusqu'à 250 inscrits. La conférence comprendra 25 mini-symposia et 69 contributions orales. Parmi les inscrits, 118 sont des jeunes chercheurs et les organisateurs ont distribué 36 bourses jeunes chercheurs. Il reste encore quelques demandes de subventions sans réponse.

## 1.7 Point sur les actions grand public

---

Florent Nacry fait le point sur les actions grand public.

Il est à la recherche d'un organisateur pour le Mois des Mathématiques et Applications Industrielles (M2AI) en 2025. On avait d'abord pensé à Lille, mais Olivier Goubet dit que ce ne sera pas possible ni en 2025, ni en 2026. On pense maintenant à Montpellier.

Vanessa Lleras s'occupe de la participation de la SMAI au salon culture et jeux mathématiques qui aura lieu du 12 au 15 juin à la place Saint Sulpice à Paris. Elle peut être là certains jours, mais cherche d'autres volontaires en particulier pour les autres jours. Toute personne intéressée peut la contacter.

## 1.8 Point sur l'enseignement

---

En raison de l'absence de Yann Demichel, Florent Nacry donne des nouvelles sur des sujets relatifs à l'enseignement.

Le CAPES va subir une réforme prochainement, qui devrait être mise en place à la rentrée 2026. Le concours pourra être passé après une licence (Bac+3), et non après un Master. Les lauréats feront un M1 après le concours et auront une obligation de rester professeurs pendant 4 ans. Le Master MEEF sera transformé en une formation plus professionnalisante. L'INSPÉ est maintenu mais la gouvernance dépendra de l'éducation nationale au lieu des universités.

Concernant la recherche d'un successeur à Yann au poste de « Vice-Président, délégué Enseignement », Samir Adly doit discuter avec deux collègues qui pourraient être intéressés.

## 1.9 CANUM 2026

---

Julien Mathiaud donne des nouvelles de l'organisation du CANUM 2026. Il avait envoyé un devis pour l'hébergement à l'Abbaye de St Jacut qui a été

transmis aux membres du CA. Julien prévoit un déplacement aller-retour en bus depuis Rennes. Il rappelle que l'Abbaye de St Jacut peut héberger 140 à 150 personnes, et qu'avec les hôtels proches, et le camping, il peut y avoir jusqu'à 200 hébergements. Les repas seront pris au restaurant de l'Abbaye de St Jacut qui a plus de 200 places. Le CA valide le devis.

Par ailleurs, il est décidé de prévenir les participants de la présence de bibles dans les chambres de l'Abbaye de St Jacut. De cette manière, ceux que cela pourrait indisposer pourront choisir en priorité les chambres d'hôtel ou le camping.

Il manque encore un nom pour finaliser la composition du CS du CANUM 2026 qui sera présidé par Olivier Goubet.

### 1.10 CJC 2025 et 2026

---

Il n'y aura pas de CJC 2025 faute de volontaires et ce malgré plusieurs recherches. En revanche des membres de la Fédération Bézout acceptent d'organiser le CJC 2026 à Marne-la-Vallée.

### 1.11 Élections et renouvellement du conseil d'administration de la SMAI

---

Marianne Akian présente le calendrier électoral préparé par Claire Scheid. Elle a lancé l'appel à candidatures pour les 8 postes vacants le 28 mars 2025. Les déclarations de candidatures et les professions de foi sont à envoyer avant le 28 avril 2025. Elle enverra un rappel dans peu de temps.

### 1.12 Questions diverses

---

**Renouvellement du Conseil scientifique de la SMAI** Olivier Goubet, président du conseil scientifique a contacté les anciens membres du CS : seuls Andrea Barth, Lia Bronsard et Albert Cohen acceptent de continuer à être membres du CS. Il compte compléter le CS par 3 personnalités liées aux thèmes de MAS, de MABIOME et du calcul scientifique, et dont les noms sont discutés avec le bureau.

**JAM 2025** Après discussions avec la SMF et la SFDS, la Journée d'Accueil en Mathématiques (JAM) 2025 aura finalement lieu en novembre (à l'IHP) et Ilaria Mondello (SMF) présidera l'organisation. Le comité d'organisation comprendra au moins Rejeb Hadiji (SMF), Ludovic Goudenège et Amic Frouvelle (SMAI) et Audrey Poterie (SFDS).

Ludovic Goudenège explique l'organisation. La JAM est financée par le CNRS, la SMAI, la SMF, la SFDS et AMIES qui viennent tous saluer les nouveaux recrutés (Maîtres de conférence, Chargés de recherche, mais aussi Ingénieurs ITA). Il y a en général environ 90 participants. D'habitude, il y a un JAM tous les deux ans, ce qui veut dire que l'on accueille les recrutés des deux années précédentes. Cette fois le calendrier étant retardé, il y aura les recrutés de trois années.

**Diffusion d'annonces de colloques par la SMAI** Lors du CA du 31 janvier 2025, la SMAI avait recommandé aux organisateurs des rencontres qu'elle parraine d'éviter le plus possible de recourir au soutien d'éditeurs scientifiques dont les pratiques sont régulièrement questionnées par la communauté mathématique, que ce soutien soit financier ou qu'il se matérialise par la publication des proceedings de la rencontre. Le bureau propose d'appliquer aux conférences annoncées sur son site cette même recommandation. Le CA est d'accord.

**INSMI** Le CFEM a fait un courrier à l'INSMI pour demander l'inscription de la Didactique des mathématiques dans la liste des mots-clés de la future Section 1 du CoCNRS, et a demandé le soutien de la SMAI. Ce soutien est accordé.

**MATAPLI** Le CA valide l'achat d'un enregistreur demandé par les éditeurs de MATAPLI pour la réalisation d'interviews.

## 2 Points d'information

**Représentation de la SMAI au CNFM** La SMAI a 4 représentants au CNFM, ils doivent être renouvelés, 3 acceptent de continuer, mais Yvon Maday a dépassé le nombre de mandats possibles. Le bureau propose de le remplacer par Thierry Goudon.

**ICIAM** La cotisation des sociétés savantes à l'ICIAM a augmenté dès cette année, et celle de la SMAI est passée de 800 dollars à 1600 dollars. Mais finalement, pour cette année, le CNFM a payé les cotisations de la SMAI et de la SMF et demandera le remboursement au COFUSI. Par ailleurs, pour l'année prochaine, Samir demandera à ce que la SMAI soit considérée comme *medium* au lieu de *large*, en argumentant que la SMAI a bien moins de 1000 adhésions payantes.

**École Jacques-Louis Lions et SEMA** Samir Adly vient de diffuser l'annonce de l'École. Elle aura lieu du 16 au 20 juin 2025 à l'École Technique Supérieure

d'Ingénierie Industrielle de l'Université de Castille-La Manche, sur le campus de Ciudad Real.

**Dates des prochains CA et bureaux de la SMAI** La prochaine réunion du CA aura lieu le vendredi 27 juin, à 14h, et sera précédée d'une réunion du bureau à 9h. Elles seront en mode hybride, à l'IHP et en zoom.

L'AG de la SMAI aura lieu le mercredi 4 juin à 20h30, en mode hybride à la biennale SMAI 2025, et en zoom.

D'ici là, une autre réunion du bureau de la SMAI aura lieu le vendredi 16 mai à 9h en zoom.

## COMPTE RENDU DE L'ASSEMBLÉE GÉNÉRALE DE LA SMAI DU 4 JUIN 2025

L'assemblée générale de la SMAI s'est déroulée le mercredi 4 juin 2025 de 20h30 à 22h53 (heure de Paris) en mode hybride : en présentiel à la Biennale SMAI 2025, Carcans Maubuisson, et en visio-conférence par zoom. 48 personnes ont assisté à cette assemblée générale (37 en présentiel et 11 en visio-conférence).

L'ordre du jour était le suivant :

- Rapport moral et vote du quitus
- Rapport financier et vote du quitus
- Vote des tarifs des adhésions
- Vote de la proposition de dissolution du groupe thématique MAIRCI
- Interventions des VP
- Présentation des activités des groupes thématiques : GAMNI, MAS, MODE, SIGMA, MABIOME.
- Proclamation des résultats des élections au Conseil d'Administration
- Questions diverses

### 1 Présentation du rapport moral

Le président, Samir Adly, a présenté le rapport moral décrivant la gouvernance de la SMAI, le nombre d'adhérents, et les différentes activités scientifiques et institutionnelles de la SMAI. Le nombre d'adhérents en 2025 est revenu au

niveau de celui de 2021 et 2022. Il n'y a pas eu de CEMRACS 2024. Les autres activités récurrentes, dont certaines sont récentes, ont eu du succès comme d'habitude : le CANUM, les journées SMAI-MODE et SMAI-MAS, le CJC-MA dont la première édition a eu lieu en 2021, le FEM, les prix (Bachelier, Blaise Pascal, Yor, Jean-Pierre Demailly lancé en 2024), le soutien aux jeunes via les projets BOUM, le Mois des Mathématiques Appliquées et Industrielles (M2AI) dont la première édition a eu lieu en 2023. L'organisation des activités des années 2025 et 2026 est en cours ou programmée : CEMRACS 2025 et 2026, prix Moreau et Yor 2025, FEM 2025, JAM 2025, M2AI 2025, CANUM 2026, CJC-MA 2026,... Un appel est lancé pour l'organisation de la biennale 2027.

Le rapport moral a été approuvé à l'unanimité.

## 2 Rapport financier et vote du quitus

---

Catherine Choquet, trésorière, présente le rapport financier pour l'année 2024 qui comprend les comptes de résultat d'exercice et le bilan. En 2024, la SMAI est bénéficiaire de 13 309,52 euros alors qu'en 2023 elle était déficitaire. Néanmoins une partie du bénéfice vient des produits financiers et la partie SMAI IS (activités d'édition et CEMRACS) est encore déficitaire de 17 239,55 euros.

Le bilan consolidé des comptes a été approuvé à l'unanimité.

## 3 Vote du tarif des adhésions

---

Samir Adly rappelle les tarifs d'adhésions 2025 et les compare à ceux des autres sociétés savantes de Mathématiques qui sont pour la plupart supérieurs. Il rappelle que les tarifs n'ont pas été augmentés depuis plusieurs années. Il propose pour l'année 2026, une augmentation de 5% environ par rapport aux tarifs d'adhésions 2025. Une discussion s'ensuit, et une proposition d'augmentation des tarifs un peu différente en ressort, où le tarif pour les pays en voie de développement est inchangé.

Cette proposition a été adoptée à l'unanimité moins 4 abstentions.

## 4 Vote de la proposition de dissolution du groupe thématique MAIRCI

Le groupe thématique MAIRCI de la SMAI, créé en 2010, n'a plus d'activité, ni de comité de liaison depuis près de 10 ans. Le 22 novembre 2024, Marianne Akian a informé les adhérents que le groupe MAIRCI serait retiré de la liste des groupes thématiques à cocher lors du renouvellement des adhésions et a demandé de réagir si jamais certains souhaitaient relancer l'activité du groupe MAIRCI. Personne ne s'est proposé pour relancer l'activité. Le 31 janvier 2025, le CA a décidé de proposer à l'Assemblée Générale de la SMAI 2025 de dissoudre le groupe thématique MAIRCI en raison de sa déshérence.

Cette proposition a été adoptée à l'unanimité.

## 5 Interventions des VP

Amandine Véber, Secrétaire générale adjointe en charge des publications, présente les activités éditoriales de la SMAI, en particulier les renouvellements d'éditeurs en chefs des revues de la SMAI qui ont eu lieu récemment. Elle remercie tous les collègues qui se sont investis dans cette activité éditoriale.

Yann Demichel, Vice-Président délégué à l'Enseignement, présente les activités de la SMAI sur les questions relatives à l'enseignement, essentiellement au sein du collectif Maths & Sciences et de la Commission Enseignement. Il donne en particulier des nouvelles des réformes en cours concernant les concours de l'enseignement.

Vincent Leclere, Vice-Président chargé des relations industrielles, présente les activités dans ce domaine, en particulier l'organisation des futurs CEMRACS : 2025 est bien organisé, il existe déjà une équipe pour 2026 et il y a aussi des noms d'organisateur pour 2027. Vincent Leclere fait un appel à candidatures pour le CERMACS 2028. Le FEM est encore présent cette année, mais il faudra sans doute changer le format ensuite.

Florent Nacry, Vice-Président délégué à la communication et aux actions grand public, est absent et excusé.

## 6 Présentation des activités des groupes thématiques

Marianne Clausel présente les activités du groupe SMAI-MAS; Albert Cohen celles du groupe SMAI-SIGMA (le responsable Antony Nouy étant excusé); You-

cef Mammeri celles du groupe SMAI-MABIOME; Olivier Lafitte présente celles du groupe SMAI-GAMNI; Térence Bayen celles du groupe SMAI-MODE.

## 7 Proclamation des résultats des élections au Conseil d'Administration

Le conseil d'administration de la SMAI est renouvelé par tiers tous les ans, ce qui correspond au renouvellement de 8 membres sur les 24 du CA. Marianne Akian, secrétaire générale, présente les élections. Huit personnes se sont présentées pour siéger au Conseil d'Administration. Le vote s'est déroulé par voie électronique via la plateforme Belenios, du Lundi 19 Mai au Lundi 2 Juin 2025, et en présentiel le 4 juin 2025.

Le nombre total de votants a été de 302 (6 en présentiel et 296 par voie électronique), sur 841 inscrits, dont 6 votes blancs ou nuls. Les résultats sont les suivants :

- Jean-Francois Aujol : 236 voix;
- Florian Blachère : 219 voix;
- Théophile Chaumont-Frelet : 219 voix;
- Eloise Comte : 252 voix;
- Nicolas Forcadel (sortant) : 240 voix;
- Pierre Lissy : 229 voix;
- Florent Malrieu : 249 voix;
- Amandine Véber (sortante) : 277 voix.

Sont déclarés élus au conseil d'administration, par ordre alphabétique : Jean-Francois Aujol, Florian Blachère, Théophile Chaumont-Frelet, Eloise Comte, Nicolas Forcadel, Pierre Lissy, Florent Malrieu, Amandine Véber.

Le nouveau Conseil d'Administration complet est disponible sur la page

<http://smai.emath.fr/spip.php?article103>.

# COMPTE RENDU DU CA DE LA SMAI DU 27 JUIN 2025

**Présents :** M. Akian, S. Adly, J.-F. Aujol, F. Barbaresco, T. Bayen, F. Blachère, T. Chaumont-Frelet, E. Comte, N. Forcadel, O. Goubet, L. Goudenège, V. Leclere, B. Liquet, P. Lissy, V. Lleras, F. Malrieu, J. Mathiaud, C. Maugis-Rabuseau, F. Nacry, A. Nouy, A. Véber.

**Représentés :** P. Calka (pouvoir N. Forcadel), C. Choquet (pouvoir F. Malrieu), R. Hadiji (pouvoir A. Véber).

**Excusés :** F. Sueur, L. Weynans.

Cette réunion du Conseil d'Administration de la SMAI a eu lieu le vendredi 27 juin 2025 à partir de 14h, en mode hybride – en présentiel à l'IHP et en visio conférence. Elle s'est terminée à 16h22.

## 1 Principaux points à l'ordre du jour

### 1.1 Élection du nouveau bureau

Suite aux élections pour le renouvellement d'un tiers du CA de la SMAI, le CA comprend 6 nouveaux membres : Jean-Francois Aujol, Florian Blachère, Théophile Chaumont-Frelet, Eloise Comte, Pierre Lissy, Florent Malrieu.

Nous remercions les membres sortants : Clément Cancès, Guillemette Chausaisat, Frédérique Charles, Anne-Laure Dalibard, Julie Delon, Yann Demichel.

Les postes de « Vice-Président, délégué Enseignement » et « Secrétaire général adjoint aux publications » sont vacants. Ils étaient occupés jusqu'à présent respectivement par Yann Demichel et Amandine Véber, lesquels ne pouvaient plus se représenter. Les candidats à ces postes présentent leur candidature. Les membres du bureau sortants occupant les autres postes se présentent à leur renouvellement.

à la suite d'un vote pour chacun des postes, les candidats suivants ont été élus à l'unanimité :

- Président : Samir Adly ;
- Secrétaire générale : Marianne Akian ;
- Trésorier : Catherine Choquet ;

- Secrétaire général adjointe aux publications : Nicolas Forcadel;
- Vice-Président, délégué à la communication et aux actions grand public : Florent Nacry;
- Vice-Président, délégué Enseignement : Florent Malrieu;
- Vice-Président chargé des relations industrielles : Vincent Leclere.

Le CA remercie chaleureusement tous les membres du bureau précédent pour leur investissement, et tout particulièrement Yann Demichel et Amandine Véber pour leur travail en tant que « Vice-Président, délégué Enseignement » et « Secrétaire générale adjointe aux publications ».

## 1.2 Point sur le secrétariat

---

Le bureau propose une augmentation de 2% des deux secrétaires de la SMAI, Noura Sahtout et Huong Fuentes. Cette augmentation serait à réaliser en janvier 2026. Le montant de l'augmentation a été choisi afin d'une part de compenser l'inflation et d'autre part par comparaison avec ce que font les autres sociétés savantes. Cette augmentation a été approuvée à l'unanimité.

Le bureau propose aussi l'achat d'un ordinateur portable pour Noura Sahtout, afin qu'elle puisse télétravailler dans de bonnes conditions. Il propose d'allouer un budget maximum de 1500 euros à ce type d'achat. Cette proposition a été adoptée à l'unanimité.

## 1.3 Point sur les publications

---

Nicolas Forcadel et Amandine Véber font le point sur les publications.

À l'invitation du CA de la SMAI, Benoîte de Saporta a accepté de rester éditrice en chef d'ESAIM : Probability and Statistics pour un second mandat de 4 ans, et Céline Duval a accepté de prendre la suite de Nicolas Verzelen en tant qu'éditrice en chef à partir de l'automne 2025. La SMAI remercie très chaleureusement Benoîte et Nicolas pour leur investissement et toutes leurs compétences mises au service de la revue!

Le comité éditorial de la collection "Lecture Notes on Applied Deterministic and Stochastic Mathematics" (SMAI-SFdS-EDP Sciences) est à présent en place. Sa composition peut être retrouvée sur la page de la collection sur le site web de la SMAI : <http://smai.emath.fr/spip.php?article922>.

### 1.4 Point sur l'enseignement

Florent Melrieu fait le point sur les sujets relatifs à l'enseignement.

Des réunions et discussions ont eu lieu autour du plan Elisabeth Borne pour les filles et Maths.

Des discussions ont aussi eu lieu à propos du Palais de la Découverte. Les travaux du Grand Palais devaient aboutir à sa réouverture prochaine, mais cette réouverture est menacée au profit d'un projet moins ambitieux scientifiquement regroupé à la cité des Sciences de la Villette. Les sociétés savantes, dont la SMAI, se mobilisent pour que la réouverture se fasse comme initialement prévu.

La prochaine réforme du CAPES permettra d'accéder à Bac+3 à un statut d'élève fonctionnaire (avec engagement de 5 ans). Cela aura donc sans doute un impact négatif sur les masters et l'agrégation. Avec la diminution des disponibilités pour études doctorales, le concours de l'agrégation est attaqué de tous cotés. Mais pour être professeur de classes préparatoires, il faut l'agrégation et une thèse.

### 1.5 Point sur les actions grand public

Florent Nacry fait le point sur les actions grand public.

Le M2AI regroupe en novembre quatre exposés de vulgarisation destinés au grand public et essentiellement des lycéens ou jeunes étudiants de l'université. L'un de ces exposés est donné par un industriel. La première édition a eu lieu en 2023 à l'IHP. La deuxième a eu lieu en 2024 à Nice. L'édition 2025 aura lieu à Montpellier et sera pilotée par Vanessa Lleras. Il faudra penser rapidement à l'édition 2026.

### 1.6 Point sur les relations avec l'industrie/CEMRACS/FEM

Vincent Leclere fait le point sur les questions en relation avec l'industrie.

Il explique rapidement le fonctionnement des CEMRACS, et donne des nouvelles des CEMRACS futurs.

Vincent a participé à l'organisation d'une conférence Maths et IA qui aura lieu le 18 novembre prochain.

Le prochain FEM (forum entreprises et mathématiques) aura lieu le 7 octobre 2025. Dans ce forum, les sociétés savantes, dont la SMAI, ont un stand. Par ailleurs, Vincent a organisé dans ce FEM une session de retour d'expérience sur les collaborations entre académiques et industriels.

## 1.7 Nouvelles des groupes thématiques

- SMAI-SIGMA : Antony Nouy donne des nouvelles du groupe SIGMA. L'organisation de la conférence Curves and Surfaces 2026 avance. L'appel à contributions aura lieu en septembre. Le prix des inscriptions devrait être de 300 euros. Les organisateurs sont encore à la recherche de sponsors. Concernant la gestion des inscriptions, Antony a approché 3 sociétés et a choisi "Aleou Meeting Pro" qui propose un mandat pour leur déléguer la gestion et la facturation des inscriptions, et pas plus. Le CA valide ce choix.
- SMAI-MODE : TERENCE Bayen donne des nouvelles du groupe MODE. Le mandat de TERENCE Bayen en tant que responsable du groupe MODE se termine car il était de 3 ans non renouvelable. Suite aux élections pour le renouvellement partiel du Comité de liaison du groupe (qui ont eu lieu la semaine dernière), le comité comprend 3 nouveaux membres : Assalé Adjé (Université de Perpignan), Yannick Privat (Université de Lorraine), Bruno Zillioto (CNRS, Toulouse School of Economics). Le comité de liaison a ensuite désigné, parmi ses membres, un nouveau responsable, Aude Rondepierre (Professeure à l'INSA Toulouse). Il a aussi désigné Laurent Pfeiffer comme nouveau responsable financier et Mathurin Massias comme nouveau secrétaire du Comité de liaison.

Le CA approuve la liste des membres du comité de liaison.

Le groupe organise les journées MODE. Les prochaines auront lieu du 18 au 20 mars 2026 à Nice et seront précédées par un mini-cours. Le groupe a aussi fait des appels à financement de projets. Il a ainsi financé partiellement les journées franco-chiliennes qui auront lieu du 8 au 11 juillet 2025 à Rouen, et la conférence Julia qui a eu lieu en octobre 2025 à Paris.

- SMAI-MABIOME : En relation avec le groupe MABIOME, Amandine Véber informe que les journées organisées par le RT Math Bio Santé auront lieu les 5-7 novembre 2025 à Montpellier.

## 1.8 Bilan Biennale 2025 et Biennale 2027

Mathieu Colin fait une présentation du bilan de la Biennale 2025. Il y a eu 230 participants avec de très bons exposés scientifiques, que ce soit dans les sessions avec des jeunes ou dans les sessions plénières. Il n'y aura pas de déficit. La table ronde sur l'enseignement et IA a été un succès : des participants ont demandé les slides.

Le CA remercie Mathieu Colin et tout le comité d'organisation local.

Pour l'organisation de la biennale 2027, le CA propose de susciter les candidatures de collègues de Lille ou Nancy ou Paris.

### 1.9 CANUM 2026

---

La composition du CS du CANUM 2026 a été finalisée le 16/05/25. Il est composé de 6 membres nommés par la SMAI : Héloïse Beaugendre (PR Bordeaux), Marianne Bessemoulin (DR Nantes), Vincent Calvez (DR Brest), Frédérique Charles (PR Grenoble), Olivier Goubet (PR Lille), Frédéric Lagoutière (PR Lyon) et 6 membres nommés par le comité d'organisation : Roger Lewandowski, Karine Beauchard, Magali Ribot, Hélène Barucq, Bruno Després, Nicolas Forcadel.

Concernant l'organisation du CANUM 2026, suite à sa demande, on propose à Julien Mathiaud que les subventions soient gérées par la SMAI. Une convention entre l'IRMAR (Rennes) et la SMAI sera rédigée sur le modèle de celle de la Biennale.

### 1.10 CJC 2026

---

Le premier CJC (congrès des jeunes chercheurs) a eu lieu en octobre 2021 et ensuite chaque automne jusqu'en 2024. Il regroupe en général une centaine de participants (jeunes chercheurs) avec des exposés sur toutes les thématiques et des tables rondes. Le prochain aura lieu au printemps 2026 et sera organisé par la Fédération Bézout et l'École des Ponts-et-Chaussées à Marnes-la-Vallée. Pierre Lissy fait partie des organisateurs.

Le bureau propose comme pour le CJC 2024, d'abonder le CJC 2026 à hauteur de 1500 euros. Suite à un vote auquel Pierre Lissy ne prend pas part, cette proposition est adoptée à l'unanimité des votants.

Par ailleurs, Pierre Lissy accepte de prospecter pour trouver des organisateurs pour le CJC 2027.

### 1.11 Questions diverses

---

**Approbation du nouveau Conseil scientifique de la SMAI** Olivier Goubet, président du conseil scientifique, a finalisé la constitution du Conseil Scientifique de la SMAI avec les anciens membres Andrea Barth (Université de Stuttgart), Lia Bronsard (Mc Master University) et Albert Cohen (Sorbonne université), et les nouveaux membres Marcela Szopos (Université Paris Cité) et Josselin Garnier (CMAP, École polytechnique).

Le CA approuve ce conseil scientifique à l'unanimité.

**Prix Yor 2025 et 2026** Le jury du prix Yor 2025 vient de rendre son rapport avec le nom du lauréat qui sera rendu public par l'Académie des Sciences. Pour le Prix Yor 2026, on propose de demander aux membres du jury désignés en 2025 par la SMAI si ils acceptent de participer à nouveau au jury du prix Yor, sachant qu'ils y participaient pour la première fois en 2025. Sinon, on consultera le groupe MAS et le CS pour proposer des noms avant la prochaine réunion du CA.

**JAM 2025** Ludovic Goudenège donne des nouvelles de la JAM (Journée d'Accueil en Mathématiques) 2025. Elle aura finalement lieu le 10 décembre (à l'IHP). Les organisateurs ont déjà contacté la moitié des orateurs. Comme la date est retardée par rapport aux autres années, les organisateurs se demandaient initialement s'il fallait accueillir les nouveaux rentrants de cette année. Il a finalement été décidé de ne pas les accueillir. Il faudra en revanche faire en sorte que la JAM 2027 ait lieu au mois d'avril et voir si elle peut être organisée par la SFDS.

## 2 Points d'information

---

**Représentation de la SMAI au CNFM** Thierry Goudon a accepté de remplacer Yvon Maday comme représentant de la SMAI au CNFM.

**Prix Moreau 2025** Le jury du prix Moreau 2025 a rendu son rapport le 20 mai avec le nom du lauréat, qui sera rendu public par l'Académie des Sciences.

**Dates des prochains CA et bureaux de la SMAI** Les prochaines réunions du CA auront lieu les vendredi 17 octobre 2025 et 30 janvier 2026, à 14h, et seront précédées de réunions du bureau à 9h. Elles seront en mode hybride, à l'IHP et en zoom.

D'autres réunions du bureau de la SMAI auront lieu les vendredi 19 septembre, 21 novembre et 19 décembre 2025, à 9h en zoom.

# Compte de résultat et bilan de la SMAI : Exercice 2024

par :

*Catherine CHOQUET<sup>1</sup> — Trésorière de la SMAI, La Rochelle Université*

L'année d'exercice s'étend du 1er janvier au 31 décembre 2024. Le présent document rassemble les bilans des deux entités, SMAI ASSO (qui correspond à l'association loi 1901) et SMAI IS (qui rassemble les activités d'édition de la SMAI ainsi que le CEMRACS), sans les distinguer.

## Compte de résultat consolidé

Le résultat d'exploitation consolidé est bénéficiaire avec un résultat positif de +13 309,52 €. Ce chiffre global cache un bilan contrasté pour les deux entités budgétaires, avec cette année encore un déficit pour SMAI IS, établi à -17 239,55 €. Le coût des activités de publications n'a en particulier pas été compensé par le CEMRACS qui n'a pas pu avoir lieu. Néanmoins la SMAI poursuit ses efforts pour soutenir les jeunes, *via* par exemple les projets BOUM, les bourses pour participer à ses grands événements scientifiques ou au Forum Entreprises et Mathématiques.

---

1. [catherine.choquet@univ-lr.fr](mailto:catherine.choquet@univ-lr.fr)

## Produits d'exploitation (en €)

	2024	2023
Adhésions	50 518	42 020,00
EDP sciences	35 500,00	35 500,00
Droits d'auteur	171,74	159,10
Produits annexes & Subventions d'exploitations	78 445,00	56 165,00
CEMRACS	—	26 550,00
Congrès SMAI	—	51 155,50
CANUM	131 375,00	—
Produits exceptionnels (dont Dons)	728,59 (—)	3398,05 (100)
<b>Total</b>	<b>296 738,33</b>	<b>214 937,65</b>

Pour mémoire, les tarifs 2024 des *adhésions* étaient les mêmes que l'année précédente :

- Standard 55€, Retraité 40€, Jeune 25€, doctorant & jeune docteur gratuit,
- Adhésion combinée SMAI+SMF/SFdS/UPS/Femmes & Maths : +45€,
- Adhésion combinée SMAI+EMS : +25€,
- Adhésion combinée SMAI+AMS/GAMM/SEMA/SIAM/SIMAI/UMI : +40€,
- Ressortissants pays en développement : 20€,
- ECCOMAS (groupe GAMNI) : +10€
- Personnes Morales/standard : 200€

Les adhésions des personnes morales sont stables. Le volume des adhésions individuelles est remonté à son niveau de 2022. En fait, si l'on oublie les années 2020, 2016 et 2023 toutes trois exceptionnelles, en terme de désaffection ou de succès, on observe une relative stabilité des produits des adhésions ces huit dernières années. Un bon point dont ne peuvent se targuer toutes les sociétés savantes. Si l'on garde à l'esprit que les autres produits d'exploitation sont liés à de lourdes charges d'exploitation (pour l'organisation des congrès en particulier, voir tableau ci-après), les chiffres montrent à quel point le soutien de notre communauté est indispensable aux activités de la SMAI.

Le volume des produits lié aux grands évènements de la SMAI, le CANUM et les journées des *groupes thématiques* (qui ont traditionnellement lieu les années paires) est important, et témoigne de leur succès. Les produits liés aux congrès des groupes thématiques sont comptés dans la rubrique *Produits annexes*, avec les subventions institutionnelles. En 2024 la SMAI a encore été soutenue par le CNRS-INSMI et INRIA (respectivement à hauteur de 20 000€ et 10 000€). Ces soutiens sont déterminants pour les activités de la SMAI (projets BOUM, FEM, publications, prix...). Le CEMRACS n'a malheureusement pas pu être organisé en 2024.

Depuis la Reconnaissance d'Utilité Publique en 2015, les  *dons*  à la SMAI ouvrent droit à certains avantages fiscaux pour les donateurs. Cependant, cette année encore, l'association n'a reçu aucun don.

## Charges d'exploitation<sup>2</sup> (en €)

	2024	2023
Fournitures de bureau et d'entretien	395,70	189,80
Annonces, sous-traitance	5237,28	1855,54
Matapli	14 686,58	13 604,50
Cotisation à d'autres organismes	7141,02	9946,39
Locations, assurances	5310,50	6003,25
Frais de comptabilité et honoraires	1100,00	1100,00
Prix	10 750,00	13 174,15
Frais occasionnés par AG et CA	2871,61	4484,55
Missions, réceptions, déplacements <sup>3</sup>	38 567,25	38 574,63
Frais postaux, téléphone	489,70	444,67
Salaires et charges sociales	81 766,68	87 121,33
Projets BOUM	9275,22	7322,63
Subventions Jeunes (FEM)	2122,11	1276,66
Subventions	2322,10	3000,00
Impôts	585,72	606,38
Divers	7,70	15,75
CEMRACS	—	—
Congrès SMAI	—	78 089,60
CANUM	105 141,34	—
Amortissement	1164,02	1164,02
<b>Total</b>	<b>288 934,53</b>	<b>267 973,85</b>

Les charges de la SMAI restent stables par rapport à l'année précédente, en particulier grâce à une gestion maîtrisée pour l'organisation de ses événements scientifiques.

Congrès MAS et MODE affichent par exemple un bilan global à +18 274€. Le bilan positif du CANUM 2024 est détaillé dans les deux tableaux précédents.

2. y compris ensemble des charges des groupes thématiques

D'autres évènements portés par la SMAI n'apparaissent pas dans ces lignes comptables, le *Congrès Jeunes Chercheurs en Mathématiques et leurs Applications* CJC-MA et le *Mois des Mathématiques Appliquées et Industrielles* M2AI. Le premier est organisé par des jeunes de la SMAI pour favoriser les échanges entre les doctorantes, doctorants, post-doctorantes et post-doctorants des laboratoires français. La 3<sup>e</sup> édition a été organisée en 2024 à l'ÉNS de Lyon. Le M2AI est organisé pour la diffusion scientifique auprès du grand public. Il a été porté en 2024 par le Laboratoire Jean Alexandre Dieudonné (Université Côte d'Azur). Durant ce mois étaient proposées quatre conférences autour de la thématique « Comment les mathématiques appliquées changent notre monde! ». Le cycle de conférences *SMAI et Musée des Arts et Métiers* est bien sûr toujours soutenu par la SMAI.

La SMAI remercie tous les organisateurs de ces manifestations pour leur travail et leur disponibilité, ainsi que N. Sahtout pour son aide comptable.

Une des priorités affichées de la SMAI est le soutien aux jeunes mathématiciens. Les *Projets BOUM* et *Subventions Jeunes*<sup>4</sup> en sont deux témoignages. Certains *Prix* leur sont également dédiés, en particulier une partie de ceux décernés par les groupes thématiques de la SMAI. Les *Subventions* sont accordées de façon exceptionnelle par la SMAI à des actions dont elle est partenaire.

Les charges fixes d'exploitation sont essentiellement liées aux deux salariées de la SMAI. On gardera cependant à l'esprit que la moitié environ des dépenses du secrétariat éditorial des journaux de la Société est couverte par les produits de la rubrique *EDP sciences*. Cette activité de publication reste une des priorités de la SMAI.

Dans la rubrique *Cotisation à d'autres organismes* sont comptabilisés 2400€ d'abonnement à l'AEF, abonnement partagé avec la SIF et la SFP et à destination du président et des vice-présidents de la SMAI. On retrouve également l'adhésion à l'EMS, European Mathematical Society, à l'ICIAM et, dans une moindre mesure (quelques centaines d'euros) le soutien au Collège des Sociétés Savantes Académiques de France, ainsi qu'à CIMPA, Animath et, depuis 2022, à l'association GUTenberg.COSSAD.

Les postes *Locations, assurances* sont stables, tout comme les *Frais de comptabilité et d'honoraires* de l'expert comptable.

**Locaux.** La SMAI est hébergée à l'Institut Henri Poincaré, 11 rue Pierre et Marie Curie, 75005 Paris, dans le cadre d'une convention.

---

**Résultat d'exploitation** (en €) 7803,80

---

Le résultat d'exploitation, balance des produits et charges d'exploitation, est légèrement positif pour l'année 2024. Ce résultat est du même ordre que le ré-

4. en 2024 : soutien à la participation au FEM « Forum Entreprises Maths »

sultat financier des placements de la SMAI (voir le compte de résultat consolidé ci-dessous).

### Résultat financier(en €)

	2024	2023
Produits financiers	8267,49	7952,79
Charges financières	2761,77	2462,56
<b>Résultat</b>	<b>5505,72</b>	<b>5490,23</b>

Les *Produits financiers* en 2023 sont issus des livrets d'épargne de la SMAI et de ses groupes ainsi que de son Compte Titres. Les *Charges financières*, correspondent aux frais de gestion et de tenue de compte de la banque.

### Compte de résultat consolidé (en €)

	2024	2023
Résultat d'exploitation	7803,80	-55 248,70
Résultat financier	5505,72	5490,23
<b>Total</b>	<b>13 309,52</b>	<b>-49 758,47</b>

Le compte de résultat consolidé est ainsi positif. La Société peut poursuivre ses engagements pour la communauté (soutien aux jeunes, médiation, communication).

## Compte de bilan consolidé

### Actif (en €)

	2024	2023
Actif immobilisé	799,00	1963,02
Créances d'exploitation	92 194,99	56 610,67
Valeurs mobilières de placement	478 812,41	505 144,15
Disponibilités banque	164 020,73	451 351,82
Comptes d'épargne	480 921,79	266 547,82
Caisse	0,92	0,92
Charges constatées d'avance	166 820,98	74 812,09
<b>Total</b>	<b>1 383 570,82</b>	<b>1 356 430,49</b>

### Passif (en €)

	2024	2023
Résultat de l'exercice	13 309,52	-47 547,95
Capital	1 066 689,05	1 116 449,50
SMAI Bloquées (RUP)	21 931,20	21 931,20
Dettes Fournisseurs & autres	246 097,93	176 699,83
Dettes sociales et fiscales	15 903,12	12 604,91
Produits constatés d'avance	19 640	76 293,00
<b>Total</b>	<b>1 383 570,82</b>	<b>1 356 430,49</b>

En 2016 le Conseil d'Administration de la SMAI a décidé d'affecter 10% du compte de résultat au fond de dotation SMAI dans le cadre de la RUP. Cette somme sera affectée en 2024.

Il est conseillé que les réserves (capital et RUP) soient au moins de l'ordre du double des charges d'exploitation annuelles. Cette proportion est respectée.

## Placements

Depuis début 2014, la SMAI est passée à une Gestion Conseillée par BNP-Paribas. Pour les propositions de placement, l'objectif de gestion BNP-PARIBAS pour la SMAI est depuis *prudent*. Une réflexion sur d'éventuels arbitrages a été amorcée en 2024.

Intitulé du placement	Montant
BNP Paribas Obli Moyen Terme	6090,67
Eurose	60 736,42
Parvest Bond Euro Inflation-Linked	30 431,70
Parvest Sustainable Bond Euro Corporate	42 170,53
Parvest Bond Euro Corporate	40 351,62
Parvest Equity Best Selection Euro	24 077,76
Renaissance Europe	15 513,55
JPM Europe Strategic Dividend	20 804,94
SCPI Pierre Sélection	10 950,00
BNP DEV HUM CLASSIC	37 125,19
BNP Social Buisness	29 840,03
OPUS REAL (82)	160 720,00
<b>Total</b>	<b>478 812,41</b>

## Justification des subventions accordées

La subvention annuelle du CNRS (20 K€) est accordée à la SMAI pour soutenir ses actions vers la communauté mathématique, en particulier pour les jeunes mathématiciennes et mathématiciens, pour soutenir les activités de publication de la SMAI, pour soutenir la recherche en mathématiques appliquées par l'attribution de prix. Cette subvention a permis la publication du bulletin de liaison MATAPLI, des subventions exclusivement orientées vers les jeunes, projets BOUM (<http://smai.emath.fr/spip.php?article548>) et FEM (<https://2021.forum-emploi-maths.com/public/pages/index.html>). Enfin, une partie de la subvention est utilisée pour des actions de vulgarisation comme le Cycle de médiation grand public SMAI-Musée des Arts et Métiers (<http://smai.emath.fr/spip.php?article643>).

L'INRIA accorde annuellement 10 K€ pour soutenir l'ensemble des activités de la SMAI. Cette subvention est utilisée principalement pour le financement des projets BOUM (<http://smai.emath.fr/spip.php?article548>). En 2024,

elle a également permis l'octroi de bourses pour la participation des jeunes à des colloques organisés par la SMAI. En aucun cas la SMAI n'utilise cette subvention pour le financement d'autres actions financées directement par INRIA.

# SMAI MEMBERS:

SIAM membership includes thousands of applied mathematicians and computational and data scientists working in academia, industry, government, and labs.

## JOIN SIAM NOW AND GET 25% OFF

### As a SIAM Member, You'll Get:

- Subscriptions to *SIAM News*, *SIAM Review*, and *SIAM Unwrapped* e-newsletter
- Discounts on SIAM books, journals, and conferences
- Eligibility to join SIAM activity groups, vote for or become a SIAM leader, and nominate or be nominated as a SIAM Fellow
- The ability to nominate two students for free membership



### You'll Help SIAM to:

- Increase awareness of the importance of applied and industrial mathematics
- Support outreach to students
- Advocate for increased funding for research and education

### You'll Experience:

- Networking opportunities
- Access to cutting edge research
- Visibility in the applied mathematics and computational science communities
- Career resources



“SIAM has long been a bedrock for applied mathematicians, providing crucial support, recognition, and connections. As we confront new challenges—explosive growth in data science, shifts in computational science, and financial complexities—I am committed to helping SIAM meet these challenges while maintaining its extremely high-quality and successful activities. With collective support, we'll navigate these changes and ensure that SIAM remains the go-to hub for applied mathematics by embracing excellence and fostering a welcoming community.”



— Carol S. Woodward, SIAM President  
Lawrence Livermore National Laboratory

## Join SIAM today at [siam.org/joinsiam](https://siam.org/joinsiam)

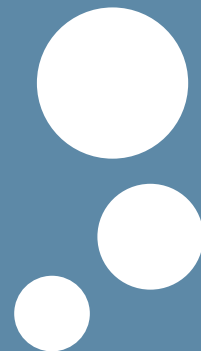
SMAI members who live outside the U.S. get a reciprocal member rate that is 30% less than the regular member rate. And if you join by December 31, 2025, you'll get an additional 25% off your membership when you enter promo code **MBNW26SM** at check out.



**SAVE  
30%**  
PLUS AN  
ADDITIONAL 25%  
WITH CODE **MBNW26SM**

**siam** | Society for Industrial and Applied Mathematics

# Bilan de seconde partie de mandat de la section 41 du CoNRS : 2023- 2025



par :

Stéphane SABOURAU

Nicolas THOLOZAN



Ce texte reprend et met à jour les informations contenues dans le bilan de la première partie de mandat de la section 41, disponible sur le site de la section <https://cn.math.cnrs.fr/> et paru dans la Gazette de la Société Mathématique de France (2023, tome 178) et Matapli (2023, numéro 132).

La section 41 du Comité national de la recherche scientifique (renumérotée section 01 à partir de l'automne 2025), intitulée *Mathématiques et interactions des mathématiques*, est chargée principalement de l'évaluation scientifique concernant les mathématiques au CNRS, et en particulier de l'étape d'admissibilité des concours de recrutement de chercheurs et chercheuses.

Elle travaille de manière indépendante en étroite collaboration avec l'INSMI qui anime la politique scientifique. Plus précisément, la section 41 donne des avis consultatifs sur les points suivants :

- recrutements CR/DR : jury d'admissibilité (différent du jury d'admission)
- avancements de grade
- évaluation des chercheurs et chercheuses
- RIPEC C<sub>3</sub>
- médailles du CNRS
- accueils en délégation CNRS
- écoles thématiques

- chercheurs/chercheuses invitées (postes rouges - invitations de 3 mois)
- évaluations de structures : UMR (HCERES), IRL, RT (GDR), etc.

La section se réunit lors de deux sessions – au printemps et à l’automne – et avant la session de printemps en ce qui concerne le jury d’admissibilité pour les concours CR et DR.

La section 41 sortante a exercé son mandat de l’automne 2021 au printemps 2025. Composée de 21 membres, elle était constituée en sa dernière année de mandat de : Jean-François Aujol, Guillaume Barraquand, Pierre Barthélemy, Isabelle Bellier, Anaïs Crestetto, Elena Di Bernardino, Stéphane Druel, Anna Floriot, Grégory Ginot, Yves Guiraud (membre du bureau), Daniel Han-Kwan, David Lannes (membre du bureau), Sophie Morel, Pierre Neuvial, Anne Pichon, Éric Ricard, Simon Riche (membre du bureau), Stéphane Sabourau (président) Jean-Marc Sac-Épée, Nicolas Tholozan (secrétaire scientifique), Ariane Trescases.

## 1 Bilan des quatre années de mandat

Avant de dresser un bilan détaillé de nos activités ces deux dernières années, il nous semble utile de mentionner quatre aspects de la politique scientifique du CNRS qui ont influé sur le travail de la section durant ce mandat.

### 1.1 Coloriage géographique

Ces dernières années, l’INSMI a mis en place l’ouverture au concours de postes coloriés géographiquement, pour affectation dans certains laboratoires disposant de peu de chercheurs CNRS. Cette initiative a effectivement permis de renforcer la présence du CNRS dans de nombreux laboratoires et d’en soutenir l’activité de recherche. La section 41 a pu constater cependant que le nombre de candidatures sur ces postes coloriés était inférieur par rapport au concours général.

- Au niveau CR, le concours colorié a été attractif, même si environ 40% des candidats et candidates du concours général ne postulaient pas sur le concours colorié. On note en particulier que les personnes ayant effectué leurs études à l’étranger candidatent rarement au concours colorié et demandent le plus souvent à être affectées dans les grands laboratoires parisiens.
- Au niveau DR, le nombre de candidatures au concours colorié est resté plus limité, avec moins de 40% des candidatures du concours général, et

pratiquement aucune candidature féminine. Conscient de cette difficulté, l'INSMI n'a pas ouvert de poste de DR colorié en 2025, mais se réserve la possibilité d'ouvrir à nouveau un concours DR colorié dans le futur.

## 1.2 Parité

Le CNRS revendique depuis plusieurs années une politique active en faveur de la représentation des femmes dans les corps de CR et DR. Ces dernières années, l'INSMI a traduit cela par des objectifs chiffrés ambitieux en termes de recrutement, objectifs dont le jury du concours a tenu compte lors de ses discussions. Actuellement, la part des candidatures féminines au concours CR s'élève à près de 20%. Pour plus de détails, voir les statistiques ci-dessous.

## 1.3 RIPEC

Le régime de primes PEDR, largement critiqué, a cédé la place depuis 2022 au régime indemnitaire des personnels enseignants et chercheurs (RIPEC), qui vise une meilleure répartition des primes. Depuis 2023, la section a décidé de participer à l'attribution de la RIPEC-C3 et a pu observer effectivement une augmentation notable du nombre de primes attribuées et une nette diminution de la pression au cours des années.

## 1.4 Attractivité du CNRS à l'international

Depuis quelques années, le CNRS prélève sur le contingent de postes ouverts au concours 15 postes (toutes disciplines confondues) destinés à faire venir en France des chercheuses et chercheurs "de renommée internationale" en poste à l'étranger. Ceux-ci doivent candidater sur le concours DR général. La direction du CNRS exige qu'ils soient classés premiers devant les autres. Les noms ainsi proposés par toutes les sections sont ensuite discutés et interclassés par le jury d'admission sur le contingent des postes réservés. Un élément qui entre en compte dans cet arbitrage est le soutien en termes de moyens (création de postes de PR/MCF, financements de post-doc ou de thèse, etc.) de l'université d'accueil.

En définitive, ces postes viennent donc s'ajouter aux postes ouverts au concours DR. Si la section trouve ce fonctionnement opaque et alambiqué, elle a pu observer chaque année la présence de quelques excellentes candidatures qui correspondaient au profil, et a donc joué le jeu en proposant un ou plusieurs recrutements. Certaines opérations n'ont cependant pas pu aboutir.

## 2 Concours 2024 et 2025

Le jury d'admissibilité pour les concours CR et DR du CNRS en mathématiques, constitué des membres rangs A et B de la section 41, procède à des auditions pour les concours CR (pas d'auditions pour le concours DR) devant des sous-jurys généralement composés de quatre ou cinq membres représentant plusieurs domaines des mathématiques. Ces auditions ont lieu sur une journée à l'IHP (que la section remercie pour son hospitalité), et sont suivies de trois jours de délibération à l'issue desquels une liste d'admissibilité est établie pour chaque concours.

La section souligne que les listes des candidates et candidats auditionnés ou déclarés admissibles sont établies en fonction de critères et de profils spécifiques. Par conséquent, elles ne peuvent être utilisées comme référence dans un contexte différent ni pour d'autres concours.

Un jury d'admission distinct et indépendant du jury d'admissibilité établit un classement final à partir de la liste d'admissibilité pour chaque concours. Il est rappelé que, même si cela n'est pas arrivé au cours de ce mandat, le jury d'admission est tout à fait libre de modifier le classement du jury d'admissibilité, et ne s'en prive pas dans d'autres disciplines.

L'affectation des lauréates et lauréats est une prérogative de l'INSMI.

Pour le recrutement DR, la politique du CNRS est de privilégier les candidatures des chercheurs et chercheuses ayant déjà soutenu leur HDR.

Les lettres de recommandations éventuelles – ces dernières n'étant en aucun cas obligatoires – doivent être déposées sur le site du concours du CNRS avant la clôture des inscriptions. Le jury ne peut pas prendre en compte les lettres parvenues en retard ou envoyées directement au président, au secrétaire scientifique ou à l'un des membres de la section.

### 2.1 Bilan du concours 2024

En 2024, 27 postes étaient ouverts au concours, dont 10 DR et 17 CR :

- DR 41/01 : 6 postes de directeurs ou directrices de recherche de deuxième classe (DR2).
- DR 41/02 : 4 postes de DR2 « coloriés », dont prioritairement :
  - 1 DR2 affecté au LMR (Reims),
  - 1 DR2 affecté au LAMME (Évry),
  - 2 DR2 affectés au LAMFA (Amiens), à l'IECL (Nancy-Metz) ou au LMAP (Pau).

- CR 41/03 : 9 postes de chargé-e de recherche de classe normale (CRCN).
- CR 41/04 : 6 postes de CRCN « coloriés », dont prioritairement :
  - 1 CRCN affecté au LMR (Reims),
  - 1 CRCN affecté au LMA (Poitiers),
  - 4 CRCN affectés au LAMFA (Amiens), au LMNO (Caen), à l'IMB (Dijon), au LMAP (Pau), ou au LMRS (Rouen).
- CR 41/05 : 1 poste de CRCN sur le thème « Aspects mathématiques de l'informatique (algorithmique, fondement des langages de programmation, optimisation, sciences des données) » dont le projet de recherche s'inscrit dans une unité rattachée à CNRS Sciences informatiques à titre principal.
- CR 41/06 : 1 poste de CRCN sur le thème « modélisation et analyse mathématique en mécanique des fluides, procédés, plasmas, transferts » dont le projet de recherche s'inscrit dans une unité rattachée à CNRS Ingénierie à titre principal.

Les données relatives à l'ensemble des concours CR et aux concours CR non fléchés thématiquement sont présentées dans le tableau suivant :

concours CR 2024	CR 41/03-06	CR 41/03-04
Candidatures examinées	302 (59F, 19%)	273 (50F, 18%)
Admissibles en liste principale	17 (4F, 24%)	15 (4F, 27%)
Expérience	1-6	2-6

Celles concernant chacun des concours CR sont présentées dans le tableau suivant :

concours CR 2024	CR 41/03	CR 41/04	CR 41/05	CR 41/06
Candidatures examinées	266 (50F, 19%)	165 (28F, 17%)	67 (16F, 24%)	17 (4F, 24%)
Admissibles en liste principale	9 (2F, 22%)	6 (2F, 33%)	1 (0F, 0%)	1 (0F, 0%)
Expérience	2-6	2-4	1	3

Enfin, celles concernant les concours DR sont présentées dans le tableau suivant :

concoures DR 2024	DR 41/01-02	DR 41/01	DR 41/02
Candidatures examinées	65 (9F, 14%)	63 (9F, 14%)	21 (2F, 10%)
Candidatures de CR	39 (3F, 8%)	39 (3F, 8%)	8 (0F, 0%)
Admissibles en liste principale	10 (1F, 10%)	6 (1F, 17%)	4 (0F, 0%)
Expérience	11-16	11-16	14-16

Il convient de noter qu'une collègue a été recrutée DR par une autre section.

Dans chacun de ces tableaux, le nombre de femmes candidates ou sur liste principale d'admissibilité est indiqué entre parenthèses. L'expérience (sous forme de fourchette minimum-maximum) des personnes sur liste principale d'admissibilité est indiquée en nombre d'années par rapport à la thèse, en excluant le cas échéant les périodes d'activité professionnelle hors monde de la recherche. Les données concernant le nombre d'admissibles et leur expérience ne prennent pas en compte les candidatures sur des postes de DR externe. La section a par ailleurs proposé deux chercheurs en poste à l'étranger sur des postes de DR externe.

Liste des personnes admises :

- DR 41/01 (6 postes + 1 poste supplémentaire\*) : Laurent Bartholdi\*, Scott Armstrong, Marianne Bessemoulin, Henri Guenancia, Yonatan Harpaz, Igor Kortchemsky, Pierre Py.
- DR 41/02 (4 postes) : Abed Bounemoura, David Burguet, Ludovic Goude-nège, Camille Laurent.
- CR 41/03 (9 postes) : Russel Avdek, Andreia Chapouto, Giada Franz, Yvailo Hartarsky, Antoine Jego, Tasos Moulinos, Rémi Reboulet, Athanasios Sourmelidis, Arthur Touati.
- CR 41/04 (6 postes) : Arthur Blanc-Renaudié, Noemi David, Yassine Guerch, Lucien Hennecart, Ayman Saïd, Julia Schneider.
- CR 41/05 (1 poste) : Antoine Maillard.
- CR 41/06 (1 poste) : Thomas Bellotti.

Sur les 17 personnes admises au concours CR, six sont de nationalité étrangère et ont effectué leur doctorat à l'étranger, et neuf ont soutenu leur thèse dans un laboratoire de la région parisienne. On observe également que la très grande majorité des personnes ayant effectué leur études en France est passée par une ÉNS ou l'École polytechnique. Les personnes promues DR (hors poste de DR externe ou en position de détachement) sont issues des laboratoires CEREMADE, CMAP, FDMCS, LAGA, LJLL, LMJL, LPSM, IF, IMT.

La liste principale d'admission pour le poste de CR en section 10 dont le projet s'inscrit dans une unité rattachée à l'INSMI à titre principal est :

- CR 10/04 : Joris Labarbe.

Deux CR dont le projet de recherche s'inscrit dans des unités rattachées à l'INSMI à titre principal ont été recrutés par la commission interdisciplinaire 51 :

- CR 51/02 : Félix Foutel-Rodier, Laura Kanzler.

## 2.2 Bilan du concours 2025

En 2025, 26 postes étaient ouverts au concours, dont 11 DR et 15 CR :

- DR 41/01 : 11 DR2, dont prioritairement 2 DR2 sur des projets d'interaction des mathématiques avec d'autres disciplines.
- CR 41/02 : 11 CRCN, dont prioritairement 2 CRCN sur des projets d'interaction des mathématiques avec d'autres disciplines.
- CR 41/03 : 3 CRCN, dont prioritairement :
  - 1 CRCN affecté au LAMME (Évry),
  - 1 CRCN affecté au LMA (Poitiers),
  - 1 CRCN affecté au LMBA (Brest-Vannes).
- CR 41/04 : 1 CRCN dont le projet de recherche s'inscrit dans une unité rattachée à CNRS Physique à titre principal.

Les données relatives à l'ensemble des concours CR et aux concours CR non fléchés thématiquement sont présentées dans le tableau suivant :

concours CR 2025	CR 41/02-04	CR 41/02-03
Candidatures examinées	324 (63F, 19%)	319 (60F, 19%)
Admissibles en liste principale	15 (5F, 33%)	14 (5F, 36%)
Expérience	0-6	0-6

Celles concernant chacun des concours CR sont présentées dans le tableau suivant :

concours CR 2025	CR 41/02	CR 41/03	CR 41/04
Candidatures examinées	308 (57F, 19%)	128 (22F, 17%)	44 (13F, 30%)
Admissibles en liste principale	11 (4F, 36%)	3 (1F, 33%)	1 (0F, 0%)
Expérience	0-5	3-6	2

Enfin, celles concernant le concours DR sont présentées dans le tableau suivant :

concours DR 2025	DR 41/01
Candidatures examinées	60 (13F, 22%)
Candidatures de CR	41 (7F, 17%)
Admissibles en liste principale (hors DR externes)	11 (3F, 27%)
Expérience	11-18

Dans chacun de ces tableaux, le nombre de femmes candidates ou sur liste principale d'admissibilité est indiqué entre parenthèses. L'expérience (sous forme de fourchette minimum-maximum) des personnes sur liste principale d'admissibilité est indiquée en nombre d'années depuis la thèse. Les données concernant le nombre d'admissibles et leur expérience ne prennent pas en compte les candidatures sur des postes de DR externe. La section a par ailleurs proposé deux chercheuses et un chercheur en poste à l'étranger sur des postes de DR externe.

Les listes principales d'admission diffèrent de celles d'admissibilité suite au désistement d'un candidat sur le concours CR pour un poste à l'étranger. Listes des personnes admises :

- DR 41/01 (11 postes + 2 postes supplémentaires\*) : Rowan Killip\*, Monica Visan\*, Omid Amini, Olivier Benoist, Oriane Blondel, Kestutis Cesnavicius, Laure Dumaz, Grégory Faye, Cécile Huneau, Marco Mazzucchelli, Ion Nechita, Andrés Sambarino, Samuel Vaiter.
- CR 41/02 (11 postes) : Thomas Blomme, Alice Contat, Charlotte Isabel Dietze, Matthieu Dolbeault, Veronica Fantini, Colin Faverjon, Danica Kosanovic, Dmitry Kubrak, Félix Loubaton, Franco Severo, Frank Trujillo.
- concours CR 41/03 (3 postes) : Martin Donati, Pierre Humbert, Lilia Mehidi.
- CR 41/04 (1 poste) : Baptiste Cerclé.

Sur les 15 personnes admises au concours CR, quatre sont de nationalité étrangère avec une thèse étrangère et sept ont soutenu leur thèse dans un laboratoire de la région parisienne. On observe également que toutes les personnes ayant effectué leurs études en France sont passées par une ÉNS. Les personnes promues DR (hors poste de DR externe) sont issues des laboratoires CMLS, DMA (3), ICJ, LJAD, LMO, LPT, IMJ-PRG, IMT, UMPA.

Les listes principales d'admission pour les postes de CR en sections 02, 05 et 07 dont le projet s'inscrit dans une unité rattachée à l'INSMI à titre principal sont :

- CR 02/03 : Alvis Bastianello.
- CR 05/03 : Nina Javerzat.
- CR 07/03 : Hugo Cui.

Deux personnes dont le projet de recherche s’inscrit dans une unité rattachée à l’INSMI à titre principal et une chercheuse rattachée à la section 41 sont sur les listes principales d’admission de la commission interdisciplinaire 51 :

- DR 51/01 : Alice Cleynen.
- CR 51/02 : Nicoletta Prencipe, Chiara Villa.

### 2.3 Recrutement de CR en situation de handicap

Chaque année, le CNRS ouvre des postes réservés au recrutement de chercheurs et chercheuses en situation de handicap par voie contractuelle (voir <http://carrieres.cnrs.fr/actualites/recrutement-de-chercheurs-et-chercheuses-par-la-voie-contractuelle/>). Les personnes intéressées par cette voie d’accès sont invitées à prendre contact avec le directeur ou la directrice du laboratoire où elles souhaiteraient être affectées afin que l’INSMI puisse en être informé en amont. En pratique, il convient d’entreprendre les démarches en début d’année universitaire. Le dossier à monter comprend un CV, une description des travaux et du projet scientifique, les rapports de thèse et de soutenance, un exemplaire de la thèse et des travaux, et des lettres de recommandation éventuelles.

En 2024 et 2025, deux chercheurs ont été recrutés par voie contractuelle de cette manière.

## 3 Avancements de grade

Deux nouveautés ont eu lieu en 2022. D’une part, la création d’un échelon contingenté HEB pour les CRHC (comme c’est le cas pour les MCF-HC). D’autre part, la fin du contingentement pour les avancements DRCE (comme c’est le cas pour les avancements PRCE) qui a permis une hausse notable du nombre de promotions au niveau DRCE<sub>1</sub> au cours du mandat.

La section est attentive à l’équilibre des dossiers entre les différentes missions des chercheurs. Pour le passage CRHC, les candidatures des CR ayant atteint les échelons 9 ou 10 sont actuellement prioritaires pour la direction du

CNRS. Ces dernières années, le faible nombre de candidatures de CR à ces échelons n'a pas permis d'utiliser pleinement le contingent de promotions hors-classe réservé à la section. La section encourage donc vivement les CR concernés à déposer leur candidature à la hors-classe. Au niveau DR, parmi les dossiers présentant des résultats scientifiques marquants, la priorité est accordée à ceux témoignant d'un fort investissement en termes de responsabilités collectives et d'encadrement doctoral.

Les délibérations ont lieu lors de la session d'automne. Pour les promotions, plutôt qu'une description exhaustive des résultats obtenus, il est demandé par le CNRS de faire une présentation générale des travaux et de mettre en avant 5 à 10 productions scientifiques, depuis la dernière promotion et dans la limite de dix ans, en expliquant ce choix et en décrivant plus précisément leur contenu et leur portée scientifique. La section favorise la qualité des travaux plutôt que leur quantité.

Les données relatives aux avancements de grade sont présentées dans les tableaux suivants :

2023	CRHC	CRHC-HEB	DR1	DRCE1	DRCE2
Candidatures	11 (2F, 18%)	10 (2F, 20%)	22 (3F, 14%)	21 (3F, 14%)	2 (1F, 50%)
Promotions	4 (0F, 0%)	5 (2F, 40%)	6 (1F, 17%)	6 (1F, 17%)	2 (1F, 50%)
Ancienneté	18-27	4-7	6-13	7-15	3

2024	CRHC	CRHC-HEB	DR1	DRCE1	DRCE2
Candidatures	6 (1F, 17%)	7 (0F, 0%)	20 (2F, 10%)	21 (4F, 19%)	4 (1F, 25%)
Promotions	2 (1F, 50%)	5 (0F, 0%)	6 (1F, 17%)	9 (2F, 22%)	4 (1F, 25%)
Ancienneté	21-23	5-7	5-23	5-15	3

Pour chaque grade, le nombre de femmes candidates ou promues est indiqué entre parenthèses. L'ancienneté (sous forme de fourchette minimum-maximum) est indiquée en nombre d'années par rapport à la dernière promotion, ou par rapport à la thèse pour le passage CRHC.

Listes principales des personnes proposées à une promotion :

### Promotions CRHC

- 2023 : Christophe Cornut, Cyril Lecuire, Luc Pirio, Paul Ruet.
- 2024 : Frédérique Laurent-Nègre, Nefton Pali.

**Promotions CRHC-HEB**

- 2023 : Brigitte Bidegaray-Fesquet, Marc Chardin, Thierry de la Rue, Pascale Harinck, Jie Wu.
- 2024 : Alain Albouy, Michel Balazard, Philippe Gaucher, Robert Larterveer, Dominique Manchon.

**Promotions DR1**

- 2023 : Xavier Caruso, Arnaud Chéritat, Jean-François Coulombel, Frédéric Déglise, Bertrand Deroin, Cristina Toninelli.
- 2024 : Pierre Berger, Vincent Calvez, Emmanuel Dormy, Claudio Landim, Gilles Stoltz, Amandine Véber.

**Promotions DRCE1**

- 2023 : Yves André, Rémi Carles, Charles Favre, Louis Funar, Catherine Matias, Frédéric Nataf.
- 2024 : Christophe Breuil, Serge Cantat, Sylvain Crovisier, Anne De Bouard, Philippe Gille, Cyril Imbert, Wiesława Nizioł, Jérémie Szeftel, Abdelghani Zeghib.

**Promotions DRCE2**

- 2023 : Anne Marie Aubert, Didier Bresch.
- 2024 : Laurent Manivel, Ellen Saada, Philippe Le Floch, Ofer Gabber.

## 4 Évaluations des chercheurs et chercheuses

Suivant la vague d'évaluation HCERES de leur laboratoire, les chercheuses et chercheurs doivent remettre :

- un compte-rendu annuel d'activité (CRAC);
- un rapport à mi-vague (sans projet de recherche) portant sur les 5 derniers semestres;
- un rapport à vague (avec projet de recherche) portant sur les 10 derniers semestres.

La section émet un avis (favorable, différé, réservé, alerte ou insuffisance professionnelle) et écrit un rapport sur l'activité de chaque chercheuse ou chercheur. Il est également possible d'être évalué par deux sections. Les rapports de section peuvent contenir des recommandations. Il convient donc de les lire attentivement.

En cas d'avis réservé ou d'alerte, un suivi post-évaluation est mis en place impliquant la délégation régionale du CNRS et l'INSMI pour trouver, dans le cadre d'un dialogue constructif avec les chercheurs ou chercheuses en difficulté, des solutions adaptées à la situation. Il convient de souligner que la mise en œuvre de ce suivi a permis à l'ensemble des personnes concernées de renouer avec une dynamique positive dans leur activité scientifique. En cas d'avis d'insuffisance professionnelle, une procédure auprès de la commission administrative paritaire du CNRS est mise en place pouvant conduire à un licenciement. Il faut recueillir deux avis favorables consécutifs pour que le suivi post-évaluation soit levé.

### 5 RIPEC-C3

La composante 3 du RIPEC est une prime individuelle d'un montant de 3 500€/an attribuée au mérite pour 3 ans qui remplace la PEDR. L'objectif du CNRS est qu'en 2027, 55% des chercheurs et chercheuses en bénéficie. Depuis 2023, la section accepte de participer à l'évaluation des dossiers de candidatures. Les délibérations ont lieu lors de la session de printemps. Les décisions finales sont prises par le CNRS sur proposition de l'INSMI.

Lors de la campagne 2024, la section a examiné 57 candidatures pour 25 primes disponibles. Les candidatures étaient réparties de la façon suivante :

- 27 CR, soit 47% (dont 2 femmes, soit 7%)
- 30 DR, soit 53% (dont 6 femmes, soit 20%)

La section a classé 25 dossiers (suivie d'une liste complémentaire) répartis de la façon suivante :

- 13 CR, soit 52% (dont 1 femme, soit 8%)
- 12 DR, soit 48% (dont 5 femmes, soit 42%)

Lors de la campagne 2025, la section a examiné 80 candidatures pour 76 primes disponibles. Les candidatures étaient réparties de la façon suivante :

- 43 CR, soit 54% (dont 6 femmes, soit 14%)
- 37 DR, soit 46% (dont 9 femmes, soit 21%)

La section a classé 75 dossiers (suivie d'une liste complémentaire) répartis de la façon suivante :

- 41 CR, soit 55% (dont 6 femme, soit 15%)
- 34 DR, soit 45% (dont 9 femmes, soit 26%)

Conformément aux recommandations du CNRS, parmi les dossiers présentant une recherche de grande qualité, la section a classé en priorité les candidates et candidats pouvant obtenir la prime au titre de l'ensemble des missions d'un chercheur au sens de l'article L411-1 du code de la recherche (développement des connaissances; transfert et leur application dans les entreprises, et dans tous les domaines contribuant au progrès de la société; information des citoyens dans le cadre de la politique nationale de science ouverte et la diffusion de la culture scientifique et technique dans toute la population, notamment parmi les jeunes; participation à la formation initiale et à la formation continue; construction de l'espace européen de la recherche et participation aux coopérations européennes et internationales en matière de recherche et d'innovation; administration de la recherche; expertise scientifique). L'implication est appréciée au regard du corps d'appartenance et de l'ancienneté.

Par ailleurs, compte tenu du nombre limité de primes disponibles au regard de la qualité des dossiers lors de la campagne 2024, la section a choisi de classer en priorité cette année-là :

- Les candidates et candidats dont les fonctions et responsabilités ne donnent pas lieu au versement de la composante fonctionnelle C2 du RIPEC, comme celles de DU, responsable de projet ERC, etc.
- Les candidates et candidats dont les activités ne donnent pas lieu par ailleurs à un complément de rémunération significatif, comme celles de chargé-es de cours à l'École polytechnique, MCF/PR attaché-es dans une ÉNS, etc.

Nous espérons que la communauté mathématique sera compréhensive vis-à-vis de ces critères qui, s'ils peuvent prêter à débat, nous semblent aller dans le sens d'une amélioration des conditions salariales du plus grand nombre. Compte-tenu de l'augmentation significative du nombre de primes disponibles, ces critères ont été abandonnés lors de la campagne 2025.

Les dossiers de candidature devraient inclure une brève description de l'activité de recherche (2-3 pages) dans le CV et se limiter à la période de référence (soit les quatre dernières années en ajoutant 18 mois par congé maternité).

## 6 Médailles du CNRS

En réponse à la commande de l'INSMI, la section 41 propose chaque année quatre noms pour la médaille de bronze et deux noms pour la médaille d'argent (à parité). La sélection finale est effectuée en comité de direction du CNRS.

Les lauréates et lauréats des deux dernières années sont :

- Bronze 2024 : Charlotte Perrin, Danylo Radchenko.
- Argent 2024 : Julie Delon.
- Bronze 2025 : Laure Dumaz, Benjamin Wesolowski.
- Argent 2025 : Serge Cantat.

## 7 Délégations CNRS

La section 41 est consultée sur les demandes d'accueil en délégation au CNRS des enseignantes-chercheuses et enseignants-chercheurs demandant une affectation dans une unité de l'INSMI. Les décisions sont prises par le CNRS après proposition des instituts, en s'appuyant sur les avis des sections, de l'unité d'accueil et des établissements des candidats et candidates.

Outre la qualité scientifique du dossier, le projet de recherche est un élément déterminant du processus d'évaluation de la section. Ce projet doit donc être clairement décrit. La section prend également en compte sur les cinq dernières années :

- le nombre d'heures d'enseignement effectuées ;
- le nombre de délégations/CRCT obtenues ;
- l'implication dans les tâches d'intérêt collectif (selon l'ancienneté).

Une attention particulière est portée aux situations suivantes :

- projet de séjour long ou mobilité géographique ;
- finalisation d'HDR ;
- retour de congé maternité, parental ou maladie longue ;
- mobilité thématique, par exemple l'interdisciplinarité ;
- développement de collaborations avec des entreprises ;
- activités importantes de diffusion des mathématiques ;
- tâche collective où aucune décharge n'est prévue ;
- préparation d'un projet ERC.

Les délégations peuvent également être un moyen d'aider les collègues EC à redynamiser leur activité de recherche.

Pour rappel, le nombre de délégations dont dispose l'INSMI est fonction de la pression entre les instituts. Ainsi, bien que le nombre de demandes à l'INSMI soit reparti à la hausse (198 en 2022, 221 en 2023, 238 en 2024, 241 en 2025), le nombre de délégations effectivement accordées à l'institut reste stable, en raison de la

hausse parallèle du nombre de demandes dans les autres instituts. La section encourage vivement les enseignants-chercheurs et enseignantes-chercheuses à soumettre régulièrement leurs candidatures afin de préserver le nombre significatif de délégations dont bénéficie traditionnellement notre communauté. Les collègues dont la demande d'accueil en délégation n'a pas été retenue sont invités à ne pas se décourager et à postuler à nouveau.

### 8 Chercheuses et chercheurs invités (postes rouges)

Les laboratoires ont la possibilité de demander auprès de l'INSMI des financements pour l'invitation de chercheurs et chercheuses en poste à l'étranger, pour une durée de 3 mois. Les principaux critères d'évaluation reposent sur la qualité du dossier scientifique des personnes invitées et sur le projet de recherche proposé. Ce projet doit associer au moins un membre de l'unité d'accueil et mettre clairement en valeur les apports attendus de la collaboration. Bien qu'une demande puisse se limiter à une collaboration entre la personne invitée et son hôte, les projets présentant une dimension collective sont particulièrement appréciés. Il convient de rappeler que les postes rouges ne sont pas destinés à remplir le rôle d'un post-doctorat.

### 9 Écoles thématiques

Les écoles thématiques sont des rencontres scientifiques comportant des cours de niveau recherche destinés aux chercheuses et chercheurs, enseignantes-chercheuses et enseignants-chercheurs organisées dans le cadre de la formation continue des personnels CNRS. Le format colloque est par conséquent exclu. La contribution du CNRS a vocation à financer la participation des personnels CNRS. Ainsi, même si les écoles thématiques sont ouvertes aux doctorants et doctorantes, la participation du CNRS n'a pas vocation à les financer directement. Les dossiers d'écoles thématiques sont soumis à l'avis de la section lors de la session d'automne, après présélection par l'INSMI, et parfois plusieurs échanges pour cadrer le dossier. La section se prononce sur les aspects scientifiques et pas sur le montant attribué. Son avis est attendu sur la pertinence de la thématique par rapport au périmètre de l'INSMI, la cohérence des contenus proposés, le choix des intervenants, le programme proposé et le vivier du public visé, notamment parmi le personnel CNRS. La section est également sensible aux considérations de diversité et à la prise en compte de l'impact écologique de ces écoles thématiques.

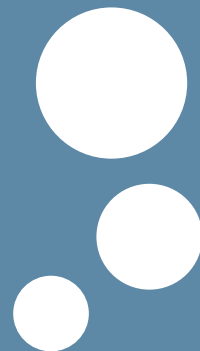
## 10 Motion d'opposition au projet de « key labs »

---

La section a voté la motion suivante le 30 janvier 2025 :

*« La Section 41 du Comité national de la recherche scientifique s'oppose à la proposition de labellisation de « key labs » faite par la direction du CNRS, sans aucune concertation avec les acteurs de la recherche et leurs instances représentatives. Cette proposition va à l'encontre du fonctionnement de la communauté mathématique française et ne peut que lui porter préjudice. La Section s'associe à la motion de la Coordination des responsables des instances du CoNRS (C3N) et refuse une mesure qui serait néfaste à l'ensemble de la recherche française. »*

# Prix Neveu : Statistique pour démêler le désordre des protéines



par :

Javier GONZÁLEZ-DELGADO<sup>1</sup> — Univ. Rennes, Ensai,  
CREST.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>1 Le désordre intrinsèque des protéines</b> .....	50	<b>3 Analyse structurale globale</b>	57
<b>2 Analyse structurale locale</b>	51	3.1 Le problème de caractérisation .....	57
2.1 Descripteurs structuraux locaux .....	52	3.2 Inférence post-clustering pour évaluer la caractérisation	58
2.2 Transport Optimal pour comparer des structures locales ..	53	<b>Références</b> .....	60

Les protéines sont des molécules qui occupent des fonctions essentielles à l'activité des organismes vivants. Elles jouent un rôle central dans la majorité des processus biologiques, opérant aux échelles moléculaire, cellulaire et de l'organisme. Les nombreuses fonctions des protéines sont étroitement liées à leur structure spatiale [25], dont la compréhension constitue donc une tâche essentielle.

Alors qu'une grande partie des protéines adopte une forme tridimensionnelle stable, la structure spatiale d'environ 40% des protéines du génome humain est en constante évolution et ne présente pas d'état d'équilibre global. La reconnaissance de la pertinence fonctionnelle de ces protéines, dites *flexibles* ou *intrinsèquement désordonnées*, a entraîné un changement de paradigme en biologie structurale [29]. Bien qu'elles soient dépourvues de structure spatiale stable, elles remplissent une grande diversité de fonctions biologiques en exploitant leur flexibilité intrinsèque [24]. De plus, leur mauvais fonctionnement peut induire

1. [javier.gonzalez-delgado@ensai.fr](mailto:javier.gonzalez-delgado@ensai.fr)

des maladies graves, notamment des cancers, des maladies cardiovasculaires ou neurodégénératives [30].

Malgré l'importance des protéines flexibles, la biologie structurale n'a pas encore développé, à ce jour, des méthodes permettant une compréhension complète de leur structure spatiale. L'analyse structurale de ces objets ne peut pas être réalisée en utilisant les mêmes techniques que celles employées dans l'étude des protéines rigides. En particulier, leur nature intrinsèquement probabiliste exige de placer l'outil statistique au centre de leur étude. Notre objectif est de présenter des outils statistiques pour caractériser et comparer la structure spatiale des protéines flexibles. La stratégie générale consiste à définir des distributions de probabilité qui capturent avec précision leur variabilité structurale, puis à utiliser des techniques statistiques pour caractériser et comparer de manière appropriée ces descripteurs. Cette approche peut être mise en œuvre au niveau local (à l'échelle d'un acide aminé) ou au niveau global (à l'échelle de la protéine entière), l'intérêt pour une échelle ou une autre dépendant du contexte applicatif.

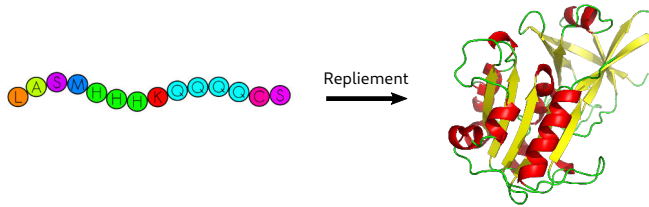
Dans la section 1, nous détaillons l'enjeu des protéines désordonnées. Dans la section 2, nous présentons une méthode de comparaison locale, en exploitant la théorie du transport optimal. Dans la section 3, nous étudions les techniques de caractérisation globale, en nous appuyant sur des outils de classification non supervisée et d'inférence sélective. Bien que motivées par l'étude des protéines flexibles, les méthodes statistiques présentées sont utiles dans un cadre général.

## 1 Le désordre intrinsèque des protéines

Une protéine est une macromolécule constituée d'acides aminés connectés entre eux par des liaisons peptidiques. La séquence d'acides aminés, appelée *structure primaire* ou *séquence*, peut se replier ou s'enrouler pour doter la protéine d'une structure spatiale, que nous appellerons généralement *structure*. L'un des enjeux principaux de la biologie structurale consiste à décrypter les mécanismes qui régissent ce processus, connu sous le nom de *repliement* (Figure 1).

Les protéines dites rigides peuvent se replier en un nombre réduit de configurations spatiales stables. Au contraire, les protéines intrinsèquement désordonnées (PID) possèdent un continuum de configurations possibles et changent donc constamment de forme [20]. L'ensemble de ces configurations, appelées *conformations*, constitue l'*ensemble conformationnel* de la protéine.

L'étude des protéines flexibles soulève deux difficultés majeures. D'une part, l'absence d'une structure stable nécessite de réadapter les techniques classiques pour étudier la relation séquence-structure. D'autre part, l'absence de données



**FIGURE 1** — Illustration du processus de repliement. La séquence (à gauche) se replie pour donner lieu à la structure (à droite).

expérimentales constitue une limitation remarquable. Alors que l'on a accès à plus de 200.000 structures expérimentales de protéines rigides [2], seulement 280 ensembles conformationnels de protéines flexibles ont été déterminés expérimentalement à ce jour [23]. Dans ce contexte, les données expérimentales ne peuvent pas fournir d'informations précises sur chacune des conformations individuelles de l'ensemble, mais seulement des mesures moyennes. Par conséquent, l'étude des ensembles conformationnels des protéines désordonnées est largement régie par des techniques de simulation et de modélisation souvent calibrées avec des données expérimentales [7]. Ces approches permettent de générer des ensembles conformationnels de PID de taille indéterminée, mais l'analyse structurale de ces objets reste encore une tâche à accomplir. Une réflexion naturelle s'impose ici : comment transformer les résultats des modèles génératifs en représentations concises et interprétables qui permettent de comprendre la relation séquence-structure dans la protéine ? Plus succinctement : comment pouvons-nous *caractériser* et *comparer* des ensembles de protéines hautement flexibles ? La seule réponse possible doit passer par des techniques conçues pour traiter la variabilité des objets intrinsèquement désordonnés : les probabilités et les statistiques.

## 2 Analyse structurale locale des protéines flexibles

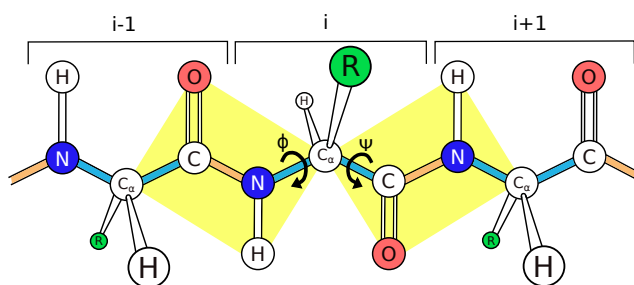
Dans cette section, nous cherchons à quantifier l'amplitude des effets structuraux liés aux modifications locales de la séquence, telles que les mutations. Cela revient à comparer la structure d'une paire donnée d'acides aminés. Pour ce faire, nous commençons par introduire, en section 2.1, les descripteurs structuraux locaux, qui seront ensuite comparés à l'aide des techniques présentées en section 2.2.

## 2.1 Descripteurs structuraux locaux

La configuration spatiale d'un acide aminé donné est décrite à l'aide des angles dièdres,  $\phi$  et  $\psi$  [5, 25], définis à l'aide de la figure 2. Alors que les valeurs de  $(\phi, \psi)$  sont physiquement restreintes pour les protéines rigides, elles présentent une grande variabilité pour les PID. Pour une protéine flexible, la paire  $(\phi, \psi)$  peut donc être modélisée par une variable aléatoire à valeurs dans le tore plat bidimensionnel  $\mathbb{T}^2$ , qui est le produit cartésien d'une paire de cercles unitaires. La loi de probabilité de  $(\phi, \psi)$  sera appelée le *descripteur structural local* de l'acide aminé.



L'analyse structurale des ensembles conformationnels doit reposer sur une base solide concernant la manière dont la séquence influence la structure des acides aminés. L'hypothèse de la paire isolée de Flory [11], qui affirme que les angles  $(\phi, \psi)$  d'un acide aminé donné sont indépendants de l'identité de ses voisins, a déjà été largement réfutée [6, 27, 28, 21]. Cependant, une question importante reste sans réponse : les effets des voisins de gauche et de droite sont-ils indépendants ? Dans [13], nous définissons une procédure de test statistique qui démontre la significativité des effets couplés des voisins de gauche et de droite, indiquant qu'ils ne peuvent pas être considérés indépendamment l'un de l'autre.



**FIGURE 2** — Détermination des angles de torsion  $\phi$  et  $\psi$ . Chaque liaison peptidique (en orange) comprend six atomes. Comme l'angle de rotation autour de la liaison peptidique est de  $0^\circ$  ou  $180^\circ$ , ces six atomes sont disposés dans un même plan (en jaune). Les deux plans associés à l' $i$ -ème acide aminé décrivent entièrement sa conformation. L'angle  $\phi$  (resp.  $\psi$ ) détermine la rotation du plan à gauche (resp. à droite) autour de la liaison  $N - C_\alpha$  (resp.  $C_\alpha - C$ ).

## 2.2 Transport Optimal pour comparer des structures locales

Notons par  $P, Q$  les descripteurs structuraux locaux de deux acides aminés donnés. Nous noterons par  $\mathcal{P}(\mathbb{T}^2)$  l'espace des distributions de probabilités supportées sur  $\mathbb{T}^2$ . Pour comparer  $P$  et  $Q$  de manière appropriée, il faut d'abord choisir une distance dans  $\mathcal{P}(\mathbb{T}^2)$  bien adaptée à l'espace. Certaines distances classiques, comme la distance en variation totale, la distance de Hellinger ou la distance  $L^2$ , ne sont pas appropriées dans ce contexte car elles ignorent la géométrie de  $\mathbb{T}^2$ , ce qui peut conduire à des comparaisons trompeuses. On propose d'utiliser la distance de Wasserstein, issue de la théorie du Transport Optimal, qui intègre efficacement la périodicité de l'espace conformationnel.

### Transport Optimal et distance de Wasserstein

Le Transport Optimal (TO) est un cas spécifique de transport de masse, qui est le problème général de faire correspondre deux distributions de probabilité à travers une loi de probabilité jointe, qu'on appelle *couplage*. Le TO est devenu un outil populaire pour définir de tels couplages en sélectionnant ceux qui minimisent un certain coût, souvent choisi comme étant la distance géodésique de l'espace sous-jacent. Dans ce contexte, le problème de TO entre  $P$  et  $Q$  consiste à quantifier l'infimum

$$\inf_{\gamma \in \Pi(P, Q)} \int_{\mathbb{T}^2 \times \mathbb{T}^2} d_{\mathbb{T}^2}(x, y) d\gamma(x, y), \quad (1)$$

où  $\Pi(P, Q)$  dénote l'ensemble de couplages de  $P$  et  $Q$  et  $d_{\mathbb{T}^2}$  la distance géodésique sur  $\mathbb{T}^2$ . Les valeurs de (1) nous intéressent particulièrement car elles définissent une distance dans  $\mathcal{P}(\mathbb{T}^2)$  [31]. Plus précisément, pour  $q \geq 1$ , la valeur optimale

$$\mathcal{W}_q(P, Q) = \left( \inf_{\gamma \in \Pi(P, Q)} \int_{\mathbb{T}^2 \times \mathbb{T}^2} d_{\mathbb{T}^2}^q(x, y) d\gamma(x, y) \right)^{\frac{1}{q}} \quad (2)$$

est appelée la *q-distance de Wasserstein* entre  $P$  et  $Q$  et représente le coût minimum de transport nécessaire pour reconfigurer la masse de probabilité de  $P$  afin de récupérer celle de  $Q$ . Notons que la distance de Wasserstein est capable d'intégrer la géométrie de l'espace conformationnel via  $d_{\mathbb{T}^2}$ . Cela en fait une métrique bien adaptée pour comparer une paire de descripteurs structuraux locaux.

Quand, en pratique, on n'a accès qu'à des échantillons  $\{(\phi_1, \psi_1)_i\}_{i=1}^n$  et  $\{(\phi_2, \psi_2)_j\}_{j=1}^m$  tirés selon  $P$  et  $Q$  respectivement, on considère la distance de Wasserstein entre les mesures empiriques, définies par :

$$P_n(A) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbb{1}_A\{(\phi_1, \psi_1)_i\}, \quad Q_m(A) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \mathbb{1}_A\{(\phi_2, \psi_2)_j\},$$

où  $A$  est un sous-ensemble mesurable de  $\mathbb{T}^2$  et  $\mathbb{1}_A\{\cdot\}$  est sa fonction indicatrice. La distance  $\mathcal{W}_q(P_n, Q_m)$  présente de solides garanties statistiques, comme la convergence faible vers la distance  $\mathcal{W}_q(P, Q)$  quand  $n, m \rightarrow \infty$  [31, Corollaire 6.9].



L'étude du Transport Optimal dans  $\mathbb{T}^2$  n'a pas encore été complètement traitée. Dans [16], nous étendons les principaux résultats de cette théorie au tore de dimension arbitraire  $\mathbb{T}^d$ . En particulier, nous montrons l'unicité sous des hypothèses modérées de la solution de (1) dans  $\mathcal{P}(\mathbb{T}^d)$  et nous dérivons un Théorème Central Limite pour les fluctuations de la distance de Wasserstein empirique.

### Significativité statistique de la distance

Une fois la distance mesurée entre deux descripteurs empiriques  $P_n$  et  $Q_m$ , il est nécessaire de déterminer si la différence observée est significative. En d'autres termes, si nous disposons de suffisamment d'évidence statistique pour affirmer que la distance entre les vraies mesures  $P$  et  $Q$  est différente de zéro. Cela revient à tester les hypothèses suivantes :

$$H_0 : P = Q \quad \text{vs.} \quad H_1 : P \neq Q. \quad (3)$$

La stratégie pour construire un test pour évaluer (3) doit reposer sur le rejet de l'hypothèse nulle, i.e.  $H_0$ , lorsque la distance de Wasserstein entre  $P_n$  et  $Q_m$  est « trop grande » ou, en d'autres termes, trop improbable sous  $H_0$ . Cela est mesuré via la *p-valeur* associée à la paire d'échantillons, qui agit comme un indicateur de leur plausibilité sous l'hypothèse nulle. Pour la calculer, il faut connaître la loi de  $\mathcal{W}_q(P_n, Q_m)$  sous  $H_0$  et la comparer à la distance  $w_{nm}$  entre les échantillons. Plus précisément, la *p-valeur* est donnée par  $\mathbb{P}_{H_0}(\mathcal{W}_q(P_n, Q_m) \geq w_{nm})$ . Une *p-valeur* grande indique que  $w_{nm}$  est très probable sous  $H_0$ . Dans ce cas, il n'y a pas suffisamment de preuves contre l'hypothèse nulle et  $H_0$  ne doit pas être rejetée. En revanche, le rejet de  $H_0$  doit être envisagé si la *p-valeur* est petite.

Malheureusement, la détermination de la loi de  $\mathcal{W}_q(P_n, Q_m)$  sous  $H_0$  demeure un problème ouvert en dimension 2. Cette difficulté nous a conduit à chercher des approches alternatives qui exploitent les scénarios où une distance de Wasserstein à loi connue peut être définie. Dans [16], nous proposons deux stratégies à cet égard, que l'on décrit dans les paragraphes suivants.

### Tests basés sur la distance de Wasserstein

La première approche consiste à contourner le problème de dimension en projetant  $P_n$  et  $Q_m$  sur les géodésiques fermées de  $\mathbb{T}^2$ , qui sont des spirales fermées isomorphes au cercle  $S^1$  [4]. Ensuite, l'égalité des projections est testée à l'aide de la 2-distance de Wasserstein sur  $S^1$ . Plus précisément, notons  $P_n^c$  et  $Q_m^c$  les projections de  $P_n$  et  $Q_m$  sur une géodésique fermée de  $\mathbb{T}^2$ . Si on paramétrise  $S^1$  comme l'intervalle périodique  $[0, 1)$ , on peut considérer les fonctions de répartition de  $P_n^c$  et  $Q_m^c$ , données par :

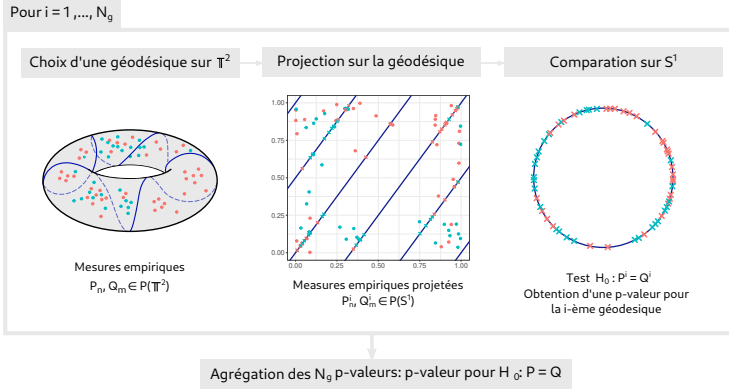
$$F_n(t) = P_n^c([0, t)) \quad \text{et} \quad G_m(t) = Q_m^c([0, t)), \quad \forall t \in [0, 1),$$

respectivement. Sous  $H_0$ ,  $G_m^{-1}(F_n)$  converge uniformément vers la fonction de répartition d'une loi Uniforme sur  $S^1$ . Par conséquent, nous dérivons la loi sous  $H_0$  de la 2-distance de Wasserstein entre  $G_m^{-1}(F_n)$  et la loi Uniforme sur  $S^1$ , ce qui permet de définir un test pour comparer la paire de projections géodésiques. La stratégie pour définir une  $p$ -valeur pour le test bidimensionnel est illustrée dans la figure 3. Tout d'abord, on choisit (aléatoirement<sup>2</sup>) une famille de  $N_g$  géodésiques fermées sur  $\mathbb{T}^2$ . Pour chaque géodésique, on projette  $P_n$  et  $Q_m$  et on obtient une  $p$ -valeur pour l'égalité de leurs projections. Finalement, on montre que le minimum des  $N_g$   $p$ -valeurs corrigées par la méthode de Bonferroni [3] est une  $p$ -valeur bien définie pour (3).

La deuxième approche vise à comparer directement les descripteurs structuraux dans  $\mathbb{T}^2$ . À cause de la difficulté à construire un test exact ou asymptotique basé sur  $\mathcal{W}_q(P_n, Q_m)$ , nous proposons de trouver une borne supérieure pour sa  $p$ -valeur associée. Notons qu'une borne supérieure d'une  $p$ -valeur est aussi une  $p$ -valeur pour  $H_0$ . En effet, si la borne supérieure est très petite, il en ira de même pour la vraie (et inconnue)  $p$ -valeur et la plausibilité des échantillons sous  $H_0$  sera limitée. Cependant, si la borne supérieure n'est pas très précise, des distances très importantes seront nécessaires pour que la borne atteigne des valeurs faibles. Bien que ce type d'approche puisse avoir des difficultés à détecter des signaux faibles, il s'avère utile dans des contextes où les tailles d'échantillons sont extrêmement grandes, comme c'est le cas de certains ensembles de protéines simulés par dynamique moléculaire, qui peuvent comporter jusqu'à  $10^5$  conformations.

Pour obtenir une borne, l'idée est d'abord de majorer les écarts de  $\mathcal{W}_2^2(P_n, Q_m)$  par rapport à son espérance, puis de montrer que, sous l'hypothèse nulle, cette

2. Comme les géodésiques fermées sur  $\mathbb{T}^2$  sont données par les projections canoniques des droites de  $\mathbb{R}^2$  ayant une pente rationnelle, échantillonner l'ensemble de toutes les géodésiques fermées revient à échantillonner dans  $\mathbb{Q}$ , qui est un ensemble dénombrable. Cela empêche l'échantillonnage d'être uniforme et des approches alternatives doivent être explorées [16].



**FIGURE 3** — Illustration de la première procédure proposée pour tester (3) basée sur la projection géodésique sur  $\mathbb{T}^2$ . Les géodésiques fermées sur  $\mathbb{T}^2$  correspondent aux droites de pente rationnelle sur le carré périodique  $\mathbb{R}^2/\mathbb{Z}^2$ .

espérance présente un taux de convergence rapide vers zéro. Par conséquent, pour tout  $\varepsilon > 0$ , il existe un  $N_\varepsilon \in \mathbb{N}$  tel que, pour tout  $n, m \geq N_\varepsilon$ , on peut borner la  $p$ -valeur par :

$$\mathbb{P}_{H_0} \left( \mathcal{W}_2^2(P_n, Q_m) > w_{nm} \right) \leq \exp \left( -\frac{nm}{n+m} 8(w_{nm} - \varepsilon)^2 \right). \quad (4)$$

Pour un  $\varepsilon > 0$  fixé, on montre dans [16] comment la borne supérieure (4) définit un test pour (3) valide dans la limite  $n, m \rightarrow \infty$ .

Les méthodes de test décrites précédemment peuvent être utilisées dans divers contextes pour évaluer la significativité des effets structuraux à niveau local. Dans [18], la deuxième technique proposée est utilisée pour étudier les changements dans la structure locale lorsqu'un ensemble de PID est simulé avec différents champs de force. Dans le même travail, nous étudions aussi l'effet à l'échelle locale du raffinement de simulations à l'aide de données expérimentales. L'approche de test basée sur les projections géodésiques est utilisée dans [17] pour démontrer que l'identité du codon synonyme n'a pas d'influence significative sur la structure locale de l'acide aminé codé.

## 3 Analyse structurale globale des protéines flexibles

L'analyse structurale des protéines flexibles devient beaucoup plus complexe lorsqu'elle est effectuée à un niveau global, c'est-à-dire, en considérant des séquences entières. Dans ce contexte, bien que la comparaison d'ensembles soit un enjeu essentiel<sup>3</sup>, le véritable défi consiste à fournir une caractérisation compacte de la variabilité structurelle d'un ensemble. Cela permettrait, par exemple, d'explorer la définition de méthodes de prédiction de structure à partir de la séquence adaptées aux PID. Dans cette section, nous présentons le problème de la caractérisation globale d'ensembles de protéines flexibles et montrons comment apporter des garanties statistiques aux techniques les plus courantes.

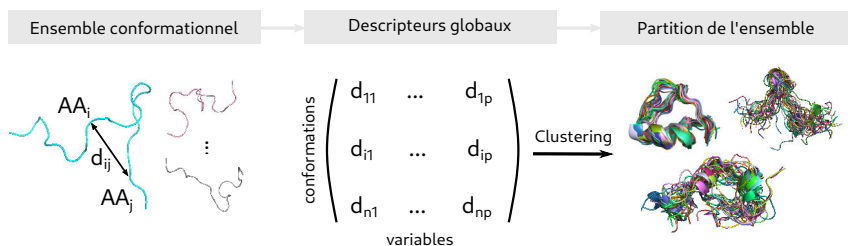
### 3.1 Le problème de caractérisation

Les ensembles conformationnels de protéines flexibles présentent une grande variabilité structurelle. Pour explorer la totalité de l'espace conformationnel, les méthodes de simulation produisent un nombre très élevé de conformations ( $10^4$ - $10^5$ ). Afin de caractériser de manière compacte l'information structurelle, l'une des approches prédominantes consiste à partitionner l'ensemble en clusters représentatifs, résumant ainsi sa variabilité structurelle. Dans ce contexte, le premier point à creuser est le choix d'un descripteur bien adapté qui permette de classer les conformations dans l'ensemble. Jusqu'à présent, la plupart des méthodes dans la littérature utilisent des descripteurs basés sur les coordonnées des atomes dans la séquence. En particulier, le vecteur des distances euclidiennes entre toutes les paires d'acides aminés a été largement adopté pour caractériser les ensembles de protéines [22, 1, 8]. Cette stratégie est illustrée dans la figure 4.

La classification des conformations basée sur les distances présente un avantage fondamental : ce type de descripteurs continus s'adapte bien à l'hypothèse de normalité. Cela facilite considérablement l'analyse statistique des partitions, en particulier l'évaluation des différences entre les groupes. Cette technique, connue sous le nom d'*inférence post-clustering*, est présentée dans la section suivante, où nous montrons comment elle peut être appliquée pour fournir des garanties statistiques lors de la caractérisation d'ensembles de PID.

---

3. Dans [18], nous avons montré pour la première fois comment la distance de Wasserstein peut être utilisée de manière efficace pour expliquer et quantifier les différences globales entre ensembles, surpassant les techniques basées sur des descripteurs moyennés qui dominaient l'état de l'art.



**FIGURE 4** — Illustration de l'une des techniques prédominantes de caractérisation des ensembles, où chaque conformation est décrite par le vecteur des distances euclidiennes entre toutes les paires d'acides aminés dans la séquence. La partition rendue par un clustering sur les distances est utilisée pour caractériser l'ensemble.



La classification basée sur les distances tend à générer des clusters qui regroupent les conformations avec des formes globales similaires. Par conséquent, ces approches ignorent les interactions locales qui se produisent dans des états peu fréquents et manquent les motifs plus fins qui contribuent à la variabilité structurale de l'ensemble. Une caractérisation mieux adaptée devrait classer les conformations en fonction de comment les interactions entre acides aminés se manifestent dans la dynamique de la protéine. Cette idée est discutée dans [14], où nous présentons une nouvelle méthode de caractérisation qui reflète plus fidèlement la variabilité structurale des ensembles de PID et qui est capable de détecter les états de très faible fréquence à partir des interactions locales dans la séquence.

### 3.2 Inférence post-clustering pour évaluer la caractérisation

Les algorithmes de clustering ont pour but d'identifier des classes qui représentent de manière compacte la distribution des données. Cependant, ces groupes ne sont pas inhérents à la population et ne servent que de description de l'échantillon. En effet, il n'y a pas de vraie classification sous-jacente en général [9]. Afin d'éclairer cette question, nous cherchons à évaluer les véritables différences entre les groupes. Plus précisément, nous cherchons à tester si deux clusters ont la même moyenne. Par contre, si les mêmes données sont utilisées pour classifier les observations et pour l'étape de test subséquente, les garanties statistiques ne sont pas assurées [10]. En conséquence, les techniques d'inférence classiques doivent être adaptées pour tenir compte du fait que l'hypothèse à tester dépend des données. Ceci constitue l'objectif de l'*inférence post-clustering*.

### Inférence post-clustering sous indépendance

La grande majorité des travaux à ce jour considère que les données suivent le modèle de matrice normale suivant [19] :

$$\mathbf{X} \sim \mathcal{M}\mathcal{N}_{n \times p}(\boldsymbol{\mu}, \mathbf{I}_n, \sigma^2 \mathbf{I}_p), \quad (5)$$

où  $\mathbf{X}$  est une matrice de dimension  $n \times p$  dont les lignes sont des vecteurs gaussiens  $p$ -dimensionnels. Les moyennes de ces vecteurs sont données par les lignes de la matrice  $\boldsymbol{\mu}$ , la matrice identité  $n \times n$  tient compte de l'indépendance des observations et  $\sigma^2 \mathbf{I}_p$  est la matrice de covariance des variables pour chaque ligne. Si on note par  $\hat{C}_1, \hat{C}_2 \subset \{1, \dots, n\}$  deux groupes d'observations disjoints, nous cherchons à tester si les moyennes des deux groupes,

$$\bar{\mu}_1 = \frac{1}{|\hat{C}_1|} \sum_{i \in \hat{C}_1} \mu_i \quad \text{et} \quad \bar{\mu}_2 = \frac{1}{|\hat{C}_2|} \sum_{i \in \hat{C}_2} \mu_i,$$

sont les mêmes, où  $\mu_i$  est la  $i$ -ème ligne de  $\boldsymbol{\mu}$ . Lorsque  $\hat{C}_1$  et  $\hat{C}_2$  ont été choisis par un algorithme de clustering  $\mathcal{E}$ , ce que nous noterons par  $\hat{C}_1, \hat{C}_2 \in \mathcal{E}(\mathbf{X})$ , l'hypothèse à tester,

$$H_0^{\{\hat{C}_1, \hat{C}_2\}} : \bar{\mu}_1 = \bar{\mu}_2, \quad (6)$$

dépend des données. Pour en tenir compte, la majorité des travaux ont recours à ce que l'on appelle des *approches conditionnelles*, qui consistent à définir la  $p$ -valeur comme un indicateur de la plausibilité de (6), sachant que les groupes ont été estimés par l'algorithme. Plus précisément, la  $p$ -valeur est donnée par :

$$\mathbb{P}_{H_0^{\{\hat{C}_1, \hat{C}_2\}}} \left( T(\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2) \geq t \mid \hat{C}_1, \hat{C}_2 \in \mathcal{E}(\mathbf{X}) \right), \quad (7)$$

où  $T$  est une distance entre les moyennes et  $t$  sa valeur obtenue pour une réalisation de  $\mathbf{X}$ .

Les principales difficultés dans ce contexte sont (i) de calculer efficacement une  $p$ -valeur de type (7) et (ii) de rendre ce calcul compatible avec une estimation du paramètre  $\sigma$  dans (5). Récemment, Gao *et al.* ont proposé une solution efficace à ce problème dans [12]. En choisissant  $T$  comme étant la distance euclidienne, les auteurs ont défini une  $p$ -valeur qui intègre la condition  $\hat{C}_1, \hat{C}_2 \in \mathcal{E}(\mathbf{X})$ . De plus, ils ont montré que remplacer  $\sigma$  par un surestimateur asymptotique maintient les garanties statistiques de la  $p$ -valeur, fournissant un estimateur approprié qui peut être utilisé en pratique.

Bien que la contribution de [12] soit très pertinente d'un point de vue statistique, son application à des problèmes réalistes reste limitée. En effet, le modèle

(5) assume que les variables sont indépendantes et ont une variance égale, ce qui est très improbable en pratique. C'est notamment le cas des descripteurs souvent utilisés dans la caractérisation d'ensembles (les distances euclidiennes entre tous les acides aminés le long de la séquence). Même si ces quantités peuvent être considérées comme des vecteurs gaussiens, leur forte corrélation nous empêche d'assumer (5). Par conséquent, un modèle admettant des structures de dépendance entre les variables (et, idéalement, les observations) est requis dans ce cadre.

### Inférence post-clustering sous dépendance

Dans [15], nous étendons le cadre présenté dans [12] au modèle de matrice normale général

$$\mathbf{X} \sim \mathcal{M}\mathcal{N}_{n \times p}(\boldsymbol{\mu}, \mathbf{U}, \Sigma), \quad (8)$$

où  $\mathbf{U}$  code la dépendance entre les observations et  $\Sigma$  la covariance entre les variables. En choisissant  $T$  comme la distance de Mahalanobis [26], nous définissons une  $p$ -valeur qui intègre la condition  $\hat{C}_1, \hat{C}_2 \in \mathcal{C}(\mathbf{X})$  et qui peut être calculée de manière efficace. De plus, nous généralisons la surestimation de  $\sigma$  au cadre matriciel, montrant qu'il existe un ordre partiel - l'ordre partiel de Loewner [19] - dans l'espace des matrices hermitiennes pour lequel la surestimation asymptotique de  $\Sigma$  respecte les garanties statistiques de la  $p$ -valeur. Nous fournissons également un estimateur de  $\Sigma$  qui peut être utilisé en pratique sous certaines hypothèses, que nous montrons être satisfaites pour plusieurs modèles courants de dépendance entre les observations. Enfin, nous montrons comment la méthode peut être appliquée pour évaluer le clustering de données réelles d'ensembles de protéines flexibles dont les conformations sont caractérisées par des vecteurs de distances.

### Remerciements

Je remercie Alain Blaustein et David Coupier pour leur lecture détaillée et leurs commentaires avisés, qui ont substantiellement contribué à l'amélioration de cet article.

### Références

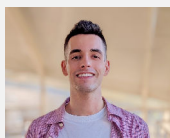
- [1] Rajeswari APPADURAI, Jaya Krishna KONERU, Massimiliano BONOMI, Paul ROBUSTELLI et Anand SRIVASTAVA. « Clustering Heterogeneous Conformational Ensembles of Intrinsically Disordered Proteins with t-Distributed

- Stochastic Neighbor Embedding ». In : *Journal of Chemical Theory and Computation* (2023).
- [2] Helen M. BERMAN. « The Protein Data Bank ». In : *Nucleic Acids Research* 28.1 (2000), p. 235-242.
- [3] Carlo E. BONFERRONI. *Teoria statistica delle classi e calcolo delle probabilità*. Pubblicazioni del R. Istituto superiore di scienze economiche e commerciali di Firenze. Libreria internazionale Seeber, 1936.
- [4] William M. BOOTHBY. *An Introduction to Differentiable Manifolds and Riemannian Geometry*. Pure and Applied Mathematics. Academic Press, London, 1975.
- [5] Carl BRÄNDÉN et John TOOZE. *Introduction to Protein Structure (2nd ed.)* New York : Garland Science, 1998.
- [6] Daniel BRAUN, Gerhard WIDER et Kurt WUETHRICH. « Sequence-Corrected  $^{15}\text{N}$  “Random Coil” Chemical Shifts ». In : *J. Am. Chem. Soc.* 116.19 (1994), p. 8466-8469.
- [7] Ilinka CLERC et al. « The diversity of molecular interactions involving intrinsically disordered proteins : A molecular modeling perspective ». In : *Computational and Structural Biotechnology Journal* 19 (2021), p. 3817-3828.
- [8] Anja CONEV et al. « EnGens : a computational framework for generation and analysis of representative protein conformational ensembles ». In : *Briefings in Bioinformatics* 24.4 (2023), bbad242.
- [9] Vladimir ESTIVILL-CASTRO. « Why so many clustering algorithms ». In : *ACM SIGKDD Explorations Newsletter* 4.1 (2002), p. 65-75.
- [10] William FITHIAN, Dennis SUN et Jonathan TAYLOR. *Optimal Inference After Model Selection*. arXiv:1410.2597. 2017.
- [11] Paul. J. FLORY et M. VOLKENSTEIN. « Statistical mechanics of chain molecules ». In : *Biopolymers* 8.5 (1969), p. 699-700.
- [12] Lucy L. GAO, Jacob BIEN et Daniela WITTEN. « Selective Inference for Hierarchical Clustering ». In : *Journal of the American Statistical Association* 0.0 (2022), p. 1-11.
- [13] Javier GONZÁLEZ-DELGADO, Pau BERNADÓ, Pierre NEUVIAL et Juan CORTÉS. « Statistical proofs of the interdependence between nearest neighbor effects on polypeptide backbone conformations ». In : *Journal of Structural Biology* 214.4 (2022), p. 107907.

- [14] Javier GONZALEZ-DELGADO, Pau BERNAD, Pierre NEUVIAL et Juan CORTS. « Weighted families of contact maps to characterize conformational ensembles of (highly-)flexible proteins ». In : *Bioinformatics* 40.11 (2024), btae627.
- [15] Javier GONZÁLEZ-DELGADO, Juan CORTÉS et Pierre NEUVIAL. *Post-clustering Inference under Dependency*. arXiv:2310.11822. 2023.
- [16] Javier GONZÁLEZ-DELGADO, Alberto GONZÁLEZ-SANZ, Juan CORTÉS et Pierre NEUVIAL. « Two-sample goodness-of-fit tests on the flat torus based on Wasserstein distance and their relevance to structural biology ». In : *Electronic Journal of Statistics* 17.1 (2023), p. 1547-1586.
- [17] Javier GONZALEZ-DELGADO, Pablo MIER, Pau BERNAD, Pierre NEUVIAL et Juan CORTS. « The dependence of the amino acid backbone conformation on the translated synonymous codon is not statistically significant ». In : *bioRxiv* (2024), p. 2022.11.29.518303.
- [18] Javier GONZALEZ-DELGADO et al. « WASCO : A Wasserstein-based Statistical Tool to Compare Conformational Ensembles of Intrinsically Disordered Proteins ». In : *J. Mol. Biol.* 435.14 (2023), p. 168053.
- [19] R.A. HORN et C.R. JOHNSON. *Matrix Analysis*. Matrix Analysis. Cambridge University Press, 2013. ISBN : 9780521839402.
- [20] Malene Ringkjøbing JENSEN, Markus ZWECKSTETTER, Jie-rong HUANG et Martin BLACKLEDGE. « Exploring Free-Energy Landscapes of Intrinsically Disordered Proteins at Atomic Resolution Using NMR Spectroscopy ». In : *Chemical Reviews* 114.13 (2014), p. 6632-6660.
- [21] Young-Sang JUNG, Kwang-Im OH, Geum-Sook HWANG et Minhaeng CHO. « Neighboring Residue Effects in Terminally Blocked Dipeptides : Implications for Residual Secondary Structures in Intrinsically Unfolded/Disordered Proteins ». In : *Chirality* 26.9 (2014), p. 443-452.
- [22] Tamas LAZAR et al. « Distance-Based Metrics for Comparing Conformational Ensembles of Intrinsically Disordered Proteins ». In : *Biophys J* 118.12 (2020), p. 2952-2965.
- [23] Tamas LAZAR et al. « PED in 2021 : a major update of the protein ensemble database for intrinsically disordered proteins ». In : *Nucleic Acids Research* 49.D1 (2020), p. D404-D411.
- [24] Robin van der LEE et al. « Classification of Intrinsically Disordered Regions and Proteins ». In : *Chemical Reviews* 114.13 (2014), p. 6589-6631.
- [25] Anders LILJAS et al. *Textbook Of Structural Biology*. Singapore : World Scientific Publishing, 2009.

- [26] P. MAHALANOBIS. « On the generalized distance in statistics ». In : *Proc. Nat. Inst. Sci. India (Calcutta)* 2 (1936), p. 44-55.
- [27] Christopher J PENKETT et al. « NMR analysis of main-chain conformational preferences in an unfolded fibronectin-binding protein ». In : *J. Mol. Biol.* 274.2 (1997), p. 152-159.
- [28] Reinhard SCHWEITZER-STENNER et Siobhan E. TOAL. « Anticooperative nearest-neighbor interactions between residues in unfolded peptides and proteins ». In : *Biophys. J.* 114.5 (2018), p. 1046-1057.
- [29] Peter TOMPA. « Intrinsically unstructured proteins ». In : *Trends in Biochemical Sciences* 27.10 (2002), p. 527-533.
- [30] Vladimir N. UVERSKY et al. « Pathological Unfoldomics of Uncontrolled Chaos : Intrinsically Disordered Proteins and Human Diseases ». In : *Chemical Reviews* 114.13 (2014), p. 6844-6879.
- [31] C. VILLANI. *Optimal Transport : Old and New*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

## Javier GONZÁLEZ-DELGADO



Javier GONZÁLEZ-DELGADO a effectué sa thèse sous la direction de Pierre Neuvial et Juan Cortés à l'Institut de Mathématiques de Toulouse et au LAAS-CNRS. Il a ensuite travaillé comme chercheur postdoctoral à l'Université de McGill. Maintenant, il est professeur assistant à l'ENSAI. Ses travaux portent sur le développement de méthodes d'inférence statistique pour la résolution de problèmes en biologie.

**Email :** [javier.gonzalez-delgado@ensai.fr](mailto:javier.gonzalez-delgado@ensai.fr)

**Site web :** <https://gonzalez-delgado.github.io/>

# World-class mathematics journals from SMAI and EDP Sciences – transitioning to open access

edp sciences

SMAI  
société de mathématiques  
appliquées et industrielles



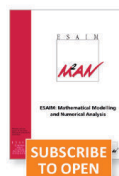
## ESAIM: Control, Optimisation and Calculus of Variations

SMAI

ESAIM: COCV publishes papers and surveys in the areas of Control, Optimisation, and Calculus of Variations. Articles may be theoretical and/or computational and cover topical subjects.

[esaim-cocv.org](http://esaim-cocv.org)

SUBSCRIBE TO OPEN



## ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis

SMAI

ESAIM: M2AN publishes original research papers in Mathematical Modelling and Numerical Analysis providing rigorous theoretical analysis and evidence of computational relevance.

[esaim-m2an.org](http://esaim-m2an.org)

SUBSCRIBE TO OPEN



## ESAIM: Probability and Statistics

SMAI

ESAIM: P&S publishes original research and survey papers in Probability and Statistics. It covers theoretical and practical aspects and methodological developments with applications.

[esaim-ps.org](http://esaim-ps.org)

SUBSCRIBE TO OPEN



## RAIRO – Operations Research

SMAI

RAIRO – RO is an international journal of high-level pure and applied research on Operations Research. It includes theory and methodology papers, case studies and state-of-the art surveys.

[rairo-ro.org](http://rairo-ro.org)

SUBSCRIBE TO OPEN



## Mathematical Modelling of Natural Phenomena

SMAI

MMNP publishes original and review papers on Mathematical Modelling in biology, medicine, chemistry, physics, and other areas in the context of real world problems.

[mmnp-journal.org](http://mmnp-journal.org)

The first mathematics journal in the world to transition to open access using Subscribe to Open!

SUBSCRIBE TO OPEN

Also from la Société de Mathématiques Appliquées et Industrielles (SMAI)

SMAI

Also from EDP Sciences

edp sciences



## ESAIM: Proceedings and Surveys

ESAIM: PROCS publishes review articles and proceedings in all areas of applied mathematics. It has been open access from the beginning.

[esaim-proc.org](http://esaim-proc.org)



## RAIRO – Theoretical Informatics and Applications

RAIRO – ITA publishes original high-level research papers in the area of theoretical computer science and its applications including game theory, quantum computation, cryptography.

[rairo-ita.org](http://rairo-ita.org)

SUBSCRIBE TO OPEN

All the journals are published by EDP Sciences in partnership with SMAI except for *RAIRO – Theoretical Informatics and Applications*

# Entretien croisé : Anne Canteaut & Karine Chemla

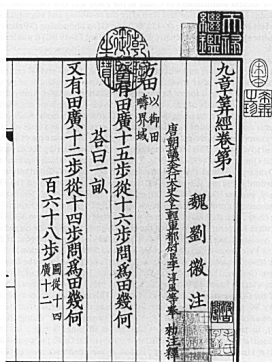
par :

Anne CANTEAUT<sup>1</sup> — Directrice de recherche, Inria

Karine CHEMLA<sup>2</sup> — Directrice de recherche émérite,  
CNRS & University of Edinburgh

Anne Canteaut et Karine Chemla sont respectivement cryptographe et historienne des mathématiques. Il y a peu près un an, elles entraient à l'Académie des Sciences. Nous avons voulu en savoir plus sur leurs domaines respectifs et leur place particulière vis-à-vis des mathématiques. Dans cet entretien, elles retracent leurs parcours, décrivent leurs méthodes et leurs communautés par le biais d'expériences vécues, d'anecdotes significatives.

► **Matapli** : Qu'est-ce qui vous a poussé vers vos domaines, l'histoire des maths en Chine ancienne et la cryptographie ? Il n'y a pas de filière vraiment dédiée à ce genre de disciplines.



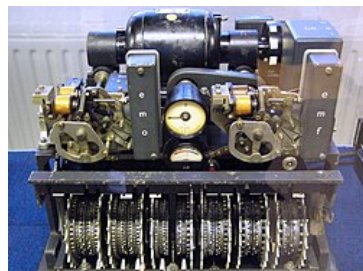
► **Karine Chemla** : Quand j'ai commencé une thèse, il n'y avait de filière ni en histoire des sciences, ni en histoire des maths. Tout cela n'existait pas. Dans ma génération, on s'est tous formés sur le tas. Voilà comment ça s'est passé pour moi : je commence une thèse de maths et un mois plus tard, la directrice de mon école m'appelle en me disant « il y a des bourses de voyage lointain de la Fondation Singer-Polignac. J'ai pensé que vous pourriez faire un projet. » Ce n'était pas du tout ce que j'avais prévu, mais suite à son coup de fil, j'ai réfléchi et je lui ai répondu que j'allais faire un projet sciences et culture en Chine. Le visa m'a été

1. [anne.canteaut@inria.fr](mailto:anne.canteaut@inria.fr)

2. [chemla@univ-paris-diderot.fr](mailto:chemla@univ-paris-diderot.fr)

refusé. Mais la bourse m'avait été octroyée. Et donc, j'ai inventé que j'allais étudier l'histoire des maths en Chine; l'Institut d'histoire des sciences de la nature, de l'Académie des Sciences de Chine, m'a acceptée comme étudiante, et l'ambassade m'a donné le visa. En arrivant, on m'a présenté cinq chercheurs comme profs. J'ai pu ainsi être formée à l'histoire des maths en Chine. Je devais revenir ensuite à ma thèse de maths quand le hasard a poussé Jean-Pierre Bourguignon à Pékin. L'ambassade lui avait dit que j'y étais. Il m'a contactée pour me faire savoir que le rapport de prospective du CNRS en maths prévoyait de développer l'histoire des maths. Mais il a tout de suite ajouté : « Il faut une thèse! Vous pouvez publier ce que vous faites en Chine comme article, mais il faut une thèse! » L'idée au début, c'était de repasser à ma thèse de maths, en faisant au passage un article sur ce que j'avais fait en Chine. Cet article, qui atteignait alors que j'étais encore en Chine les 90 pages, est finalement devenu ma thèse, une thèse de maths sur un traité chinois du XIII<sup>e</sup> siècle. C'est ainsi que j'ai complètement « shifté » et ai été recrutée par le CNRS dans la foulée, pour faire l'histoire des maths en Chine.

► **Anne Canteaut** : Moi, c'est aussi le fruit du hasard et d'itérations. C'est arrivé un tout petit peu plus tôt que Karine, puisque pour moi, c'est à l'époque du DEA que j'ai bifurqué. En cryptographie, il commençait à y avoir une formation, un DEA de cryptographie à Limoges notamment... Pour autant, je n'ai pas du tout fait ça. J'étais en école d'ingénieurs en ayant atterri là comme beaucoup de bons élèves, sans trop savoir pourquoi j'étais là. J'aimais les maths et la seule chose claire pour moi, c'était que je ne voulais pas faire d'informatique, vraiment pas. De façon concomitante, en école d'ingénieurs, j'ai découvert cette discipline. Et là, je me suis dit : « mais l'informatique, c'est une science! Pourquoi on ne m'a pas expliqué cela avant? » En même temps, j'ai fait un projet sur les surfaces minimales en dimension sept au labo de maths de l'X. La deuxième prise de conscience fut que je n'étais pas du tout faite pour ça. Ça avait un côté trop abstrait, j'avais un besoin de manipuler les objets, ce qui est difficile en dimension sept! L'informatique me donnait ce pouvoir magique de manipuler des objets, de mieux comprendre. Et donc, ces deux découvertes parallèles ont fait que j'ai été attirée par un domaine dans lequel l'informatique et les maths que j'aimais — l'algèbre — étaient assez intriquées. J'ai trouvé une bourse de thèse assez facilement, mais il faut bien dire que quand je suis arri-



vée en thèse de cryptographie, je n'y connaissais rien (j'avais juste eu quelques heures de cours, dix heures tout au plus, de cryptographie en dernière année d'école d'ingénieurs). C'est un point commun avec Karine. Je le dis souvent car quand je vois l'exigence qu'on a sur nos choix d'étudiants en thèse, je me dis que je ne me prendrais pas en thèse. Je pense que j'ai eu de la chance, je suis tombée sur des gens ouverts.

► **Matapli : De quel résultat êtes-vous les plus fières ?**

► **A. C. :** C'est difficile de dire de quel travail on est la plus fière... Ce n'est pas forcément celui qui a été le plus difficile, celui qui a pris le plus de temps, celui qui exigé le plus d'efforts... Je dirais que la chose que les gens peuvent retenir, dont je suis assez fière, c'est qu'avec d'autres, j'ai contribué à formaliser certaines manières d'attaquer des systèmes cryptographiques : je suis dans un domaine de la cryptographie, qui est, *a priori*, moins mathématisé que d'autres, qui reposent sur la factorisation, le logarithme discret, et de notions très proches de la théorie des nombres. Je suis dans un domaine qui s'appelle la cryptographie symétrique, vraiment dans la lignée des codes secrets, la crypto où les deux interlocuteurs partagent un secret, puis ils utilisent ce secret pour s'échanger des données confidentielles. J'ai contribué à formaliser tout cela, avec des outils algébriques.

► **Matapli : Quel(s) type(s) d'outils mathématiques ?**



► **A. C. :** Ce que je fais repose beaucoup sur la théorie des corps finis. On travaille beaucoup sur des propriétés de polynômes dans des corps finis par exemple, souvent de caractéristique deux, mais de plus en plus de caractéristique impaire. Au-delà de l'ensemble des travaux précédents, j'ai des contributions plus ponctuelles, sur des problèmes que j'ai trouvés très durs. J'ai résolu avec Pascale Charpin, une collègue de mon équipe, et Hans Dobertin, un collègue allemand qui est décédé depuis, une conjecture qui avait 35 ans. Ça nous a demandé un travail de folie ! C'est un papier qui n'est pas beaucoup cité parce qu'une fois que tu résous la conjecture, ça n'a plus d'intérêt,

d'autant que tout le monde était convaincu que c'était vrai... Je ne sais pas si c'est un résultat dont je suis fière, mais je suis contente d'être allée au bout et notre preuve a introduit une nouvelle méthode.

► **Matapli :** Et est-ce que tu utilises les corps finis comme un outil que tu appliques, ou est-ce que tu développes aussi la théorie des corps finis, en soi, indépendamment de son application à la crypto ?

► **A. C. :** Je fais les deux. Je suis éditrice du journal *Finite Fields and Their Applications* qui ne fait pas que de la crypto, loin de là. Je fais des travaux purement mathématiques de corps finis. L'application et la théorie sont très intriquées. C'est complètement différent des maths applis, ça n'a rien à voir pour moi, je pense qu'on y reviendra.

► **K. C. :** Quand j'ai commencé à travailler sur l'histoire des maths en Chine, un de mes soucis, c'était d'en finir avec une manière de raconter l'histoire des mathématiques où on ne voyait que la Grèce ancienne, laquelle était construite comme étant européenne, ce qui est plus que discutable. Je me suis orientée vers l'histoire des maths en Chine dans la perspective d'essayer de repenser cette manière de voir l'histoire des maths, sans doute héritée du XIX<sup>e</sup> siècle, qui a la peau très très dure. On a beau publier, article après article, une vision différente, la majeure partie des gens ne démordent pas de cette idée que les Européens sont théoriques et que dans tout le reste du monde, on ne pense que de façon pratique. À Cambridge, la semaine dernière, un collègue m'affirme encore : « Les Chinois, ils sont pratiques, n'est-ce pas ? » Donc, j'espère que mon élection est liée au fait que j'ai un tout petit peu contribué à fracturer ce mur auquel, pendant des décennies je me suis heurtée.

Pour essayer de fracturer ce mur, j'ai travaillé sur l'histoire de la démonstration mathématique, saisie d'un point de vue global. Il y a des textes chinois du III<sup>e</sup> siècle qui ont pour objectif de démontrer que des algorithmes sont corrects. En Chine, comme en Mésopotamie, comme dans les textes en sanskrit, nos sources témoignent d'une activité purement mathématique centrée sur les algorithmes. J'ai essayé de comprendre ce que veut dire faire des mathématiques avec des algorithmes et démontrer que des algorithmes sont corrects. J'ai essayé de construire un cadre dans lequel on pouvait prendre en compte des textes chinois, des textes en cunéiforme, des textes en sanskrit dans une histoire de la démonstration mathématique. Et pour atteindre cet objectif, j'ai construit un pont entre les débats d'aujourd'hui sur la démonstration mathématique et les textes anciens. Souvent, les collègues philosophes considèrent que ce ne sont pas des démonstrations. À leurs yeux, une condition sine qua non pour qu'il y ait démonstration, c'est qu'on parte d'axiomes, etc. C'est un peu gênant car des mathématiciens, eux, considèrent que ces mêmes textes contiennent des démonstrations. On a là un premier débat. Ceci dit, même entre mathématiciens, il n'y a pas une seule idée sur ce que c'est une démonstration. Il y a eu une

controverse en 1994 dans les pages du bulletin de l'AMS dont je me suis beaucoup servie, où Arthur Jaffe et Frank Quinn exigeaient qu'on introduise tout un vocabulaire normatif en distinguant démonstration, arguments, idée de démonstration, etc. Ils ne voulaient pas qu'on appelle tout démonstration car selon eux, plein de raisonnements publiés comme démonstrations n'en n'étaient pas. Des gens comme William Thurston, René Thom se sont alors levés en disant « Au secours, ne tuez pas les mathématiques avec la rigueur » et le débat a montré de manière évidente que tous ces matheux n'étaient pas du tout d'accord sur ce qu'était une démonstration, pourquoi il fallait démontrer, qu'est-ce qu'on faisait en démontrant. J'ai essayé de brancher ces deux débats l'un sur l'autre pour dire « ce n'est pas nous, historiens, qui allons décider ce qu'est une démonstration et qui allons trier les textes pour faire de l'histoire sur la base d'une telle validation. » Mon but était d'ouvrir un espace où on pouvait avoir une histoire de la démonstration qui était moins obsédée par l'axiomatique et qui était plus ouverte aux différentes motivations qui ont pu pousser les praticiens des mathématiques à faire des démonstrations.

C'est une première chose. Mais, il y en a une deuxième. Je suis une femme, je ne suis pas chinoise, et c'est sûr qu'en Chine, tout le monde n'attendait pas forcément de moi que je fasse autre chose que de la publicité pour ce que mes collègues chinois avaient fait en matière d'histoire des maths en Chine. Donc j'ai mis toute mon énergie à établir des résultats nouveaux, qui n'avaient pas été obtenus par des collègues chinois. De manière générale, j'ai essayé de faire en sorte qu'on ne soit pas chacun à travailler sur son pays, sur sa nation, et qu'on ne fasse pas chacun *in fine* que contribuer à la construction d'un récit national

Je vais prendre un exemple de ce à quoi m'ont menée ces deux motivations. Une des choses que j'ai été obligée de faire pour proposer des traductions, c'est un glossaire. J'ai de fait établi le premier glossaire de termes techniques utilisés dans des textes mathématiques anciens chinois. Curieusement, ça n'existait pas en Chine. Aucun dictionnaire ne rendait compte de la terminologie technique des maths. Et je pense avoir donné des sens techniques à des termes qui, en Chine, n'avaient pas été vus comme termes techniques. Or certains de ces termes techniques étaient précisément liés à la manière dont les praticiens des mathématiques pensaient la démonstration. Ça, j'en suis assez contente. J'ai publié ça il y a 20 ans, personne n'en parle, mais ce n'est pas grave.

De fait, en travaillant sur les documents mathématiques de la Chine, il y a une question qu'on est obligé de se poser : si on lit tel texte chinois comme un manuel d'exercices, on va rapidement dire que cet ouvrage est élémentaire. La question que j'ai essayé de me poser, c'est de comprendre ce que représentaient les problèmes pour les mathématiciens de la Chine ancienne. L'objectif était de

trouver une manière de lire ces textes de façon non anachronique et ainsi de mieux les interpréter. Et j'ai essayé de généraliser car si la question de savoir comment lire les sources se pose à propos des textes chinois, elle est également pertinente au-delà de la Chine. Qu'est-ce que ça veut dire « lire les textes » ? Comment trouver et traiter dans les textes historiques les indices sur la manière dont les auteurs les ont écrits et les lecteurs les ont lus ? J'ai créé un séminaire qui s'appelle *Histoire des sciences, histoire du texte*. Au début, il est arrivé qu'il n'y ait qu'une personne qui vienne, ça a été vraiment très dur d'éveiller l'intérêt pour cette problématique. Mais aujourd'hui, le séminaire existe toujours, 30 ans plus tard, et beaucoup de jeunes se sont saisis de ces problématiques. Ça me fait vraiment très plaisir de voir que les jeunes générations, surtout les étudiants, se sont emparés de ces questionnements.

► **Matapli :** Et, concrètement, pouvez-vous nous donner des exemples de maths appliquées en Chine ancienne ?

► **K. C. :** Un des trucs dont je suis le plus fière et qui intéressera effectivement Matapli, c'est d'avoir déchiffré, avec un collègue chinois, Ma Biao, le fonctionnement de la gestion des grains dans les institutions impériales de la Chine ancienne. Dans certains passages d'un ouvrage classique du premier siècle, *Les Neuf Chapitres*, que j'ai traduit en français, il y avait une unité de mesure de capacité pour les grains en général, qui avait un volume fixe, alors que dans d'autres parties du texte, la même unité changeait de volume en fonction du grain. J'ai posé la question de savoir ce que cela signifiait à de nombreux collègues, personne n'a su me répondre. Mon collègue chinois a trouvé cela intéressant et on a beaucoup, beaucoup, beaucoup travaillé, pour finalement montrer qu'il y avait un système global très structuré, qui regroupait différents grains et différents états de chacun de ces grains. Ce système intégrait plusieurs sous-systèmes de grains : un système bâti sur le millet, un système bâti sur le riz, un autre sur le haricot mungo, le grain de soja, etc. Les impôts étaient prélevés en grains et les salaires des fonctionnaires étaient payés en grains. Donc il y avait toute une économie d'État qui était libellée en grains. Or dans le sud, on prélevait plutôt du riz, dans le nord, on prélevait plutôt du millet, donc il fallait organiser l'impôt de façon à ce qu'il soit équitable. De cette unité dont j'avais repéré qu'elle avait deux fonctionnements, on a établi qu'elle avait deux sens. Dans certains contextes, c'était vraiment une unité de capacité, mais dans d'autres contextes liés aux grains, c'était une unité de valeur économique. Pour payer les fonctionnaires ou pour prélever l'impôt, on comptait les grains en fonction de cette unité de valeur qui correspondait à des volumes différents selon les grains et même selon l'état des grains : non décortiqués, grossièrement décortiqués, fi-

nement décortiqués... il y avait tout un système! Pour comprendre ce système, il fallait considérer à la fois les textes de règlements administratifs et les textes mathématiques. Avec les textes mathématiques seulement, on ne pouvait pas l'interpréter. Avec les textes administratifs seulement, on ne pouvait pas non plus. Mais en les mettant ensemble, on a réussi à craquer ce système des grains. Ce résultat change la manière dont il convient d'interpréter l'histoire économique de la Chine des débuts de l'Empire.

► **Matapli : Quelles sont les découvertes les plus surprenantes que vous avez faites ?**

► **A. C. :** Dans ma discipline, les découvertes ont toujours un côté surprenant, parce qu'un standard cryptographique, c'est censé être solide, c'est conçu selon les critères définis par l'état de l'art. Mais il y a quand même un résultat assez simple que j'ai obtenu et qui m'a vraiment étonnée, parce qu'il est assez contre-intuitif. C'est la question du degré multivarié d'une fonction itérée. Je vais peut-être commencer par expliquer le contexte.

La cryptographie repose sur une impossibilité théorique. Un chiffrement parfait, ça n'existe pas : ce sont les résultats de Shannon dans les années 40 qui le montrent. Sauf si le secret partagé par les interlocuteurs est aussi long que le message qu'on veut échanger, on sait que le message chiffré contient de l'information sur le message clair. Autrement dit, tous les systèmes qu'on utilise et qu'on étudie sont des systèmes théoriquement cassables. Et donc la question est celle du coût nécessaire pour les casser. C'est notre question fondamentale.

Comment crée-t-on un système de chiffrement ? Vous disposez d'un secret et vous avez un bloc de message. Pour le chiffrer, vous allez faire une transformation qui doit se rapprocher le plus possible d'une transformation qu'on aurait tirée au hasard parmi l'ensemble de toutes les transformations possibles qui opèrent sur des données de cette taille-là. Vous ne pouvez pas le faire : quand vous tirez une bijection uniformément au hasard parmi toutes les bijections sur 128 bits, vous avez un objet qui est trop complexe pour être évalué par un logiciel ou un circuit électronique de taille raisonnable. C'est aussi un résultat de Shannon sur le nombre de portes logiques qu'il faut pour implémenter une fonction booléenne.

En pratique, on part de la contrainte la plus dure : je dois pouvoir implémenter mon système de chiffrement. Je choisis donc une fonction qui opère sur 128 bits, une bijection, non linéaire<sup>3</sup> mais qui est implémentable et que j'itère un certain nombre de fois, suffisamment pour que ça ressemble le plus possible à

---

3. sinon il suffirait de résoudre un système linéaire pour retrouver la clef secrète à partir d'un seul ou de quelques couples (clair, chiffré).

une bijection que j'aurais tirée au hasard. Notre travail dans ce cadre est de chercher tous les moyens efficaces qu'on a de distinguer cette transformation d'une transformation qu'on aurait tirée au hasard. Alors, le problème, c'est que même une transformation simple, si elle est non linéaire, si elle opère sur 128 bits, elle n'est toujours pas implémentable, sauf si elle est vraiment extrêmement creuse, très triviale. Ce qu'on fait en pratique, c'est qu'on va couper notre entrée qui fait 128 bits, en petits bouts, typiquement en 16 octets, et là, on opère une transformation non linéaire assez solide indépendamment sur chacun des 16 octets, et on mélange le tout avec une transformation affine. Et on itère. Une des questions est alors de connaître l'évolution de son degré avec le nombre d'itérations. Vous pouvez écrire n'importe laquelle des coordonnées sous forme d'un polynôme multivarié. Quel est le degré, par exemple, des coordonnées que vous obtenez ? Combien faut-il faire d'itérations pour obtenir un degré qui est le degré attendu d'une bijection tirée au hasard, à savoir  $127^4$ . Si je pars d'une fonction de degré 2 et que je fais  $R$  itérations, je vais *a priori* avoir quelque chose qui va être de l'ordre de  $2^R$ . En réalité, ça ne se passe pas comme ça. En fait, dans la fonction que vous itérez, la partie non linéaire est une fonction qui opère indépendamment sur des blocs de données plus petits. Ce n'est donc pas très dur de se rendre compte que non, ça ne suit pas cette évolution. Au début, vous êtes en  $D^R$ , où  $D$  est le degré de la petite fonction dont on part. Mais dès que vous vous approchez un petit peu du nombre de variables, 128 dans mon exemple, ça augmente tout doucement et ça met vraiment du temps à atteindre le maximum. *In fine*, il faut en gros deux fois plus d'itérations que ce qu'on imaginait. C'est un résultat qui n'est pas très compliqué, mais qui est contre-intuitif. J'ai tourné un petit peu autour de ça dans pas mal de travaux, pour finalement réussir à avoir une formulation et une preuve qui est simple. Mais pour moi et pour beaucoup de gens, le fait que structurellement le degré n'augmentait pas comme attendu fut une surprise.

► **K. C. :** J'ai aussi une petite histoire surprenante à raconter. Dans les années 80, on a découvert en Chine des sources mathématiques beaucoup plus anciennes que tout ce qu'on connaissait jusqu'alors : dans des tombes, il y avait des gens qui partaient dans l'au-delà avec des bibliothèques. Et dans certaines de ces bibliothèques, il y avait des manuscrits mathématiques. Le premier, trouvé en 83-84, a été publié en 2001. Je voulais travailler avec un collègue, Daniel Morgan, sur ce manuscrit. L'idée que j'avais proposée était de regarder les erreurs pour savoir si elles étaient des erreurs de copie ou des erreurs mathématiques et essayer de comprendre le manuscrit par ce biais. Ce type de manuscrit a comme support des lattes de bambou qui, à l'origine, étaient liées par des cordes, mais ces cordes se décomposant sous terre, il ne reste plus que les lattes de bambou.

---

4. ça ne peut pas être 128, parce que c'est une bijection

Une fois remis en ordre, le texte était divisé en sections. J'avais remarqué que sur trois lattes qui formait une section, il y avait presque une latte entière qui avait été copiée deux fois. Quand on étudie les copies anciennes, il y a un accident qui se présente souvent et qu'on appelle « le saut du même au même » : en raison du fait qu'une même expression se trouve en deux endroits proches l'un de l'autre, la personne qui copie soit saute de l'expression à sa seconde occurrence, soit repart en arrière provoquant deux passages très très proches dans des lattes. Comme nous travaillions sur les erreurs, je montre à mon collègue cette erreur et je lui explique que je pense que c'est un saut du même au même, donc une erreur de copie. Et il me répond : « Qu'est-ce que c'est que ce point qui est à côté ? » Il me montre que dans la première itération du passage qui était copié deux fois, il y avait un point à côté d'un caractère manquant, et un point en bas. Et en fait, nous comprenons que ces deux points étaient les marques des gens qui vérifiaient la production du texte, pour signifier qu'il manquait quelque chose vraiment d'essentiel. Cet élément manquant apparaissait précisément sur la latte suivante, qu'il fallait donc interpréter comme la reprise de la copie erronée, qui reprenait un caractère avant le premier caractère manquant de la latte problématique. En effet, il y avait un premier caractère manquant, ce n'était pas trop grave, mais le deuxième caractère manquant, celui où il y avait un point, c'était vraiment très embêtant, mathématiquement : il manquait une unité de mesure, alors que l'algorithme décrivait comment effectuer une opération en fonction de l'unité de mesure qui figurait sur les quantités considérées. Ce détail voulait dire que ces lattes étaient copiées dans un contexte où dans le même espace, il y avait quelqu'un qui écrivait quelque chose, quelqu'un qui vérifiait, et qui vérifiait d'une manière telle que lorsque le correcteur pointait une erreur trop problématique, le scribe interrompait l'écriture et reprenait dans la latte suivante. En fin de compte, comme ce sont des maths, on établit qu'il y a une erreur et on peut donc montrer que les points indiquent des erreurs. J'ai fait tout un travail (que je n'ai toujours pas publié), sur les points, et les erreurs qu'ils indiquent. C'est très important pour l'étude des manuscrits. Quelqu'un qui écrit sur un texte littéraire ne peut pas interpréter les points comme moi je peux les interpréter grâce au fait que l'erreur se détecte plus facilement en mathématiques.

► **Matapli :** Du coup, Karine, face au déchiffrement de textes anciens, est-ce qu'il y a des réflexes qui peuvent être acquis avec l'expérience ?

► **K. C. :** Il y a certains trucs qui deviennent des automatismes, mais on se renouvelle tout le temps. Par exemple, les points, je n'y prêtais pas attention jusqu'à l'histoire que je viens de raconter. Je vais donner un autre exemple, très bête, qui

concerne l'expression de la généralité. Souvent, quand on commente des textes anciens, on confond abstraction et généralité. On pense qu'un texte est général seulement s'il est abstrait. Or, il y a plein de textes chinois qui traitent de problèmes qui sont exposés à l'aide de situations particulières et où les données sont associées à des valeurs numériques particulières. C'est ce genre de chose qui amène beaucoup de gens à penser que « les Chinois » sont « pratiques ». En réalité, on a des traces, laissées par des lecteurs, qui montrent qu'une telle interprétation est erronée. On a par exemple un lecteur du troisième siècle qui voit qu'un algorithme résout correctement un problème, mais qu'il n'est pas général pour autant. Il dénonce immédiatement ce manque de généralité et introduit une correction de la procédure qui la rend générale. Ce texte montre qu'on peut écrire quelque chose qui est général sans que ce soit abstrait ! En fait, on le sait très bien : quand on apprend à conjuguer les verbes du premier groupe en français, on ne dit pas \*e, \*es, etc. On dit : « je chante, tu chantes, il chante ». Et pourtant personne n'a jamais pensé que ce faisant, on apprenait seulement la conjugaison du verbe chanter. Il y a différentes expressions du général, et il faut faire très attention : je lisais pas plus tard que ce matin qu'un collègue va publier un article dans les Notices de l'*American Mathematical Society* où il affirme que les algorithmes « des Babyloniens » (comme si on pouvait parler de façon aussi globale) ne sont pas généraux. Il y a justement là un problème d'interprétation de l'écriture du général. Voilà, un exemple d'un automatisme de lecture.

► **Matapli :** En restant sur les pratiques, il y a une question assez naïve. Comment se passent les réunions de travail de cryptographes ? Vous travaillez à prouver des théorèmes comme les autres matheux, ou bien y a-t-il des choses plus spécifiques ?

► **A. C. :** Alors, on procède d'une manière particulière en cryptographie, qui ne prend pas tout notre temps, mais qui est quand même quelque chose d'important et qui est une façon de travailler assez spéciale. En cryptographie, les algorithmes qu'on utilise sont des systèmes standardisés. Sinon, en général, ils sont très faibles. Et depuis une trentaine d'années, cette standardisation a lieu grâce à un processus ouvert et public. Ça veut dire qu'un organisme de standardisation, usuellement le NIST américain, publie un appel en disant qu'on voudrait standardiser un algorithme cryptographique qui ait telle propriété, des clés de telle taille, tel genre de performance, telle fonctionnalité, etc. Et il y a une *deadline* de soumission. Ça n'est pas un *call for papers*, mais un *call for primitives*. Les cryptographes soumettent alors les spécifications d'un algorithme en expliquant pourquoi l'algorithme qu'ils proposent est conçu comme ci ou comme ça, en fournissant une analyse de sécurité. Il y a aussi du code pour qu'on puisse

analyser les performances. Toute la communauté soumet : dans les procédures de standardisation les plus récentes, il y a une cinquantaine, une soixantaine de soumissions qui arrivent de partout. Le NIST regarde, enlève les deux, trois propositions un peu folkloriques et puis publie le tout. Il y a un site web avec la liste des candidats, les spécifications. Et puis, après, on travaille pendant cinq ans, six ans, on fait des conférences. Et qu'est-ce qu'on fait ? Bien sûr, une fois qu'on a soumis un système, on veut gagner la compétition et être l'auteur du prochain standard, donc notre travail consiste à casser les autres propositions ! Dit comme ça, notre communauté a l'air atroce. En fait, non, c'est justement cela qui organise le travail collaboratif dans la recherche. On soumet des algorithmes qu'on ne sait pas soi-même casser, pour voir si les autres y parviennent. C'est un authentique effort de collaboration de recherche.

► **K. C. :** Mais c'est complètement public, la publication ?

► **A. C. :** C'est complètement public.

► **K.C. :** Donc, ça veut dire que même les hackers peuvent... Tout le monde peut... Ça sonne un peu paradoxal ! Un code secret public ?

► **A. C. :** Eh bien oui ! c'est toujours compliqué à expliquer, mais en fait, on le sait depuis longtemps qu'il faut que cela soit public. D'ailleurs c'est grâce à l'armée française qu'on a d'abord pris conscience de cela. À la fin du XIX<sup>e</sup>, après la défaite de 1870, on utilisait des livres de code secrets, et ces livres de code, il y en avait plein d'exemplaires sur les champs de bataille, en particulier parce que cela coïncidait avec les premières utilisations du télégraphe dans l'armée. Dans ce contexte, une stratégie militaire de base consistait simplement à aller voler un livre de code de l'adversaire, de sorte que la cryptographie correspondante finissait par devenir inutilisable. Il fallait alors re-imprimer des livres de code, etc. Des gradés dans l'armée française se sont alors un peu inquiétés de la chose et ont demandé à un scientifique de réfléchir à ce que devait être une méthode de cryptographie utilisable à grande échelle pour l'armée. Ils n'ont pas demandé à un cryptographe mais à un linguiste, Auguste Kerckhoffs, l'un des fondateurs du Volapük, qui était hollandais, mais travaillait en France. Il est surtout resté dans l'histoire pour son traité de cryptographie dans lequel il explique à plusieurs reprises et de manière limpide, que pour qu'une méthode cryptographique puisse être utilisée à grande échelle, il faut qu'elle soit publique. Il dit même qu'il faudrait qu'elle soit enseignée dans les écoles militaires de nos adversaires ! Évidemment, il faut qu'il y ait un secret quelque part, mais ça doit être un secret très court, que les gens puissent retenir, changer facilement, donc le système doit être très flexible.

On doit réexpliquer cela régulièrement depuis plus de cent ans en disant que non, au contraire, nos standards cryptographiques, si on peut leur faire

confiance, c'est parce qu'ils sont publics donc qu'ils ont été étudiés par toute la communauté, et que si toute la communauté pense que ce système est solide, on peut avoir confiance ! Ce paradoxe apparent est un aspect central de notre travail.

► **Matapli :** **Et c'est à la fois central et original. Est-ce l'activité de recherche est entièrement organisée autour de cela ou c'est un temps parmi d'autres mais qui mobilise toute la communauté ?**

► **A. C. :** C'est un peu les deux. Il y a quand même régulièrement des compétitions comme cela, et puis comme ça dure longtemps, ça nous occupe un certain temps. En revanche, on peut essayer d'attaquer un système, réussir et se rendre compte de ce qui a fait marcher la chose. Cela peut donc amener à des développements théoriques : ce qui est intéressant, évidemment, ce n'est pas juste « on publie un système, on le casse ». Ce qui est intéressant, c'est la connaissance que cela nous apporte. C'est comprendre ce qui fait qu'une attaque fonctionne sur ce système-là, comment elle se généralise, et puis surtout, ce qu'il faut faire pour s'en prémunir. Et là, ça devient des maths. Précisément, quelle fonction possède une structure qui ne peut pas être utilisée comme une faille dans une opération de décryptage ?

► **Matapli :** **La recherche en cryptographie est également développée dans les services de renseignement. Comment co-existe ce monde avec la recherche académique dans laquelle vous évoluez ?**

► **A. C. :** Il y a des interactions, évidemment, entre le milieu académique et les services de renseignement. Les gens des services viennent à nos conférences. De plus, ils ne sortent pas de nulle part, ils ont été formés quelque part ! Les cryptographes, ça ne me pousse pas comme ça, dans la forêt. Et le renseignement a parfois besoin de notre expertise. Alors, évidemment, ça n'est pas symétrique, il y a des points aveugles : ils ont peut-être des nouvelles attaques, des nouvelles méthodes que l'on ne connaît pas forcément. Ça fait aussi partie du folklore de la discipline. On sait par exemple maintenant que dans les années 60-70, les cryptographes des services américains et anglais savaient faire des choses avant le monde académique.

Ce qui est plus intéressant, c'est que, bien sûr, la cryptographie est un objet politique. La cryptographie et sa maîtrise donnent du pouvoir. La communauté en a une conscience très forte qui s'était un peu perdue, mais qui est revenue de manière très intense au moment des révélations de Snowden. On a compris que la cryptographie avait été utilisée pour faire de la surveillance de masse. Ça a beaucoup traumatisé la communauté, la communauté américaine encore

plus que les autres, d'ailleurs. Cela a provoqué une réflexion et contribué à une certaine éthique de la responsabilité dans le domaine. Je pense d'ailleurs que quelque chose d'analogue se développe chez les collègues qui travaillent en IA en ce moment. On est quand même à une époque où de plus en plus de tentatives d'utilisation de la cryptographie pour la surveillance de masse ont lieu : tous les six mois, la communauté doit réagir. Par exemple, on vient de le faire sur la loi contre le narcotrafic il y a moins d'une semaine. Il y avait un amendement qui avait été introduit au Sénat pour demander à ce que toutes les messageries chiffrées comme Signal ou Whatsapp aient une porte dérobée et puissent être écoutées. La communauté a réagi. Sur des sujets proches, Claire Mathieu par exemple intervient beaucoup sur ce qui est en train de se passer aux États-Unis. Elle a travaillé sur l'établissement de l'algorithme au cœur de Parcoursup. Elle a dit récemment qu'elle s'était rendue compte *a posteriori* qu'on lui avait demandé d'introduire de façon centralisée dans l'algorithme une fonctionnalité qui garantit qu'il y ait un nombre minimum de boursiers dans toutes les formations. Si maintenant un gouvernement a envie de garantir un nombre minimum d'étudiants nés en France, il a une ligne de code à changer. Et donc le fait d'avoir des outils informatiques centralisés, ça pose des questions. Je pense que la situation américaine politique actuelle nous incite à nous poser des questions.

► **Matapli :** Quand vous dites « la communauté réagit », ça veut dire s'opposer aux portes dérobées ?

► **A. C. :** Oui.

► **Matapli :** Pour prévenir le risque que ça tombe entre des mauvaises mains ?

► **A. C. :** Non, ça n'est pas ça. Il y a une impossibilité technique à faire un système dans lequel on met des portes dérobées pour certaines personnes seulement. Si on ne réfléchit pas à la technique, on va se dire que la porte dérobée va servir à l'état et pas aux « méchants ». Ça, c'est une blague. Une porte dérobée, elle sert à celui qui va savoir s'en servir. C'est d'autant plus absurde dans un contexte international. On ne peut pas tous utiliser le même système et dire « mon gentil gouvernement va s'en servir mais pas le méchant gouvernement du pays d'à côté ». On utilise souvent l'image des cadenas pour les valises à l'aéroport : il y a une clé spéciale pour les services de sécurité à l'aéroport qui leur permet d'ouvrir tous les cadenas. Évidemment, dès que le cadenas a été mis en vente, il y a eu des plans partout et tout le monde peut fabriquer une telle clé passe-partout. Pour la crypto, c'est pareil. Si on fait une loi et un système technique qui permet d'écouter toutes les communications des narcotrafiquants, ce

sont les communications de tout le monde qui vont être écoutées : celles de nos entreprises, du gouvernement, etc.

► **Matapli :** Pourriez-vous résumer les grandes questions générales, qui animent vos communautés respectives ?

► **K. C. :** Une tendance contre laquelle j'essaie de lutter, c'est celle qui consiste à décomposer l'histoire des sciences et même l'histoire des maths en une histoire des sciences anciennes, médiévales, du monde moderne et contemporain. J'essaie d'introduire des passerelles. Par ailleurs, il y a dans ma communauté d'histoire des sciences un important effort pour traiter l'Antiquité de façon globale et pas de façon locale. Comment voir, par exemple, au-delà de la Grèce ancienne ? Je trouve dommage que l'historiographie pour l'histoire ancienne soit découpée en chapitres qui traitent séparément la Chine, l'Inde, le monde arabe,... et donc des chapitres liés à des entités politiques très récentes. Ce découpage ne permet pas de voir qu'il y a eu des circulations, des transferts et des milieux translinguistiques qui ont joué des rôles fondamentaux. J'essaie de travailler justement sur des milieux qui ne sont pas toute la Chine, qui ne sont pas toute l'Inde, mais qui sont visiblement en contact sur des temps assez longs. Un grand nombre d'historiens des sciences réfléchissent aujourd'hui à une histoire globale. Est-ce qu'une histoire globale, ça doit être « on compare la Chine, la Grèce, etc », comme si ces territoires étaient uniformes, ou est-ce que ça doit être autre chose ? C'est d'autant plus important qu'il y a beaucoup d'usages de l'Antiquité : nos recherches peuvent être reprises à des fins politiques. Il y a ainsi des gens qui poussent l'idée que ce qui « caractériserait » l'« occident » (c'est leur terme), c'est la démonstration façon « Grèce classique » et ce qui « caractériserait » l'« orient », par exemple la Chine, c'est le calcul. Cette idée est répandue, et elle est utilisée pour construire de soi-disant caractéristiques nationales. Lorsqu'il y a eu des travaux sur le calcul quantique en Chine, la machine qui a été mise au point il y a quelques années a été appelée *Les Neuf Chapitres*, dont je parlais précédemment. C'est l'ouvrage classique mathématique de la Chine ancienne, l'équivalent des *Éléments* d'Euclide, qui est structuré autour d'algorithmes et que j'ai traduit avec mon collègue chinois Guo Shuchun en français. L'antiquité est associée à des représentations sociales et on peut en faire usage à des fins identitaires.

► **A. C. :** Alors, si on parle de la communauté cryptographique en particulier, il y a deux sujets brûlants dont tout le monde parle. Le premier, évidemment, c'est ce qui s'appelle la cryptographie post-quantique. La question est la suivante : on sait depuis les années 90 que si on avait un ordinateur quantique, il existerait un algorithme qui permettrait de factoriser des grands nombres, de calculer des logarithmes discrets dans des groupes multiplicatifs de grande taille. Un tel or-

dinateur pourrait casser à l'aide d'un algorithme polynomial une partie des systèmes de cryptographie à clé publique, par exemple le plus connu, le RSA. Suite à l'excitation, depuis une dizaine d'années, autour de l'ordinateur quantique, il est apparu comme évident qu'il fallait développer des alternatives crédibles à ces systèmes-là. Mais est-ce que ces alternatives sont vulnérables à d'autres attaques sur un ordinateur quantique? Ça s'appelle la crypto post-quantique, qui est censée résister à l'ordinateur quantique. C'est un sujet sur lequel il y a beaucoup de moyens.

Il se trouve que c'est le sujet sur lequel j'ai fait ma thèse. J'ai travaillé sur un système de cryptographie à clé publique qui est une alternative au RSA, qui s'appelle le crypto-système de McEliece et qui est post-quantique : il n'implique pas de factorisation, le problème difficile sous-jacent relevant plutôt de l'algèbre linéaire puisque c'est un problème de décodage d'un code correcteur linéaire. C'est un système qui avait été proposé en même temps que le RSA, mais qui est moins agréable que lui en termes de performance. Et à l'époque, au milieu des années 90, tout le monde rigolait en disant, c'est un sujet pour les matheux, tout le monde s'en fiche, les clés sont trop grosses... À la fin de ma thèse, tous les collègues — bien intentionnés, d'ailleurs — me disaient qu'il fallait changer de sujet, que je n'aurai jamais de poste et ils avaient raison. J'ai donc changé complètement de sujet, mais heureusement dans mon équipe, il y avait des collègues en poste qui ont, eux, continué. Quand c'est devenu à la mode, il y a eu un appel du NIST pour la standardisation. On a été d'un seul coup extrêmement contents que certains collègues aient travaillé depuis vingt ans sur ce sujet, sans le laisser tomber. C'est pour cela que les standards de crypto post-quantiques sont en grande partie français.

► **K. C. :** Vive les postes permanents!

► **A. C. :** Oui, bien sûr!

En tout cas, ce premier sujet prend trop de place, à mon avis. C'est notre travail de réfléchir à un monde doté d'un ordinateur quantique. Mais mes collègues qui travaillent sur le RSA disent quand même régulièrement qu'ils ne savent pas qui cassera le RSA en premier : un ordinateur classique ou un ordinateur quantique? On ne sait pas et c'est sans doute un sujet qui a peut-être été trop agité pour obtenir des financements... J'ai une anecdote, au passage : je suis allée faire un exposé pour l'INSP (le successeur de l'ENA) pour la formation professionnelle des hauts fonctionnaires. J'y parle des enjeux de la recherche, des grands problèmes en informatique, et évidemment, je parle à un moment d'ordinateur quantique. J'ajoute qu'on ne sait pas si un jour il y en aura un, mais que c'est normal qu'on se pose la question des conséquences sur la cryptographie. Et quelqu'un dans l'assistance lève la main et dit : « mais je ne comprends pas,

l'ordinateur quantique, on en a déjà un, sur le plateau de Saclay, il ne marche pas encore très bien, mais c'est une affaire de quelques mois, un an maximum ». Et là, je me dis, c'est aussi notre faute. On est arrivé à un quiproquo complet : on dit « à long terme, il y aura un ordinateur quantique, il nous faut des financements » et il y a des gens pour qui la vision à long terme, c'est le terme de leur mandat, ou de leur poste, donc c'est dans deux ans... Ils imaginent que, effectivement, dans deux ans, ils vont avoir un ordinateur quantique, comme on leur a promis. La personne m'a prise pour une folle quand je lui ai répondu non. Des collègues qui travaillent vraiment sur le sujet, dans mon équipe, disent que le message qu'ils essaient de faire passer maintenant est qu'il y a 30% de chance qu'on arrive à faire un ordinateur quantique dans 30 ans, ceci étant considéré comme optimiste.

Plus généralement, je pense que le financement sur projet fait que le long terme, c'est désormais la durée des projets. Je racontais notre système de concours de crypto à ce public de l'INSP. Lorsque j'ai dit que le standard paraissait huit ans après le début, il y a eu un bruissement dans la salle... Oui, on ne vit pas dans le même monde.

Et le deuxième sujet qui excite aussi beaucoup la communauté depuis une dizaine d'années, c'est ce qu'on appelle du chiffrement complètement homomorphe. C'est un procédé qui permet de faire du calcul sur des données chiffrées. Quand vous faites la somme de deux textes chiffrés, vous obtenez le chiffré de la somme, et pareil pour le produit. Comme, depuis peu, on sait en plus itérer, on sait évaluer n'importe quelle fonction sur les chiffrés. C'est quelque chose qui ouvre des perspectives absolument incroyables.

► **Matapli :** Mais les données, pour autant, restent chiffrées ? Quel est l'intérêt ?

► **A. C. :** Ça veut dire qu'on peut faire des statistiques sur des données de santé en les gardant confidentielles, par exemple. Que l'on peut travailler, faire des calculs sur des données sensibles. On peut donc externaliser des calculs... le champ applicatif est énorme. Ça coûte encore très cher du point de vue *computational*, mais il y a des choses qui fonctionnent et ça touche à énormément de domaines de l'informatique. Il faut modifier les programmes pour qu'ils soient plus compatibles avec ce type de chiffrement... C'est un domaine où plein de choses se passent en ce moment.

► **Matapli :** Comment avez-vous vu évoluer les méthodes au cours de vos carrières ?

► **K. C. :** Franchement, quand on a commencé il y a 40 ans, on était tous des

amateurs. On s'est tous formés collectivement. Quand Anne disait « je ne prendrais pas aujourd'hui un étudiant qui était moi », c'est parce que le niveau a monté énormément. Les gens n'arrêtent pas de pleurer sur le fait que le niveau stagne, mais en fait, le niveau monte énormément. Quand j'ai fait ma thèse, comment dire, il y avait très peu de thèses sur l'histoire des maths, il n'y avait pas de formation, les collègues étaient amenés à ce sujet au détour d'histoires personnelles un peu inattendues. Aujourd'hui, on a des masters, des écoles doctorales, des vraies formations, des gens qui dirigent les mémoires de master et les thèses, donc ce n'est pas du tout la même chose.

► **Matapli : Quelles en sont les conséquences sur la recherche ?**

► **K. C. :** Les méthodes de travail se sont énormément développées. Elles sont devenues beaucoup plus exigeantes que ce qu'elles étaient. Le milieu s'est professionnalisé au fur et à mesure. Au début, il y avait des amateurs et des professionnels, et aujourd'hui, les amateurs ont disparu. Les méthodes de traitement d'archives, de lecture de textes, d'études d'institutions scientifiques dont on dispose à présent n'existaient pas il y a 40 ans. Chacun les a élaborées ou les a apprises dans des livres.

► **A. C. :** Je suis complètement d'accord sur la professionnalisation des domaines. Je trouve ça assez impressionnant. Le niveau des exposés dans les conférences n'a plus rien à voir avec ce qu'il était. Même pour le grand oral au bac, on voit en général des exposés de très bonne qualité !

Il y a quelque chose qui a changé dans ma communauté. Le domaine étant devenu parfois très technique, on a vu apparaître des outils automatiques dont on est devenus très friands. On utilise des algorithmes MILP, SAT, etc. de la programmation sous contrainte, ce qui permet d'utiliser des solveurs du commerce pour identifier des structures qu'on n'arrive pas à voir à la main. Les conséquences peuvent être étonnantes : d'abord parce qu'on ne comprend pas toujours ce qu'on obtient, on perd de l'intuition. Ensuite, on a des résultats qu'on ne peut pas vérifier, ce qui est un vrai problème. Et enfin, on est tributaire de solveurs du commerce dont on n'est pas complètement sûr qu'ils ne soient pas buggés. Ça pose plein de questions. Et c'est quelque chose auquel on n'était pas habitués, l'automatisation, ce qui est assez cocasse pour des informaticiens.

► **Matapli : Vos deux communautés sont assez spécifiques dans le champ des maths et maths appliquées. Anne a déjà un peu répondu, mais Karine, pouvez-vous nous dire un mot des interactions avec les autres communautés de maths ?**



► **K. C. :** Les mathématiciens sont pour moi une source d'inspiration énorme, en particulier dans ces débats sur la démonstration. Quelqu'un qui a eu une influence absolument incalculable sur moi, c'est Donald E. Knuth. Travaillant sur les algorithmes, il a relu des textes anciens d'un point de vue tout à fait nouveau, et en fait beaucoup plus proche de l'esprit de ces textes que ça n'avait été le cas auparavant. Je n'ai jamais pu le rencontrer, j'aimerais beaucoup. Il m'a montré qu'un point de vue récent donne parfois un résultat moins anachronique qu'une lecture par des habitués des maths anciennes. De manière plus générale, c'est toujours très intéressant d'échanger avec des mathématiciens sur le calcul, la démonstration, la fabrication des textes : ça me donne plein d'idées pour regarder des textes plus anciens.

► **Matapli :** Quelles sont à votre avis les idées fausses que peuvent avoir les mathématiciens (non cryptographes, non historiens) sur vos communautés ?

► **A. C. :** Je pense que les mathématiciens qui ont des idées vraiment fausses, ce sont les collègues de maths applis ! Pourquoi ? Parce qu'il y a quelque chose qui est fondamentalement différent entre nos deux disciplines. Chez nous, la motivation ne vient pas de l'extérieur du domaine. La cryptographie, c'est une discipline qui vit en autarcie, en quelque sorte. On fait des systèmes, on les étudie, on les casse : c'est une discipline qui a sa propre motivation. Effectivement, on interagit beaucoup avec les mathématiques, mais on est toujours à l'intérieur de notre champ disciplinaire. De ce point de vue, on est plus proche des mathématiques fondamentales parce qu'on n'agit pas sous l'effet d'une demande extérieure. L'informatique et les maths ne sont pas des outils pour nous. Beaucoup de collègues de maths appliquées pensent qu'en cryptographie et même en informatique en général, on produit des outils à visée applicative. On n'est pas du tout dans cet esprit-là. L'informatique a ses propres problèmes. Les données chiffrées, les problèmes de compilation, les problèmes d'algorithmique distribuée, etc. sont des sujets d'informatique en eux-mêmes, qui restent à l'intérieur de l'informatique. Je pense qu'on a une vraie incompréhension sur ce point, et par extension sur le fait que l'informatique est une science.

► **K. C. :** Je dirais que le cliché le plus répandu, c'est que les historiens établi-

raient des chronologies, désigneraient des précurseurs. En gros, qu'on se consacre à établir comment on est arrivé aujourd'hui là où on est arrivé. Ça n'est vraiment pas du tout notre état d'esprit. Par exemple, ce qui m'intéresse, c'est la diversité des mathématiques malgré leur universalité. Si on regarde quelqu'un qui fait de la combinatoire et quelqu'un qui fait de l'analyse complexe, ils ne travaillent pas du tout de la même manière : d'où vient cette différence au sein d'une même discipline ? Comment s'est-elle construite dans l'histoire ? Comment la circulation s'est malgré tout organisée ? C'est ça qui m'intéresse dans le passé et aujourd'hui.

► **A. C. :** Penses-tu que cette idée provient d'un phénomène culturel ? J'ai l'impression qu'on est élevés dans cette idée d'un développement de l'histoire assez linéaire, avec une espèce de progrès permanent.

► **K. C. :** L'idée qu'il y a un progrès permanent a beaucoup été promue par les Lumières, elle est en fait très située dans l'histoire. En réalité, on sait tous qu'il y a des moments où on oublie, il y a des mathématiciens et des mathématiciennes qui en sont conscients et savent que le mouvement ne va pas continuer de lui-même. Ils et elles savent aussi qu'il y a dans les publications du XIXe siècle bien des résultats établis, qui ont été totalement oubliés depuis, alors qu'ils s'avèrent utiles encore aujourd'hui lorsqu'on va les repêcher dans les journaux anciens. Dans un autre ordre d'idées, j'ai des collègues qui travaillent sur l'Inde et qui mettent en évidence que dans l'histoire, on a effacé l'idée que certains textes sanscrits avaient une histoire, qu'on les a rendus universels. Ce mouvement est partie prenante d'une promotion du sanscrit comme langue naturelle, éternelle, etc. Dans un mouvement inverse, dans cette même Inde, l'extrême droite a inventé de toutes pièces dans les années 60 des mathématiques védiques qui n'ont jamais existé. Le but était de remplacer dans les écoles primaires les *curricula* qu'on enseignait par ces mathématiques védiques qui étaient censées être mieux appropriées à l'esprit hindou. On revient aux usages politiques de l'histoire.

► **Matapli :** **En mathématiques appliquées, l'interaction avec les autres disciplines permet de progresser sur les méthodes elles-mêmes, voire à les généraliser. Comment, en travaillant sur des textes chinois, avez-vous pu faire avancer les méthodes en histoire des maths en général ?**

► **K. C. :** Je travaille par exemple avec des gens qui savent lire les manuscrits sur les lattes, c'est vraiment très productif. J'ai aussi travaillé avec des linguistes, notamment des linguistes qui étudiaient la formulation de consignes pour reprendre leurs outils de description dans notre travail sur des textes d'algorithmes où les instructions posaient des problèmes d'interprétation. Par exemple, si je dis « la porte est là », dans certains cas, on va comprendre que j'indique la locali-

sation d'une porte, dans d'autres, on va comprendre « Sortez! ». Dans les textes d'algorithmes, c'est pareil, on ne va pas utiliser toujours le même terme pour renvoyer à l'opération. Cette théorie des actes de langage introduit de nouvelles manières d'analyser les algorithmes, de regarder les textes.

► **A. C. :** Nous, on a aussi ce genre de phénomène, mais à l'intérieur de la discipline. Ça peut nous amuser de proposer un algorithme, de le casser, d'en proposer une variante ... mais ce qui est intéressant, c'est comprendre pourquoi une attaque fonctionne et comment on fait pour lui résister. Ce sont bien sûr des travaux plus mathématiques, en amont de la cryptanalyse elle-même, d'une autre nature. Et ça enrichit la discipline.

► **Matapli :** Vos résultats en cryptographie peuvent-ils servir à d'autres choses que de la cryptographie ?

► **A. C. :** Les corps finis apparaissent assez souvent en informatique. Il y a, par exemple, la correction d'erreur dont on est très proche méthodologiquement d'ailleurs, il y a aussi la compression. En un mot, tout ce qui vient de la théorie de l'information. Il y a aussi des algorithmes qui ont été faits au départ pour des applications en crypto et qui ont ensuite été utilisés pour d'autres choses, mais je n'ai pas d'exemples concrets, ce qui semble dire que mes travaux servent avant tout à la cryptographie.

► **Matapli :** Dans le livre de Simon Singh *Histoire des codes secrets*, il y a un chapitre où l'histoire du déchiffrement du *linear B* est racontée. Y a-t-il effectivement des liens entre la cryptographie et le déchiffrement ?

► **A. C. :** Il y a deux choses qui sont fondamentalement différentes entre le travail de déchiffrement, tel que le fait Karine, et le décryptage. La différence principale est que je dois décrypter un message dissimulé à dessein alors que si Karine doit déchiffrer, c'est juste qu'on a perdu de l'information au cours du temps. Il n'y a pas d'intention de brouillage, et même bien au contraire dans le cas de manuels de maths. Les Égyptiens n'ont pas fait exprès d'écrire en hiéroglyphes pour que personne ne puisse les lire. La deuxième différence, c'est le besoin du contexte historique évidemment. On ne décrypte jamais de manière hors-sol, on a besoin de tout le contexte.

Mais il y a effectivement des liens. Des collègues de l'équipe Inria Caramba à Nancy ont décrypté récemment une lettre de Charles Quint chiffrée. Elle était à la bibliothèque Stanislas et le hasard des rencontres les a conduits à cette lettre mystérieuse. L'affaire était complexe parce qu'on ne savait même pas dans quelle langue elle était écrite. Cela pouvait être du français, de l'allemand et elle était seule, il n'y avait pas d'autres documents utilisant ce chiffre. Ils n'avançaient

plus quand ils m'en ont parlé. Il se trouve que mon frère est chartiste et il les a mis en contact avec quelqu'un qui s'occupe des archives chiffrées au ministère des affaires étrangères. Finalement, c'est avec l'aide d'une historienne qu'ils ont réussi. Elle connaissait les types de chiffrement utilisés à l'époque de Charles Quint et ça a donné accès à d'autres textes chiffrés. Ils ont réussi et publié la version claire. Le résultat a d'ailleurs beaucoup intéressé les historiens puisque Charles Quint écrit dans sa lettre qu'il sait que le roi de France complotte contre lui pour le faire assassiner. Alors que les historiens ne pensaient pas qu'il était à ce point conscient du danger. On voit en tout cas l'importance du contexte dans cette histoire.

► **Matapli :** **En mathématiques appliquées, on travaille souvent avec les entreprises. Elles peuvent amener des problèmes, financer des projets. Comment les interactions avec les entreprises se passent en cryptographie ?**

► **A. C. :** Il y a des cryptographes dans certaines entreprises (dans les télécoms, chez Thales, ...) et il y a de plus en plus de startups qui font ou utilisent de la crypto. On a un lien privilégié avec ces collègues, j'ai toujours connu ça. Il arrive aussi plus rarement que des entreprises aient besoin de nous pour de l'expertise, et l'interaction dans ce cas ressemble sans doute plus à ce que vous faites en mathématiques appliquées. Mais en général, la façon qu'on a de travailler avec les entreprises s'apparente beaucoup plus à du travail entre collègues.

► **Matapli :** **On a l'impression que la cryptographie peut être saisie par une suite assez linéaire d'histoires de codages de plus en plus sophistiqués, cassés les uns après les autres. Est-ce que des développements (peut-être dans une période plus récente) viennent contredire cette perception ?**

► **A. C. :** Non, l'impression est bonne. Les systèmes sont de plus en plus sophistiqués et dans la période récente l'effort qu'il faut pour les casser est limité par la puissance de calcul. On peut noter des à-coups. Par exemple quand on parle de factorisation, la courbe de la taille des nombres qu'on factorise en fonction des années au fil du temps est assez linéaire, mais il y a des sauts, comme avec l'arrivée d'internet par exemple qui a permis de distribuer le calcul. Il y a aussi des sauts algorithmiques. C'est un aspect sur lequel on est plus proche des mathématiques appliquées que des mathématiques plus fondamentales : de même qu'il est impossible de saisir le réel dans tous ses détails par des modèles, pour nous, il est impossible de faire un système qui assure une sécurité parfaite. C'est aussi une évolution sans fin.

► **Matapli :** On a parfois l'impression que dans votre pratique de traduction des mathématiques de la Chine ancienne, il y a une rupture : celle où vous décidez de traduire en termes modernes les opérations effectuées. Comment procédez-vous pour fixer ce moment ? Et plus généralement comment se met-on à l'abri du « sacrilège » de l'anachronisme en histoire des maths ?

► **K. C. :** Quand on lit un texte de maths ancien, on est obligé de traduire en termes modernes pour comprendre. On ne peut pas échapper à cette première phase. Mais traduire n'est que la première étape. Ce que doit faire l'historien ensuite, c'est comprendre en quoi le texte qu'il a entre les mains est différent du texte moderne.

Cependant, cette question n'est pas si simple. Pour éclairer la subtilité du problème, je voudrais revenir à Donald Knuth. À partir du moment où les ordinateurs se sont multipliés et que l'algorithmique s'est développée, on a commencé à écrire des textes d'algorithmes, où des termes renvoyaient à des variables assignables. Dans de tels textes, on pouvait par exemple avoir des énoncés du genre  $n = n + 1$ , ou on pouvait avoir des itérations, des conditionnelles. À partir du moment où il y a eu cette nouvelle culture d'écriture, on s'est rendu compte que des textes anciens écrivaient aussi des algorithmes. J'ai publié un article sur la lecture des textes d'algorithmes au fil des ans. Par exemple, il y a des gens qui lisent un texte d'extraction de racines dans *Les Neuf Chapitres* dans les années 50 et qui disent « mais ce terme là, à cet endroit du calcul, il renvoie à ce nombre, à cet autre endroit du calcul, il renvoie à cet autre nombre. Ce texte n'est pas précis, cette manière d'écrire est ambiguë, ça ne va pas du tout, etc. » Donc, ils traduisent le même terme de deux manières en disant le texte est mal formulé. On voit très bien comment n'ayant pas la culture algorithmique, ils lisent de travers, alors qu'une culture en algorithmique donne des outils pour lire de manière moins anachronique.

Donc l'anachronisme, c'est quelque chose d'assez compliqué qui ne se réduit pas à se mettre dans le passé. Parfois, on comprend avec l'aide de choses techniques qui se sont développées très récemment. Ça ne veut pas dire que ce qui s'est fait très récemment, c'est la même chose que des objets anciens. Dans mon article, j'ai essayé de décrire comment on lisait les textes d'algorithmes jusqu'à Knuth, en montrant qu'il avait introduit des manières de lire les textes d'algorithmes qui nous permettent de mieux comprendre des phénomènes dans les textes anciens. Les maths modernes, l'anachronisme, il n'y a pas d'absolu, c'est du doigté.

► **Matapli :** Par curiosité, il y avait-il des algorithmes qui existaient en Chine et qu'on ne voit pas ailleurs ?

► **K. C. :** Les savoirs ont beaucoup circulé dans le monde ancien mais dans *Les Neuf Chapitres*, on trouve par exemple un algorithme pour extraire des racines. Il y a un algorithme comparable, mais avec un texte complètement différent, dans le plus ancien texte de mathématiques en sanscrit. Mais bien sûr, ça n'est pas parce qu'on a un document sanscrit de la fin du v<sup>e</sup> siècle qu'il n'a pas existé quelque chose de plus ancien en sanscrit qui ne nous est pas parvenu. C'est toujours très compliqué d'avancer des dates. Ce que montre cet algorithme chinois, c'est qu'en fait au 1<sup>er</sup> siècle en Chine, on utilise un système positionnel décimal et que l'extraction de racine est réalisée chiffre à chiffre. Il ressemble à l'algorithme avec une puissance semblable à celle d'une division qu'on apprenait il fut un temps à l'école. C'est à peu de choses près l'algorithme qu'on trouve dans *Les Neuf Chapitres* au chapitre 4. Cependant, le plus important dans ce dernier algorithme, c'est son texte. C'est vraiment un texte extrêmement subtil qui a été massacré dans l'interprétation.

► **A. C. :** As-tu déjà vu des algorithmes de cryptographie ?

► **K. C. :** Non, je ne connais rien du tout sur l'histoire de la cryptographie en Chine. Il y a un livre, mais plutôt sur les xviii<sup>e</sup> et xix<sup>e</sup> siècles<sup>5</sup>.

► **Matapli :** Est-ce que vos disciplines sont un peu plus paritaires qu'en mathématiques appliquées ?

► **A. C. :** J'ai les statistiques françaises. Dans le groupe de travail qui s'appelle « codage et cryptographie » de notre GDR (il y a la correction d'erreur), on est à peu près 500. Il y a 210 académiques, dont 40 femmes, soit 18%. Pour les rangs A, on est 11 sur 80, 7 profs et 4 DR donc ça fait 13,7%. C'est la place des femmes et je l'ai vu baisser...

► **K. C. :** Moi pareil !

► **A. C. :** Je l'ai vu baisser partout. Dans mon cours de master, il n'y a plus de filles. Cette année, c'est la fête, j'en ai une sur quinze. C'est une baisse même assez récente, je pense qu'en informatique le pic correspondait à ma génération. Dans mon école d'ingénieurs, on était 25% de femmes. C'est encore pire que les maths, car en informatique, on souffre de cette culture *geek* qui fait que — moi la première — les filles considèrent que ce n'est pas pour elles. Dans la nouvelle filière NSI, il n'y a que des garçons et les rares filles arrêtent toutes à la fin de la première année. Elles sont deux par classe et elles ont l'impression, même si elles ont des bonnes notes, que ce n'est pas pour elles. Je comprends bien cela,

5. <https://blogs.library.columbia.edu/rbml/2019/10/09/chinese-telegraphic-codebooks-and-cryptography/>.

comme je vous l'ai dit, je considérais que ce n'était pas pour moi non plus : je ne jouais pas aux jeux vidéo, je ne bidouillais pas sur un ordi dans mon garage.

► **K. C. :** Je ne suis pas trop capable de répondre à cette question, mais je suis capable de répondre sur la question de l'ambiance au travail. Je trouve qu'on est reparti à la hausse dans des attitudes arrogantes, de personnes qui se pensent extrêmement compétentes. Je me bats avec mes collègues femmes qui commencent leurs exposés en disant « je n'ai pas assez travaillé », « j'aurais dû plus travailler », etc. J'observe que les hommes en général ne font pas ça. Bien sûr, il ne faut pas non plus faire de généralités ! Mais je trouverais important que mes collègues femmes soient moins sincères et plus affirmatives, dans un monde où l'affirmation de soi joue un rôle certain. Dans mon laboratoire, il y a eu un moment où je ne sentais pas trop de machisme. Je sens que ça revient assez fort. C'est un sentiment personnel. J'essaie à mon niveau d'intervenir quand il le faut de façon à ce que les gens se sentent bien, qu'ils aient confiance, mais c'est vrai qu'il est très difficile d'empêcher certaines personnes d'afficher une compétence supérieure... C'est très difficile, mais dans quelques petits espaces où j'évolue, nous arrivons à empêcher ça. Curieusement, c'est surtout quand il y a des femmes qui sont aux commandes qu'il y a moins d'esprit de compétition. Mais, là encore, pas de généralisation hâtive.. Je ne sais pas si tu es d'accord avec cette idée d'un machisme qui revient ?

► **A. C. :** Je réfléchis... j'ai du mal à répondre. Il y a en revanche un phénomène très clair, pas du tout lié à ce que tu viens de dire, c'est que la proportion de femmes est suffisamment faible pour qu'il y ait encore beaucoup d'équipes et de collectifs de travail où il n'y a pas de femmes. À l'Inria, il y a à peu près un tiers des équipes qui n'ont aucune femme parmi les permanents. C'est une catastrophe parce que s'il n'y a pas de femmes, les femmes n'y vont pas. Je le comprends assez bien, j'ai fait un post-doc à l'ETH à Zurich dans une équipe où il n'y avait que des hommes, c'était très dur. C'est un problème qu'à l'Inria on gère très mal.

### Anne CANTEAUT



Anne est directrice de recherche dans l'équipe-projet COSMIQ de l'Inria. Elle est membre de l'Académie des Sciences. Ses recherches portent principalement sur la conception et la cryptanalyse d'algorithmes cryptographiques symétriques et sur l'étude de leurs composants.

**Email :** [anne.canteaut@inria.fr](mailto:anne.canteaut@inria.fr)

**Site web :**

<https://www.rocq.inria.fr/secret/Anne.Canteaut/>

**Karine CHEMLA**

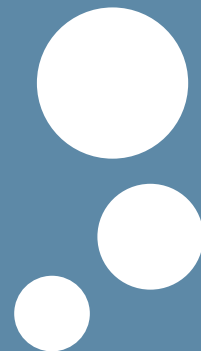
Karine est une mathématicienne française spécialiste d'histoire des mathématiques et de sinologie. Elle est directrice de recherche émérite au CNRS et à l'université d'Edinburgh. Ses thèmes de recherche sont, entre autres, les algorithmes et les démonstrations, les figures, les instruments, les valeurs théoriques, les types de textes (canons, commentaires et autres écrits) et la terminologie des mathématiques. Elle est membre de l'Académie des Sciences.

**Email :** [chemla@univ-paris-diderot.fr](mailto:chemla@univ-paris-diderot.fr)

**Site web :** <http://www.sphere.univ-paris-diderot.fr/spip.php?article78>



# Compte rendu CEMRACS 2025



*par :* \_\_\_\_\_

*Karim AZOUM*

*Igor CHOLLET*

*Guillaume DELAY*

*Mi-Song DUPUY*

*Benoît FABRÈGES*

*Cindy GUICHARD*

*Marie LHANDÉ PINCEMIN*

*Ludovic PERRET*

*Marie POSTEL*

*Olivier RUATTA*

*Pascal TREMBLIN*

*COMITÉ D'ORGANISATION DU CEMRACS 2025<sup>1</sup>*

## **CEMRACS - CALCUL QUANTIQUE** **15 JUILLET - 22 AOUT 2025**

### **Une intrication de mercis**

L'organisation d'un événement tel que le CEMRACS ne peut se faire sans un soutien extérieur au comité d'organisation. Nous remercions la SMAI et plus particulièrement Noura Sahtout et Catherine Choquet, pour leur aide précieuse dans la gestion financière. Un clin d'œil ad hoc à Laurent Boudin, membre de la classe d'équivalence du comité d'organisation. Notre collègue Franck Boyer a

---

1. [cemracs25@smi.emath.fr](mailto:cemracs25@smi.emath.fr)

été d'une aide inestimable grâce à son important travail sur le site web, notamment pour la mise en place de modalités de paiement sécurisé : un grand merci à lui. Nous sommes également reconnaissant-e-s envers Sabine Mehr et Félix Gi-vois, de GENCI, qui nous ont aidés à la prise de contact avec les industriels. Une mention spéciale à Yvon Maday, qui a su nous transmettre sa vitalité et son expérience du CEMRACS. Nous saluons également toute l'équipe du CIRM, aussi bien pour la gestion que pour la restauration, l'hôtellerie et le service informatique. Pour conclure, un immense merci à tou-te-s les participant-e-s pour leur enthousiasme et leur énergie!

## Une mesure de la thématique

---

Le CEMRACS 2025, consacré au calcul quantique, a répondu au besoin de sensibiliser la communauté mathématique à une thématique déjà centrale dans des disciplines voisines (informatique, physique, chimie) et en plein essor dans le monde industriel. L'événement a également permis de motiver de jeunes chercheur-euse-s en illustrant la richesse des sujets possibles ainsi que leurs liens avec des domaines mathématiques « traditionnels », tels que l'algèbre linéaire, l'optimisation ou la combinatoire. Ces objectifs ont été atteints grâce à la mise en place de huit projets proposés par des entreprises et quatre issus du monde académique. La première semaine de cours a rassemblé soixante-seize participant-e-s sur site (hors comité d'organisation et intervenant-e-s) et quarante-neuf en ligne. Trente-deux participant-e-s ont pris part aux cinq semaines de projets.

## La superposition d'états logistiques

---

Les actions à mener ont été nombreuses : communication, page web, gestion financière, recherche de moyens de calcul, recrutement des intervenant-e-s, élaboration du planning de l'école, prospection et recrutement pour les projets, ainsi que l'organisation avec le CIRM et la SMAI. Nous étions donc ravi-e-s d'être nombreux-euses au sein du comité d'organisation. Pour éviter toute décohérence avant l'échéance, Marie Postel a notamment pris en charge la coordination de l'ensemble. Nous nous sommes réparti-e-s les tâches, principalement en duo ou trio. L'effectif de l'équipe a également été un atout quant à la présence sur site pendant toute la durée de l'événement. À noter que, pour cette édition du CEMRACS, nous avons pu bénéficier de l'expertise de collègues de Teratec, notamment sur les aspects communication : création de l'affiche, visibilité sur le réseau

social LinkedIn, ou encore la mise en place d'un serveur Discord ouvert aux participant-e-s.

Une particularité de cette édition 2025 a été le besoin en logiciels et moyens de calcul adaptés au quantique. En effet, la simulation de circuits quantiques peut se révéler gourmande en ressources informatiques, en particulier en termes de mémoire consommée pour stocker les objets en jeu (dont la taille est exponentielle en le nombre de qubits). Différentes ressources de calcul pour ces simulations ont ainsi été mises à disposition. Notamment, le serveur de simulation quantique QLM (développé par Eviden) du centre de calcul régional ROMEO de l'université de Reims Champagne-Ardenne a pu garantir aux participant-e-s des accès pour la réalisation des séances de travaux pratiques de l'école tout comme pour les calculs nécessaires à la réalisation de certains projets. Le cluster MAGI de l'université Sorbonne Paris Nord était également disponible durant toute la durée de l'événement, avec deux nœuds de calcul spécifiques (avec une large mémoire RAM), adaptés aux simulateurs de circuits quantiques et exploités pour la session projet.

Nous avons également préparé à l'avance quelques ordinateurs avec une installation adéquate pour pouvoir, si besoin, les prêter. Nous remercions Kévin Baslé, de Sorbonne Université, pour son aide à ce sujet.



## Circuit et financement quantique

L'état initial du CEMRACS remonte au printemps 2024. Des échanges avec le CIRM, visant à présenter le projet puis à faire le point sur son avancement, ont eu lieu en mai et octobre 2024. La recherche de soutiens financiers et de financements pour les projets a été lancée à partir de mai 2024 et s'est poursuivie jusqu'à l'approche de l'événement.

Sur le plan financier, les frais d'inscription à l'école couvraient l'hébergement en pension complète pour la semaine, avec une légère majoration pour les inscriptions tardives ou les non-adhérent·e·s à la SMAI. Un forfait fixe de cent euros était demandé pour une participation en ligne à l'école. Il a aussi fallu trouver des soutiens pour prendre en charge les missions des orateur·rice·s, celles des membres du comité d'organisation, ainsi que pour assumer certains frais, comme les repas améliorés, un cocktail, les pauses café et les goûters.

Nous avons pu bénéficier de l'aide de certains laboratoires ou institutions dont dépendaient des membres du comité d'organisation. Des partenaires historiques ont également répondu présents, tels que AMIES, le CIMPA, le CNRS-MITI, l'EMS, le groupe Calcul et Inria.

Un atout de la thématique réside aussi dans l'émergence d'appels à projets orientés « quantique », auxquels nous avons pu répondre. Cela nous a permis d'obtenir le soutien de structures comme le PCQT ou encore le Réseau Thématique Optimisation.

#### Proposition

- Comme mentionné dans le CR du CEMRACS 2023, la question de savoir si une structure de type *Fondation* serait plus adaptée à cet événement nous semble toujours ouverte (dans l'optique de simplifier et de pérenniser l'organisation et la gestion de l'événement).

## La semaine d'école d'été

La gestion de l'évènement a bénéficié cette année du site internet développé par Franck Boyer qui a permis aux personnes de s'inscrire en ligne en donnant de nombreuses informations concernant leur hébergement ou leurs préférences alimentaires. Un système de jauge assurait que les capacités du CIRM, à la fois en termes d'hébergement mais aussi en termes de présence sur site (pour la restauration ou l'amphithéâtre), ne soient pas dépassées. Les paiements ont également pu se faire en ligne, ce qui a grandement simplifié la gestion des inscriptions. Un paiement unique regroupait l'inscription à l'école d'été et l'hébergement au CIRM. Tout ceci répond à une recommandation faite par le comité d'organisation de l'édition 2023 et dont pourront bénéficier les prochaines équipes organisatrices.

Nous avons ouvert les inscriptions mi-février et avons fortement communiqué à partir de ce moment (listes de diffusion, affiche, annonces dans des conférences thématiques, ...). Le remplissage des capacités du CIRM s'est fait

de manière très progressive et ce n'est que vers le mois de juin que nous avons atteint les jauges que l'on s'était fixées (environ quatre-vingt-dix personnes sur place en comptant le comité d'organisation et les orateur·rice·s). L'hébergement au CIRM était proposé uniquement avec une formule incluant toute la semaine d'école pour inciter tout le monde à rester sur place pour l'ensemble de l'évènement. Nous avons également ouvert la possibilité de participer à l'école à distance. Quarante-neuf personnes ont pu bénéficier de cette option.

Comme indiqué précédemment, notre école d'été se situait à la croisée de plusieurs disciplines. Cela s'est concrétisé par l'intervention de huit orateur·rice·s issu·e·s des mathématiques, de la physique et de l'informatique. De plus, deux domaines applicatifs étaient ciblés : le calcul scientifique et la cryptographie. Cela nous a amenés à organiser deux sessions parallèles pour les derniers cours qui étaient les plus spécialisés. Nous n'avons pas demandé à l'avance aux participant·e·s de s'inscrire à l'une ou l'autre de ces sessions, la répartition s'est faite naturellement.

Notons une difficulté particulière cette année : le lundi de la semaine d'école tombait le quatorze juillet. Nous avons donc dû étaler les cours du mardi au samedi matin, sans demi-journée de repos. Cela a pu rendre la semaine particulièrement dense.

Les retours concernant l'école d'été étaient plutôt positifs pour les participant·e·s en présentiel et plus mitigés pour celles et ceux à distance. En cause principalement, quelques soucis techniques survenus le vendredi et qui semblent difficiles à éviter dans un format hybride. Par ailleurs, l'encadrement des travaux pratiques n'était disponible qu'en présentiel, ce qui a également pu influencer ces retours.

Toutes les présentations ont été enregistrées et sont disponibles en ligne sur la chaîne YouTube du CIRM. Nous remercions le CIRM pour la rapidité avec laquelle ces vidéos ont été produites et mises en ligne. Les participant·e·s pouvaient ainsi les consulter dès le début des projets. Nous avons également proposé aux intervenant·e·s de l'école de publier leurs notes de cours sous la forme d'un acte de conférence, qui sera regroupé avec ceux des projets.

### Propositions

- Bien communiquer en amont sur le contenu et les modalités proposés pour la participation à distance.
- Annoncer dès le départ, aux orateur·rice·s, la possibilité de publier des notes de cours, qui suivront le même calendrier et modalités de relecture que les actes des projets.

## Les cinq semaines de projets

La session de projets du CEMRACS 2025 a réuni trente-deux participant-e-s, dont dix internationaux-ales et trois soutenu-e-s par le CIMPA, illustrant ainsi l'attractivité de l'événement. La sélection a été finalisée, pour la majorité des candidat-e-s, entre la fin mai et le début juin. A noter que les lauréat-e-s du CIMPA ont été notifié-e-s dès le mois d'avril. En outre, des acceptations plus tardives ont été intégrées afin de pourvoir les places restées disponibles à la suite des dernières propositions de projets.

La thématique du calcul quantique, ainsi que le démarchage mené avec l'aide des contacts de GENCI et grâce à une présentation ciblée organisée en visio-conférence par Teratec, nous ont permis d'obtenir de nombreux projets industriels : huit sur douze. Il nous semble souhaitable de transmettre, d'une année sur l'autre, une liste de contacts industriels potentiellement intéressés.

La création d'une équipe par projet s'est appuyée sur les vœux des participant-e-s et leur dossier, favorisant ainsi l'adéquation entre compétences et thématiques. Toutefois, le désistement de dernière minute de deux participant-e-s américain-e-s, une semaine avant le début de l'événement, soulève des questions sur la fiabilité des engagements dans ce type de format intensif et invite à repenser la gestion des listes d'attente afin de limiter les impacts logistiques.

L'encadrement des projets a varié d'une équipe à l'autre. Certaines équipes ont bénéficié de la présence de plusieurs encadrant-e-s, qui se sont relayé-e-s sur place pendant la majorité des cinq semaines. D'autres encadrant-e-s sont venu-e-s en début de projet pour le lancer, puis ont assuré un suivi régulier par visioconférence. Enfin, certaines équipes d'encadrement ne se sont pas déplacées sur place. L'expérience montre qu'il n'est pas indispensable d'avoir un-e encadrant-e présent-e en continu, mais qu'il est fortement recommandé : d'organiser une rencontre en présentiel avec les encadrant-e-s dès le début du projet, et de prévoir des réunions régulières, en présentiel ou à distance. Par ailleurs, il semble judicieux qu'au moins un-e membre de l'équipe d'encadrement soit présent-e sur place, les derniers jours, à l'occasion des exposés de fin de projets.

Il est extrêmement difficile de constituer à l'avance les groupes de travail et de leur attribuer un sujet. Plusieurs éléments viennent en effet perturber les équilibres, y compris après le début de l'école d'été. Tout d'abord, la liste définitive des projets n'a été finalisée qu'une semaine avant le début de l'événement, certains projets ayant été ajoutés dans le dernier mois, alors que l'appel était déjà clos. De même, les candidatures des participant-e-s ont continué d'arriver jusqu'au dernier mois précédant l'école. Enfin, comme évoqué précédemment, des désistements sont survenus au dernier moment. En conséquence, l'attribu-

tion définitive des projets n'a pu être faite qu'à la fin de la semaine d'école. Bien qu'il serait idéal de pouvoir communiquer cette information plus tôt, cela s'avère difficile en pratique.

De nombreux·ses participant·e·s et quelques encadrant·e·s ont découvert, pendant les semaines de projet, les modalités de publication d'un acte de conférence issu des travaux réalisés pendant le CEMRACS (calendrier, template, objectifs et conseils de rédaction). Il faudrait donc veiller à la communication en amont sur cette opportunité, par exemple via le site web.



### Propositions

- Disposer d'un carnet d'adresses d'industriels, géré par la SMAI ou par une fondation, afin de faciliter une prise de contact plus rapide.
- Informer les participant·e·s que leur affectation à un projet sera tardive, en raison des contraintes d'organisation.
- Prévenir bien à l'avance les participant·e·s des modalités de publication d'un acte de conférence.
- Demander à au moins un·e encadrant·e par projet d'être présent·e au début et à la fin de la période de cinq semaines, et planifier clairement l'encadrement hybride, notamment en précisant la fréquence du suivi.

## Feedback des participant·e·s

---

Le questionnaire envoyé à la fin de la première semaine a recueilli vingt-quatre réponses de participant·e·s présent·e·s au CIRM sur soixante-seize, ainsi que cinq réponses de participant·e·s à distance sur quarante-neuf inscrit·e·s. Les questions quantitatives indiquent un bon niveau de satisfaction, bien qu'elles restent peu exploitables. En revanche, les commentaires libres ont permis d'identifier plusieurs pistes d'amélioration, portant notamment sur le site web, les cours en format hybride et l'hébergement. Ces remarques ont été transmises à la prochaine équipe organisatrice ainsi qu'au CIRM. Le niveau scientifique de l'école a été jugé positivement.

Le questionnaire adressé aux trente-deux participant·e·s aux projets a reçu sept réponses d'encadrant·e·s et vingt-et-une réponses de jeunes. Il ne comportait pas de questions quantitatives. Là encore, des suggestions d'amélioration concernant l'hébergement et la restauration ont été transmises au CIRM. Sur le plan organisationnel, il apparaît qu'un plus grand nombre d'animations péri-scientifiques (apéritifs, balades) aurait été apprécié. Sur le plan scientifique, les jeunes ont exprimé le souhait que les projets soient attribués plus en amont, qu'une présentation générale soit proposée en début de période, et que la gestion des salles de réunion soit améliorée.

## Actes de conférence du CEMRACS

---

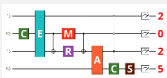
La dernière étape nécessaire à la finalisation de ce CEMRACS concerne le processus de publication des actes de conférence issus des projets, ainsi que des notes de cours pour les orateur·rice·s qui le souhaitent. L'équipe d'organisation souhaite publier ces actes de conférence à la fin de l'année 2026, afin que les jeunes participant·e·s puissent valoriser ce travail dans leurs futurs projets professionnels. A cet effet, la date limite de soumission a été fixée à la fin janvier 2026.

Cette année, le comité d'organisation était particulièrement étoffé. Un sous-groupe plus restreint compose un comité éditorial qui mènera à bien ce travail d'édition, en lien avec l'un·e des éditeur·rice·s en chef de la revue : *ESAIM : Proceedings and Surveys*.

### Proposition

- Penser, en amont de la fin du CEMRACS, à la constitution du comité éditorial. Cette discussion doit nécessairement inclure l'équipe organisatrice ainsi que les éditeur-riche-s en chef, et pourquoi pas, impliquer des membres du comité scientifique si le contexte le suggère.

### COMITÉ D'ORGANISATION DU CEMRACS 2025



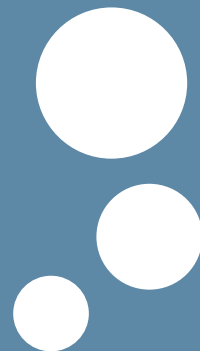
Centre d'Été Mathématique de Recherche Avancée en  
Calcul Scientifique

**Email :** [cemracs25@smail.emath.fr](mailto:cemracs25@smail.emath.fr)

**Site web :** <https://cemracs2025.math.cnrs.fr/en/>



# Hommage à Peter D. Lax (1926-2025)



*par :*

*Grégoire ALLAIRE<sup>1</sup> – École polytechnique, CMAP*

*Henri BERESTYCKI<sup>2</sup> – EHESS, CAMS*

*François GOLSE<sup>3</sup> – École polytechnique, CMLS*

*Jeffrey RAUCH<sup>4</sup> – University of Michigan,  
Department of Mathematics*

---

## TABLE DES MATIÈRES

<b>1 Peter Lax, un mathématicien dans le siècle</b> . . . . .	102	<b>4 Asymptotique haute fréquence</b> . . . . .	116
<b>2 Lois de conservations et systèmes intégrables</b> . . . . .	107	<b>5 Conclusion</b> . . . . .	119
<b>3 Mathématiques et calcul</b> . . . . .	114	<b>Références</b> . . . . .	119

Peter David Lax est décédé le 16 mai 2025 à l'âge de 99 ans. C'est une figure historique des mathématiques et du calcul scientifique qui nous a quittés après une vie extrêmement riche et féconde au cours de laquelle il a posé les bases mathématiques de la mécanique des fluides compressibles, du calcul numérique des ondes de choc, de la théorie du *scattering*, des systèmes intégrables, des solitons et de l'analyse numérique des équations aux dérivées partielles. Son influence a été et est toujours immense, aussi bien en mathématiques que dans d'autres disciplines comme, par exemple, la mécanique des fluides numérique. Après une première section qui donnera quelques repères biographiques et tracera son portrait, les trois sections suivantes essaieront de montrer sur quelques exemples la profondeur de ses idées et leur impact durable qui façonnent les mathématiques appliquées aujourd'hui encore.

---

1. [gregoire.allaire@polytechnique.fr](mailto:gregoire.allaire@polytechnique.fr)  
2. [Henri.Berestycki@ehess.fr](mailto:Henri.Berestycki@ehess.fr)  
3. [francois.golse@polytechnique.edu](mailto:francois.golse@polytechnique.edu)  
4. [rauch@umich.edu](mailto:rauch@umich.edu)

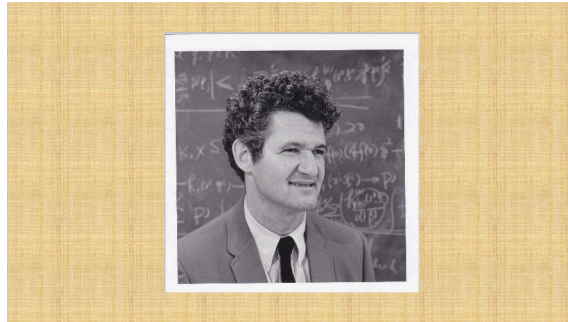


FIGURE 1 — Peter Lax (crédit James Lax)

### 1 Peter Lax, un mathématicien dans le siècle

Peter Lax a été l'un des très grands mathématiciens qui aura marqué toute la seconde moitié du  $xx^e$  siècle. Son œuvre témoigne de l'unité profonde des mathématiques, allant de travaux fondamentaux, jusqu'aux méthodes numériques et à la résolution de problèmes concrets. Ils couvrent souvent ces différents aspects simultanément, mobilisant les outils les plus théoriques de l'analyse pour résoudre des problèmes parfois très appliqués. Cette approche ouverte fut au fondement de la vision de Peter Lax qui refuse la dichotomie entre mathématiques pures et appliquées et encore moins de hiérarchie de valeur entre elles. L'œuvre de Peter Lax a fait considérablement progresser l'analyse des équations aux dérivées partielles non linéaires ainsi que les méthodes pour les résoudre numériquement. Peter Lax aura compris très tôt la puissance des mathématiques, l'importance du calcul scientifique et des interactions des mathématiques avec des domaines scientifiques ou industriels variés. Il a modifié la façon de faire des mathématiques appliquées.

Le talent mathématique exceptionnel de Peter Lax s'est révélé très tôt. Dès son jeune âge en Hongrie, par l'intermédiaire de l'un de ses oncles et ses professeurs, il lit des ouvrages avancés de mathématiques. C'est ainsi qu'en arrivant à New York, alors qu'il n'a pas fini le lycée, il a déjà des connaissances très étendues. Dans la génération de Peter Lax, il y a eu en Hongrie un vivier extraordinaire de jeunes mathématiciens. Interrogé sur ce qui avait permis ce miracle hongrois, Peter Lax en attribuait l'origine à János Bolyai (un des inventeurs de la géométrie non-euclidienne au  $xix^e$  siècle), devenu une sorte de héros populaire en Hongrie et qui va inspirer toute une génération ainsi qu'à diverses personnalités qui avaient eu à cœur de faire émerger les talents scientifiques. Alors que les lois racistes en Hongrie se font sentir, la famille Lax sera parmi

les dernières à échapper à l'étau qui se ferme sur les juifs. Quittant la Hongrie en novembre 1941 par train vers Lisbonne, la famille Lax traversera l'Europe en guerre et passera par l'Allemagne. Elle embarquera dans le dernier bateau de passagers américain. Pendant la traversée a lieu en effet l'attaque de Pearl Harbor en décembre 1941 et sa famille sera (brièvement) retenue à Ellis Island à leur arrivée à New York, comme venant d'un pays devenu ennemi au cours de la traversée. Des personnalités scientifiques en Hongrie, Rósz Péter et Dénes König, avaient écrit à des émigrés hongrois aux États-Unis, et non des moindres, John von Neumann et Gábor Szegő (parent et proche de la famille Lax) notamment, pour les prévenir de l'arrivée de Peter Lax. C'est donc en jeune prodige que Lax est accueilli aux États-Unis à l'âge de 15 ans et demi. Sur la recommandation de Szegő, il rencontre Richard Courant qui est enthousiaste mais... il lui faut d'abord finir ses études au lycée! Ce dont il s'acquittera en une année en suivant surtout des cours de littérature et d'histoire.

Il s'inscrit à NYU l'année suivante. Il connaît déjà beaucoup de mathématiques et suit surtout des cours avancés. Il interagit aussi avec Paul Erdős et son premier article, dès sa sortie du lycée, porte sur une question posée par Erdős. Au cours d'une de ses visites à Princeton, Erdős le présentera à Einstein. Peter évoquait cette scène avec amusement en se souvenant qu'il avait été introduit comme « brillant mathématicien hongrois » et il se demandait pourquoi Erdős l'avait qualifié de mathématicien hongrois. À 18 ans, il est mobilisé par l'armée dans les États-Unis en guerre. Après une période de formation militaire, il est envoyé, d'abord à Texas A&M, pour une formation dans le génie. Il est rapidement affecté à Los Alamos pour intégrer le projet Manhattan en juin 1945, quelque six semaines avant l'explosion de la première bombe atomique. Il semble que ce soit dû à la recommandation de Courant. On sait que dans ce projet se retrouvent les plus grands scientifiques aux États-Unis et un grand contingent d'émigrés européens — comme Peter Lax. Nombre de scientifiques, physiciens et mathématiciens, juifs hongrois émigrèrent aux États-Unis dans les années qui précédèrent la guerre, parmi lesquels Edward Teller, Eugene Wigner, George Pólya, John von Neumann, Leo Szilard, Paul Erdős, Paul Halmos, Theodore Von Kármán et Peter Lax. Ce groupe était surnommé « les Martiens » en raison d'une boutade de Szilard. En réponse au paradoxe de Fermi sur la question de savoir pourquoi il n'y a pas de preuve de l'existence de vie extraterrestre, Szilard disait que les martiens sont en fait déjà parmi nous sur terre; on les reconnaît parce qu'ils parlent avec un étrange accent et se font appeler hongrois.

Entre l'armée, son travail à Los Alamos, des séjours à Stanford, la trajectoire de Peter Lax est tout sauf linéaire. En rassemblant des crédits de cours épars obtenus entre NYU, Texas A&M, l'Université du Nouveau Mexique, et Stanford,

sans jamais avoir été véritablement étudiant il obtient une licence en 1947. Il soutiendra son doctorat en 1949, sous la direction de Kurt Otto Friedrichs. Peter reconnaîtra l'influence décisive de Friedrichs sur ses travaux ainsi que sur nombre de ses condisciples, dont Louis Nirenberg et Cathleen Morawetz, comme Harold Grad et Joe Keller qui les avaient précédés. Dans ce creuset de talents exceptionnel, Lax évoquera la tradition d'entraide et collaboration entre étudiants plutôt que de compétition. Un état d'esprit voulu par Courant et qui se perpétuera dans le Courant Institute dans les années qui ont suivi. Peter Lax retournera à Los Alamos pour une année en 1949, puis continuera de travailler comme conseiller scientifique à Los Alamos où il fera des séjours réguliers par la suite. C'est à Los Alamos que Peter dit avoir compris l'importance des mathématiques appliquées. Peter Lax a eu l'occasion d'assister à des séances avec von Neumann à Los Alamos où défilaient des scientifiques de toutes disciplines qui exposaient leurs recherches et leurs questions. Peter se souvenait de l'impatience constante de von Neumann qui comprenait avant que ses interlocuteurs aient fini d'expliquer et leur demandait toujours d'aller plus vite. Ces périodes et les suivantes passées à Los Alamos joueront un rôle considérable dans la formation de Peter Lax. D'abord par l'effervescence scientifique et intellectuelle exceptionnelle qui en caractérisait l'atmosphère. Plus tard, Peter Lax aura toujours à cœur de favoriser le recrutement des personnes les plus brillantes autour de lui. Et puis par ce que les frontières entre disciplines étaient ouvertes, au service d'un projet commun. Ce qui conduira Peter Lax à considérer les mathématiques comme intrinsèquement en dialogue avec d'autres disciplines. Ensuite parce que c'est à Los Alamos que Peter Lax, dans le sillage de von Neumann, comprend toute l'importance du calcul et des méthodes numériques. Enfin, parce que le talent et la puissance scientifique réunis à Los Alamos qui ont permis l'aboutissement de ce projet ont convaincu Peter Lax du pouvoir de la science et des mathématiques tout particulièrement. Cette conviction ne le quittera pas. Tout au long de sa vie, il a expliqué que les mathématiques étaient un outil incomparable pour intervenir dans le monde.

Von Neumann fut l'un des premiers à reconnaître l'importance du calcul scientifique dans le cadre du projet mené à Los Alamos et la nécessité de développer des méthodes nouvelles pour résoudre les équations aux dérivées partielles (EDP). Il consacra une bonne partie de son activité scientifique à tous les aspects du calcul : depuis la construction des ordinateurs jusqu'aux méthodes de discrétisation. Peter Lax aura l'occasion d'interagir avec von Neumann à Los Alamos où ce dernier passait un mois tous les étés. Il avait la plus grande admiration pour von Neumann dont il disait qu'il était le « cerveau le plus puissant qu'il lui ait été donné de rencontrer ». Von Neumann a sans doute été un modèle

pour Peter Lax. Par plusieurs aspects, Peter Lax en fut le digne continuateur. On peut voir cette filiation à l'œuvre dans la défense constante de la science et la conviction qu'il arrivait à faire partager, y compris dans les sphères de pouvoir, de l'importance stratégique de la recherche scientifique académique au plus haut niveau. Dans le sillage de von Neumann, Peter Lax a toujours eu le souci de disposer des moyens de calcul les plus performants. Membre du *National Science Board*, un organisme de conseil au gouvernement pour les grands choix scientifiques et techniques, de 1980 à 1986, Peter Lax présida un comité qui préconisa de permettre l'accès de chercheurs universitaires à des super-calculateurs utilisés jusque-là par les seuls militaires aux États-Unis. Le rapport Lax de 1982 exerça une influence décisive dans le déploiement par la *National Science Foundation* (NSF) à partir de 1985 de cinq centres de calcul d'une nouvelle génération dans des centres universitaires aux USA qui marqua l'avènement d'une nouvelle ère pour le calcul scientifique.

Toute la carrière de Peter Lax se déroulera dans ce qui devait devenir le *Courant Institute of Mathematical Sciences de New York University*, institut auquel il était profondément attaché, comme il resta attaché à la personne de Richard Courant après leur première rencontre. Avec son talent exceptionnel d'organisateur, sa vision du rôle des mathématiques et une sûreté incomparable dans ses choix scientifiques, Richard Courant, aura réussi à établir un centre international de première importance à New York. Le Courant Institute a été longtemps la *Mecque* des EDP et des mathématiques appliquées, avec des personnalités telles que Kurt Friedrichs, Fritz John, Joe Keller, Peter Lax, Louis Nirenberg, Cathleen Morawetz, James Glimm, Paul Garabedian, Henry McKean, James Stoker, Harold Grad, Ragu Varadhan, Jurgen Möser, George Papanicolaou parmi d'autres. Donner un séminaire le jeudi matin devant ce parterre avait de quoi impressionner les jeunes mathématiciens en visite à l'Institut. La réussite de ce centre doit beaucoup à l'état d'esprit que Courant a insufflé et qui a fait que les gens s'y trouvaient bien et avaient plus à cœur de coopérer que de se livrer à des luttes de pouvoir. Autour de Richard Courant s'était organisée comme une famille qui se retrouvait régulièrement dans la maison des Courant.

La personnalité de Peter Lax a certainement joué un rôle essentiel dans le fonctionnement de ce groupe. Il dirigea le Courant Institute de 1972 à 1980. Cette période correspond à un âge d'or au Courant Institute. Sa bonne humeur et son humour, son esprit pénétrant faisaient de chaque rencontre avec lui un plaisir intellectuel, scientifique et humain incomparable. Il pouvait ainsi évoquer des sujets même sérieux avec recul et amusement et toujours beaucoup d'esprit. Par exemple, en évoquant les nombreuses controverses qui émaillent les discussions entre mathématiciens appliqués, il constatait qu'« il est regrettable

que ces débats souvent acrimonieux dégagent plus de chaleur que de lumière ». L'amitié fraternelle qui liait Louis Nirenberg et Peter Lax fut l'un des axes structurant de la famille du Courant Institute. S'étant rencontrés alors qu'ils étaient encore étudiants, leur proximité et admiration mutuelle ne s'est jamais démentie. Les enfants de Peter et Louis se considéraient comme cousins et voyaient l'un ou l'autre comme leurs oncles. Les deux familles habitaient l'*Upper West Side* à Manhattan et se retrouvaient régulièrement, notamment pour les fêtes familiales.

La philosophie de Peter Lax affirmant l'unité profonde des mathématiques et l'absence de frontières entre mathématiques pures et appliquées a profondément influencé le Courant Institute. En cela, il a été le continuateur de Richard Courant lui-même et de von Neumann. Peter Lax déclarait « Je ne change pas de tête en passant de problèmes théoriques à des problèmes appliqués ». Il estimait aussi que l'on cause un tort considérable à l'« entreprise mathématique » en général si on cherche à séparer ces deux versants. Il aimait à citer la boutade provocatrice de Joe Keller, affirmant que « les mathématiques pures sont une branche des mathématiques appliquées ». Peter Lax considérait en effet qu'à l'origine de nombreux développements mathématiques se trouvent des applications. Les succès de Peter Lax doivent beaucoup à sa personnalité et à sa force d'entraînement. On peut le constater dans la manière dont il arrivait à faire partager ses convictions, dans les orientations de politique scientifique qu'il a imprimées aux États-Unis, dans la direction du Courant Institute, comme par les quelque cinquante-cinq étudiants qu'il a formés et dont nombre comptent aujourd'hui parmi les mathématiciens les plus importants aux États-Unis.

Peter Lax ne s'est jamais départi de son accent hongrois. Il combinait le charme un peu désuet de l'empire austro-hongrois, une forme de politesse vieille Europe avec toute l'efficacité américaine. Homme de culture, notamment passionné par l'art et la poésie, c'était un bonheur de l'accompagner dans les galeries et musées que ce soit à New York ou à Paris. On ne pouvait qu'être fasciné par la chaleur humaine, le charme, l'humour, la générosité qui caractérisaient Peter Lax et ce que l'on pourrait appeler son charisme doux qui ne laissaient pas toujours deviner la fermeté de ses convictions et son caractère déterminé. Peter Lax a été un immense savant. Mathématicien visionnaire, ses travaux ont révolutionné la théorie des équations aux dérivées partielles non linéaires, la physique mathématique et le calcul scientifique. Nous n'en donnerons qu'un aperçu très partiel dans les pages qui suivent. Les qualités humaines hors du commun de Peter Lax ont aussi participé au retentissement de son œuvre scientifique, à l'extraordinaire force d'entraînement qu'il représentait pour plusieurs générations de mathématiciens et à ce qu'il a pu accomplir au service des mathématiques.



**FIGURE 2** — Peter Lax, Metropolitan Museum of Art, New York, 1992 (crédit Geraldine Kaylor)

## 2 Lois de conservations et systèmes intégrables

Au printemps de 1945, Peter Lax, alors sous les drapeaux, fut envoyé au laboratoire de Los Alamos. Il y retrouva John von Neumann, hongrois comme lui, de 23 ans son aîné, déjà très célèbre et fort occupé, mais toujours prêt à discuter de mathématiques avec son jeune compatriote. On retrouvera l'écho de ces discussions dans les travaux de Peter Lax jusque dans les années 1990.

L'un des problèmes mathématiques les plus importants étudiés à Los Alamos était la propagation des ondes de choc, sujet auquel von Neumann a consacré plus de 200 pages de ses œuvres complètes (voir pp. 178–412 dans [32]). Le compte-rendu d'une discussion entre von Neumann, Burgers, Heisenberg et von Kármán sur les équations de l'aérodynamique (pp. 348–356 dans [32]) à l'été 1949 montre que la question des ondes de choc, et celle de l'unicité des solutions des équations de la mécanique des fluides, qui en découle (p. 161, note 1 dans [23]), sont alors très loin d'être parfaitement comprises.

L'apport de Peter Lax à cette théorie est considérable. Dès 1954 [23], il propose une définition systématique de la notion de solution faible d'un système de lois de conservation d'inconnue  $U \equiv U(t, x) \in \mathbf{R}^n$ , et de flux  $F \in C^1(\mathbf{R}^n; \mathbf{R}^n)$  :

$$\partial_t U(t, x) + \partial_x F(U(t, x)) = 0, \quad x \in \mathbf{R}, \quad (1)$$

supposé hyperbolique (c'est-à-dire que la matrice  $(\partial F_j / \partial U_k)_{1 \leq j, k \leq n}$  est diagonali-

sable à valeurs propres réelles en tout point de  $\mathbf{R}^n$ ), évoque le rôle de l'entropie dans l'unicité de la solution, et propose le schéma numérique (appelé aujourd'hui « schéma de Lax-Friedrichs »)

$$\frac{U_\ell^{k+1} - \frac{1}{2}(U_{\ell+1}^k + U_{\ell-1}^k)}{\Delta t} + \frac{F(U_{\ell+1}^k) - F(U_{\ell-1}^k)}{2\Delta x} = 0 \quad (2)$$

(où on a noté  $U_\ell^k \approx U(k\Delta t, \ell\Delta x)$ ) pour en calculer « la » solution faible physiquement intéressante. Le système d'Euler des équations de la dynamique des gaz est l'exemple le plus fondamental de cette classe de systèmes non linéaires. Peter Lax applique ce schéma au cas particulier où  $n = 1$  et  $F(U) = \ln(a + be^U)$ , et conjecture sur la base de cet exemple<sup>5</sup> que, toujours dans le cas  $n = 1$  et pour tout  $F \in C^2(\mathbf{R})$  telle que  $F'' > 0$  sur  $\mathbf{R}$ , la solution faible obtenue comme limite du schéma ci-dessus converge pour presque tout  $(t, x)$  vers l'expression dite « formule de Lax-Oleinik » (voir p. 146 dans [3])

$$U(t, x) = (F^*)' \left( \frac{x - y(t, x)}{t} \right), \quad (3)$$

$$\text{où } y(t, x) := \arg \min \left( \int^y U(0, z) dz + tF^* \left( \frac{x - y}{t} \right) \right),$$

et où  $F^*$  est la transformée de Legendre<sup>6</sup> de la fonction strictement convexe  $F$ .

Un article ultérieur, paru en 1957 [18], donne la solution faible « physique » du problème de Riemann pour le système (1), c'est-à-dire le problème de Cauchy dont la donnée initiale est de la forme

$$U(0, x) = U_g \quad \text{pour tout } x < 0, \quad U(0, x) = U_d \quad \text{pour tout } x > 0,$$

pour tous  $U_g, U_d$  tels que  $|U_d - U_g|$  soit assez petit. Dans le cas de la dynamique des gaz, ce problème correspond à un tube infini dont une membrane rigide séparerait deux régions où le gaz se trouverait dans deux états d'équilibre différents (avec des pressions et des températures différentes, par exemple). À l'instant initial, on supprime la membrane, et la solution du problème de Riemann décrit l'évolution ultérieure du gaz dans la totalité du tube. La solution du problème est obtenue en raccordant des ondes de détente (solutions de la forme  $U(t, x) = u(x/t)$ , régulières sauf pour  $t = 0$ ), et des ondes de choc, présentant une discontinuité de première espèce<sup>7</sup>, de la forme  $U(t, x) = u_g \mathbf{1}_{x < st} + u_d \mathbf{1}_{x > st}$ .

5. Où la solution numérique fournie par le schéma ci-dessus est calculable simplement.

6. Donnée par la formule  $F^*(p) = \sup_{u \in \mathbf{R}} (pu - F(u))$ .

7. Dire qu'une telle fonction  $U$  est solution faible de (1) équivaut aux relations de Rankine-Hugoniot :  $s(u_d - u_g) = F(u_d) - F(u_g)$ , où  $s$  est la vitesse de propagation de l'onde de choc.

Le raccord en question consiste à intercaler entre  $U_g$  et  $U_d$  des états constants  $U_1, \dots, U_{n-1}$  dans des domaines de la forme  $s_{j-1} < x/t < s_j$ , sachant que  $U_{j-1}$  est relié à  $U_j$  par une onde de détente ou par une onde de choc. De plus, Peter Lax identifie la « condition d'entropie » permettant de sélectionner, parmi toutes les solutions faibles du problème de Riemann, celle qui est physiquement admissible : elle ne doit comporter que des chocs dont les états  $u_g, u_d$  et la vitesse de propagation  $s$  vérifient, pour une certaine valeur de  $k = 1, \dots, n$ , les inégalités

$$\max(\lambda_{k-1}(u_g), \lambda_k(u_d)) < s < \min(\lambda_k(u_g), \lambda_{k+1}(u_d)) \quad (4)$$

où  $\lambda_1(U) \leq \dots \leq \lambda_n(U)$  sont les valeurs propres (comptées avec leurs multiplicités) de la matrice  $(\partial F_j / \partial U_k)_{1 \leq j, k \leq n}$ . Ce résultat est absolument fondamental, car il constitue la brique élémentaire permettant de construire la solution faible physiquement admissible du problème de Cauchy pour un système hyperbolique général de lois de conservation (1) et pour toute donnée initiale  $U(0, x) = U^{in}(x)$  de variation totale assez petite. Ce dernier résultat, dû à J. Glimm [7], utilise un schéma numérique consistant à approcher la solution par une solution numérique qui est une fonction en escalier (à valeurs vectorielles), ce qui réduit le problème à juxtaposer des solutions de problèmes de Riemann (fournies par l'article de Lax de 1957), et à contrôler leur interaction dans le futur au moyen d'une fonctionnelle dont la définition est particulièrement subtile.

En 1971, Peter Lax et K. O. Friedrichs publient une note [5] qui élucide la condition d'admissibilité (4). Leur point de vue consiste à supposer<sup>8</sup> que le système de lois de conservation (1) est complété par une inégalité différentielle de la forme

$$\partial_t \eta(U) + \partial_x q(U) \leq 0, \quad \text{où } \frac{\partial q}{\partial U_k} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \eta}{\partial U_j} \frac{\partial F_j}{\partial U_k}, \quad (5)$$

et où  $\eta \in C^2(\mathbf{R}^n)$  est supposée convexe<sup>9</sup>. La formule définissant  $q$  signifie précisément que cette inégalité devient une égalité lorsque  $U$  est de classe  $C^1$ . La

8. L'existence de  $\eta$  et  $q$  n'est pas garantie pour un système hyperbolique général à  $n$  inconnues avec  $n \geq 3$  : la condition (5) signifie en effet que la 1-forme  $DF^T(U)d\eta(U)$  est exacte, où  $DF(U)$  est la matrice  $(\partial F_j / \partial U_k)_{1 \leq j, k \leq n}$ . Lorsque  $n = 1$ , l'existence d'une fonction  $q$  est garantie pour tout choix de  $\eta$  puisque toute fonction continue d'une seule variable admet une primitive ; lorsque  $n = 2$ , on voit que  $\eta$  est solution d'un problème de Goursat pour une équation scalaire dans les variables appelées « invariants de Riemann » : cf. l'équation (12.2.2) dans [1], et les équations (9.18-19) dans [34]. Pour  $n \geq 3$ , l'exemple du système d'Euler de la dynamique des gaz montre qu'il peut n'exister qu'une entropie « non triviale », dans ce cas précis, celle fournie par la thermodynamique (d'où le nom d'entropie donné à la fonction  $\eta$ ) : voir [35], chapitre 3, §3.4, Exercice 3.19.

9. Dix ans auparavant, S. K. Godunov avait obtenu dans [10] une condition suffisante sur la structure d'un système quasi-linéaire de lois de conservations garantissant l'existence de fonctions  $\eta$  et  $q$  non triviales — c'est-à-dire où  $\eta$  n'est pas une combinaison linéaire des composantes de  $U$ . Il observe que l'existence d'une telle fonction convexe  $\eta$  implique que le système de lois de

condition (5), écrite pour  $U(t, x) = u_g \mathbf{1}_{x < st} + u_d \mathbf{1}_{x > st}$ , c'est-à-dire pour une onde de choc, solution faible de (1), devient

$$s(\eta(u_d) - \eta(u_g)) \leq q(u_d) - q(u_g)$$

et dans le cas où cette inégalité est stricte, jointe aux relations de Rankine-Hugoniot, elle équivaut à (4). Lax et Friedrichs justifient l'inégalité différentielle (5) en observant qu'elle est satisfaite par la limite d'une famille  $U_\epsilon$  convergeant p.p. lorsque  $\epsilon \rightarrow 0^+$  de solutions de

$$\partial_t U_\epsilon(t, x) + \partial_x F(U_\epsilon(t, x)) = \epsilon \partial_x^2 U_\epsilon(t, x), \quad x \in \mathbf{R}. \quad (6)$$

En effet, la solution  $U_\epsilon$  d'un tel système est régulière pour  $\epsilon > 0$ ; en appliquant la différentielle de  $\eta$  au point  $U_\epsilon(t, x)$  au deux membres de l'égalité ci-dessus, on trouve que

$$\partial_t \eta(U_\epsilon) + \partial_x q(U_\epsilon) = \epsilon \partial_x^2 \eta(U_\epsilon) - \epsilon \sum_{j,k=1}^n \frac{\partial^2 \eta}{\partial U_j \partial U_k}(U_\epsilon) \frac{\partial U_{j,\epsilon}}{\partial x} \frac{\partial U_{k,\epsilon}}{\partial x}.$$

Sachant que  $\eta$  est convexe, il est facile de déduire (5) en passant à la limite au sens des distributions dans chacun des termes de l'égalité ci-dessus quand  $\epsilon \rightarrow 0$ . Déduire (1) de (6) dans la limite où  $\epsilon \rightarrow 0$  porte le nom de « méthode de viscosité artificielle ». Le mot « artificielle » indique assez qu'il ne faut pas accorder au système (6) plus de crédit qu'au système (1) complété par l'inégalité d'entropie (5) — l'exemple de la dynamique des gaz montre que c'est le contraire qui est vrai (bien que (5) puisse être déduite de (6)). Le point important est que l'article de Lax et Friedrichs suggère qu'une condition d'entropie permettant de qualifier les solutions admissibles d'un système de lois de conservation peut être obtenue à partir d'un mécanisme de dissipation adéquat (par exemple par viscosité). On notera d'ailleurs que le membre de gauche de (2), évalué pour une fonction lisse  $u(t, x)$  aux points  $t_k = k\Delta t$  et  $x_\ell = \ell\Delta x$  vaut

$$\partial_t u(t_k, x_\ell) + \partial_x F(u(t_k, x_\ell)) - \frac{1}{2} \frac{\Delta x^2}{\Delta t} \partial_x^2 u(t_k, x_\ell) + O(\Delta t + \Delta x^2 + \frac{\Delta x^4}{\Delta t}), \quad (7)$$

ce qui explique le lien entre le schéma (2) de l'article de Peter Lax de 1954 et l'approximation par viscosité artificielle dans sa note de 1971 avec Friedrichs sur la condition d'entropie.

---

conservation considéré est symétrisable au sens de Friedrichs [4] et, par conséquent, hyperbolique. Les articles de Godunov et de Friedrichs et Lax offrent deux points de vue réciproques sur cette condition d'entropie. Il semble malheureusement que cette note de Godunov, pourtant absolument remarquable, soit passée inaperçue aux États-Unis, car elle n'est pas citée dans le travail de Friedrichs et Lax.

Peter Lax a consacré de nombreux autres articles aux systèmes hyperboliques de lois de conservation; il faudrait mentionner en particulier son mémoire [8], en collaboration avec J. Glimm, établissant la décroissance en  $1/t$  des solutions de systèmes hyperboliques à deux inconnues pour des données initiales périodiques de petite variation totale, un comportement qui rappelle celui observé dans le cas infiniment plus simple de l'équation de Hopf [13] :

$$\partial_t u(t, x) + \frac{1}{2} \partial_x (u(t, x)^2) = 0. \quad (8)$$

Quoiqu'il en soit, les trois articles évoqués ci-dessus<sup>10</sup> répondent pour l'essentiel aux diverses questions soulevées par Burgers et von Kármán concernant l'unicité des solutions, et par Heisenberg sur la validité des équations de l'hydrodynamique en présence de chocs lors du débat avec von Neumann (voir pp. 348–356 dans [32]) de l'été 1949. Peter Lax en présenta une première synthèse dans une série de cours donnés à UCLA en 1971, dont les notes furent publiées quelques années après. Ce texte [17], modèle de concision et de clarté, reste aujourd'hui, plus de cinquante ans après sa parution, l'une des meilleures introductions à la théorie des systèmes hyperboliques de lois de conservation.

On n'a parlé ici que de systèmes hyperboliques en dimension d'espace égale à un; le cas de systèmes hyperboliques de lois de conservation en dimension d'espace supérieure ou égale à deux est bien différent, et un article de C. de Lellis et L. Székelyhidi [2] basé sur la méthode d'intégration convexe due à Gromov montre que le critère d'entropie est insuffisant pour garantir l'unicité des solutions faibles.

En 1991, dans un article en collaboration avec T. Y. Hou [15], Peter Lax revient sur une autre idée de J. von Neumann à propos du calcul numérique des ondes de choc en dynamique des gaz<sup>11</sup>. Von Neumann proposait un schéma aux différences fini centré pour la formulation lagrangienne de l'équation d'Euler :

$$\frac{d^2}{dt^2} X_j(t) = \frac{p\left(\frac{X_j(t) - X_{j-1}(t)}{\Delta a}\right) - p\left(\frac{X_j(t) - X_{j+1}(t)}{\Delta a}\right)}{\Delta a}, \quad (9)$$

où  $X(t, a)$  est la position à l'instant  $t$  de la particule d'étiquette lagrangienne  $a$ , et où  $X_j(t)$  est censée être une valeur approchée de  $X(t, j\Delta a)$ , tandis que  $p$  est la loi de pression (en supposant par exemple le fluide barotrope, de sorte que la pression ne dépend que du volume spécifique). Un tel schéma centré génère

10. Dafermos ([1] p. XXX) souligne l'importance considérable de l'article [18] : "Lax's [1957] paper set the direction for the development of the field of hyperbolic conservation laws over the past fifty years".

11. Voir [32], pp. 361–379, en particulier le §12.

des oscillations au voisinage des ondes de choc, mais von Neumann conjecturait que des moyennes locales en la variable d'espace de la solution numérique locale  $X_j(t)$  devraient converger vers une solution faible exacte physiquement admissible des équations de l'hydrodynamique, et donner en particulier la position précise de l'onde de choc. (On pensera à l'analogie avec le phénomène de Gibbs bien connu sur l'exemple des sommes partielles de la série de Fourier d'une fonction périodique en escalier, dont les oscillations peuvent être éliminées en considérant des moyennes de Cesàro, d'après le théorème de Fejér.)

En fait, cette conjecture est fautive, comme le montre l'article [15] de Peter Lax et T. Hou — mais l'écart entre la solution obtenue par le schéma de von Neumann et un schéma de von Neumann-Richtmeyer (voir [32], pp. 380–385), contenant un terme de viscosité numérique et connu pour converger vers la solution physiquement admissible des équations de la dynamique des gaz, est toutefois assez faible. Quoiqu'il en soit, l'analyse de la question posée par la convergence du schéma (9) peut être vue comme un fil conducteur à travers une autre partie, véritablement fascinante, des travaux de Peter Lax.

Pour y répondre, Peter Lax fait appel à la théorie des systèmes intégrables de dimension infinie. On sait que cette théorie est née dans les années 1950 à partir d'observations numériques<sup>12</sup>, puis qu'elle est développée assez rapidement dans la décennie suivante sur l'exemple de l'équation de Korteweg-de Vries (découverte par Boussinesq en 1877) :

$$\partial_t u(t, x) + u(t, x)\partial_x u(t, x) + \partial_x^3 u(t, x) = 0, \quad (10)$$

pour lequel une méthode de calcul exact des solutions est proposée en 1967 par Gardner, Greene, Kruskal et Miura [6]. La méthode de Gardner, Greene, Kruskal et Miura semble quelque peu ad hoc, mais Peter Lax en donne, l'année suivante, une explication lumineuse [19], qui s'applique à la plupart des systèmes d'équations aux dérivées partielles complètement intégrables. L'idée de Peter Lax se résume comme suit : on part d'une équation aux dérivées partielles d'évolution de la forme

$$\partial_t u(t, x) = K[u(t, x)], \quad t > 0,$$

où  $K$  est un opérateur différentiel non linéaire en la variable  $x \in \mathbb{R}$ . Supposons qu'il existe deux opérateurs  $L_{u(t, \cdot)}$  et  $B_{u(t, \cdot)}$  (éventuellement non bornées) définis sur un espace fonctionnel convenable  $\mathcal{X}$  et paramétrés par une fonction dépendant du temps notée  $x \mapsto u(t, x)$  de sorte que

$$L_{u(t, \cdot)} = L_{u(t, \cdot)}^* \quad \text{et} \quad B_{u(t, \cdot)} = -B_{u(t, \cdot)}^*,$$

12. Voir [E. Fermi, J. Pasta, S. Ulam (computations by M. Tsingou), Los Alamos report LA-1940 (1955)], ainsi que [37].

et que

$$\partial_t u(t, x) = K[u(t, x)] \iff \frac{d}{dt} L_{u(t, \cdot)} = B_{u(t, \cdot)} L_{u(t, \cdot)} - L_{u(t, \cdot)} B_{u(t, \cdot)}.$$

Alors le spectre de  $L_{u(t, \cdot)}$  est invariant par l'évolution définie par  $\partial_t u = K[u]$ . Dans le cas de l'équation de Korteweg-de Vries (10), on vérifie que l'on peut choisir les opérateurs différentiels

$$L_{u(t, \cdot)} := \partial_x^2 + \frac{1}{6}u(t, x), \quad B_{u(t, \cdot)} := 24\partial_x^3 + 6u(t, x)\partial_x + 3\partial_x u(t, x),$$

et que, lorsque  $u$  est choisi de telle sorte que le spectre de  $L_u$  consiste en une suite de valeurs propres, chacune de ces valeurs propres est une intégrale première de l'équation de Korteweg-de Vries. La donnée des deux opérateurs  $\{L_{u(t, \cdot)}, B_{u(t, \cdot)}\}$  est connue aujourd'hui sous le nom de « paire de Lax ». Ce cadre des paires de Lax a ouvert des perspectives remarquables et a rendu possible la découverte de nombreux autres systèmes intégrables.

L'idée de von Neumann d'utiliser une discrétisation centrée pour construire un schéma aux différences finies pour les équations de la dynamique des gaz peut être testée sur l'équation de Hopf (8) : on aboutit au système d'équations différentielles

$$\frac{d}{dt} U_j(t) + U_j(t) \frac{U_{j+1}(t) - U_{j-1}(t)}{2\Delta x} = 0, \quad (11)$$

où  $U_j(t)$  est censé être une valeur approchée de  $u(t, j\Delta x)$ . Or ce système<sup>13</sup> est connu pour être intégrable par la méthode des paires de Lax, ce qui permet d'en faire une analyse précise [11] au voisinage d'une onde de choc pour l'équation de Hopf. On vérifie ainsi que les moyennes locales de la solution oscillante de (11) au voisinage d'une onde de choc, solution faible entropique de l'équation de Hopf, ne convergent pas vers cette solution faible, ce qui met en défaut la conjecture de von Neumann sur cet exemple simple.

On peut d'ailleurs aller plus loin dans cette direction : si l'on évalue le membre de gauche de (11) pour  $U_j(t) = u(t, j\Delta x)$  où on suppose que  $u$  est une fonction lisse, on trouve l'expression

$$\partial_t u(t, j\Delta x) + u(t, j\Delta x)\partial_x u(t, j\Delta x) + \frac{1}{6}\Delta x^2 \partial_x^3 u(t, j\Delta x) + O(\Delta x^4),$$

ce qui suggère d'étudier la limite des solutions  $u_\epsilon$  de l'équation de Korteweg-de Vries à dispersion petite

$$\partial_t u_\epsilon(t, x) + u_\epsilon(t, x)\partial_x u_\epsilon(t, x) + \epsilon^2 \partial_x^3 u_\epsilon(t, x) = 0. \quad (12)$$

13. Connu sous le nom de « réseau de Kac-van Moerbeke ».

Cette étude est menée de manière exhaustive par Peter Lax et son élève C. D. Levermore entre 1979 et 1983 (voir [27] ainsi que [24, 25, 26]). Ils trouvent une description complète de cette limite au moyen d'un problème variationnel (évoquant par certains aspects la formule (3), mais nettement plus compliqué), montrent qu'avant l'apparition d'ondes de choc, la solution de (12) converge vers la solution (régulière) de l'équation de Hopf, mais qu'après l'apparition d'une onde de choc, la limite de la solution de (12) pour  $\epsilon \rightarrow 0$  est décrite par la théorie des modulations de Whitham<sup>14</sup> qui est d'une nature complètement différente<sup>15</sup> et qui se situe au carrefour de la théorie des systèmes intégrables et de celle des systèmes hyperboliques de lois de conservation.

Pour conclure, donnons une dernière fois la parole à Peter Lax [15] « We realize that it is not fair to subject to such research scrutiny reports such as [von Neumann's...], written in haste and under war-time pressure, [...and] not meant for publication in refereed journals... ». Malgré leurs imperfections, ces textes semblent avoir guidé Peter Lax dans sa construction de la théorie des systèmes hyperboliques de lois de conservation et de celle des systèmes complètement intégrables, deux édifices singuliers et remarquables dans la théorie des équations aux dérivées partielles, et dont Peter Lax aura été le principal architecte.

### 3 Mathématiques et calcul

Le titre de cette section reprend le titre d'articles [20], [21] de Peter Lax qu'on peut qualifier de *programmatives*, presque de propagande, où il affirme sa vision prophétique de l'inter-dépendance entre mathématiques et calcul sur ordinateur. Avec Peter Lax, dans le sillage de John von Neumann, nous assistons à la naissance de l'analyse numérique des équations aux dérivées partielles, comme l'a rappelé la section précédente. Motivé par son passage à Los Alamos Peter Lax (qui aimait à dire qu'on ne conçoit pas une bombe atomique par « essais et erreurs » mais qu'il faut la calculer) a consacré une partie importante de ses recherches à la mise au point d'algorithmes de calcul de solutions approchées des modèles physiques et à la justification rigoureuse de leur convergence. Dans le contexte de la méthode des différences finies il a introduit plusieurs schémas numériques pour résoudre les équations du type de (1). Dans la section précé-

14. Voir le chapitre 16, et notamment la formule (16.125) p. 569 du livre [36].

15. Les équations de modulation de Whitham sont un exemple de la théorie des systèmes "riches" de lois de conservation, une classe de systèmes définie dans [33]. Ces systèmes hyperboliques admettent une infinité d'entropies, de même que les systèmes intégrables ont une infinité de quantités conservées — or on a vu que, pour un système hyperbolique de lois de conservation à plus de deux inconnues, le fait d'avoir des entropies non triviales n'est pas évident en général.

dente, nous avons déjà vu le « schéma de Lax-Friedrichs » (2) mais on s'est vite rendu compte que, si ce schéma est très robuste, il est aussi très « diffusif », c'est-à-dire que le schéma induit un effet de viscosité ou de diffusion, comme le montre le terme de dérivée seconde dans l'équation équivalente (7). Plus précisément, si on compare la différence entre (7) et (1) (en supposant que le rapport  $\Delta t/\Delta x$  est fixé), on voit que cette quantité, appelée erreur de consistance ou de troncature est proportionnelle à  $\Delta t$  ou  $\Delta x$ . On dit alors que le schéma est précis au premier ordre. Pour obtenir une approximation plus précise, moins diffuse, Lax et Wendroff [30] propose un nouveau schéma qui s'écrit (avec les mêmes notations)

$$\frac{U_\ell^{k+1} - U_\ell^k}{\Delta t} + \frac{G(U_\ell^k, U_{\ell+1}^k) - G(U_{\ell-1}^k, U_\ell^k)}{\Delta x} = 0 \quad (13)$$

où ( $F'$  étant la matrice Jacobienne de  $F$ )

$$G(U_g, U_d) = \frac{F(U_g) + F(U_d)}{2} + \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{(F')^2(U_g) + (F')^2(U_d)}{2} (U_d - U_g).$$

Un calcul du même type que celui qui a conduit à l'équation équivalente (7) à partir du schéma de Lax-Friedrichs donne, pour le schéma de Lax-Wendroff,

$$\partial_t u(k\Delta t, \ell\Delta x) + \partial_x F(u(k\Delta t, \ell\Delta x)) + O(\Delta t^2), \quad (14)$$

en supposant (pour simplifier) le rapport  $\Delta t/\Delta x$  fixé. On voit ainsi que le schéma de Lax-Wendroff est d'ordre 2, donc plus précis que celui de Lax-Friedrichs, puisque la différence entre (14) et (1) est de l'ordre de  $\Delta t^2$ . Bien que ce schéma soit plus précis il présente un caractère oscillant autour des chocs (on dit qu'il est dispersif) et la correction de ces oscillations par des technique d'hybridation (le schéma redevient d'ordre 1 dans les chocs) a donné lieu à une très vaste littérature [9].

À partir de la formule (13), en changeant la fonction de flux  $G(U_g, U_d)$ , on obtient toute une famille de schémas numériques (on peut d'ailleurs vérifier que le schéma de Lax-Friedrichs se met aussi sous cette forme) qui sont appelés *conservatifs* car en sommant par rapport à l'indice  $\ell$  (et en ignorant les éventuels effets de bord) on voit que la somme (ou intégrale discrète en espace) est indépendante de l'indice  $k$ , c'est-à-dire du temps discret. Cette propriété de conservation est cruciale pour montrer que, si un tel schéma converge, alors il converge bien vers une solution faible, autrement dit les chocs sont bien calculés avec les bonnes relations de saut de Rankine-Hugoniot. C'est ce qu'on appelle le théorème de Lax-Wendroff [30], qui peut s'étendre aux schémas vérifiant des inégalités d'entropie et pour lesquels la limite continue (si elle existe) sera bien l'unique solution faible entropique. Évidemment, pour montrer qu'un schéma converge, pour

une équation non-linéaire il faut des estimations discrètes qui donnent de la compacité et cela n'est connu à ce jour que dans le cas des équations scalaires ( $n = 1$ ) ou de certains systèmes très particuliers (comme la dynamique des gaz isentropique).

Les équations (7) et (14) montrent que les deux schémas évoqués ici sont consistants, au sens où l'erreur de troncature tend vers zéro lorsque  $\Delta t$  et  $\Delta x$  le font. Une autre propriété importante, et très naturelle, des schémas est leur *stabilité*. Pour une équation d'évolution sans terme source, la stabilité peut se définir simplement en demandant à ce que la norme (en espace) de la solution discrète en tout temps soit bornée par une constante que multiplie la norme de la donnée initiale avec une constante indépendante de  $\Delta t$  et  $\Delta x$ . Peter Lax a compris qu'en fait ce sont les deux seules propriétés nécessaires, et suffisantes, pour la convergence d'un schéma aux différences finies. Plus précisément, dans [29] il démontre le théorème suivant, dit *d'équivalence*. Pour une équation d'évolution linéaire et bien posée, un schéma aux différences finies, linéaire et consistant, converge si et seulement si il est stable. Ce théorème, énoncé de manière si simple, est en fait extrêmement profond et se retrouve, sous une forme ou une autre, dans toutes les méthodes numériques d'approximation des équations aux dérivées partielles.

Finissons ce très rapide survol des contributions de Peter Lax par deux anecdotes qui illustrent son goût profond pour le calcul scientifique. Lors de manifestations étudiantes en 1970 certains militants menacèrent de faire sauter l'ordinateur du Courant Institute, un CDC 6600. Un début d'incendie se déclara et, au lieu de fuir sagement, Peter Lax se rua dans la salle des machines pour éteindre les premières flammes. Risquer sa vie pour sauver un ordinateur... fallait-il aimer le calcul scientifique!

Lors d'exposés au tournant des années 90 (une période où l'on utilisait des transparents sur lesquels on pouvait imprimer des résultats de calculs) Peter Lax se faisait un malin plaisir d'annoncer une preuve de convergence... mais se contentait de superposer deux transparents correspondants au même calcul avec deux maillages, un grossier et un plus fin, en annonçant devant un public incrédule : « le schéma converge puisque les deux courbes se superposent parfaitement »!

## 4 Asymptotique haute fréquence

Dans un très célèbre article de 1957 au *Duke Mathematical Journal* [16], Peter Lax analyse la propagation de paquets d'ondes dans la limite des petites

longueurs d'ondes. En vingt pages, il transforme le paysage des équations hyperboliques linéaires.

Notons  $y = (t, x) \in \mathbb{R}^{1+d}$  et introduisons  $L(y, \partial_t, \partial_x)$ , un système  $n \times n$  d'opérateurs d'ordre un dont les coefficients ont des dérivées partielles à tout ordre bornées uniformément

$$L = \partial_t + \sum_{j=1}^d A_j(y) \partial_{x_j} + B(y) := L_1(y, \partial_t, \partial_x) + B(y).$$

Le système est supposé strictement hyperbolique, c'est-à-dire que pour tout  $(y, \xi) \in \mathbb{R}^{1+d} \times (\mathbb{R}^d \setminus \{0\})$ , la matrice  $A(y, \xi) := \sum_j A_j(y) \xi_j$  possède  $n$  valeurs propres réelles distinctes. Pour une donnée initiale dans  $H^s(\mathbb{R}^d; \mathbb{R}^n)$  avec  $s \in \mathbb{R}$ , la solution de  $Lu = 0$  est alors continue en temps à valeurs dans  $H^s(\mathbb{R}^d; \mathbb{R}^n)$ . La vitesse de propagation est finie.

En notant  $\epsilon > 0$  la petite longueur d'onde, il pose l'ansatz de la solution

$$u(y) = e^{i\phi(y)/\epsilon} \sum_{k \geq 0} \epsilon^k a_k(y),$$

où  $\phi$ , avec  $d\phi \neq 0$ , est une fonction à valeurs réelles, appelée *phase*, et la somme est une série formelle en puissances de  $\epsilon$  avec amplitudes  $a_k \in C^\infty$ . Les quatre points qui suivent décrivent les théorèmes fondamentaux de l'article.

■ En notant  $d\phi$  la différentielle de la phase, on trouve

$$Lu = e^{i\phi(y)/\epsilon} \sum_{k=-1}^{\infty} \epsilon^k b_k(y) \quad \text{avec } b_{-1} = L_1(y, id\phi)a_0.$$

On demande que  $b_k = 0$  pour tout  $k \geq -1$ . Pour l'équation  $b_{-1} = 0$  l'existence d'une solution non-triviale,  $a_0 \neq 0$ , exige que soit satisfaite l'équation eikonale,  $\det L_1(y, d\phi(y)) = 0$ . La théorie de Hamilton-Jacobi indique que la phase réelle  $\phi$  est déterminée par les valeurs de  $\phi$  et  $d\phi$  à  $t = 0$ . Plus précisément, étant donné  $\phi(0, x)$ , il y a  $n$  valeurs distinctes de  $\partial_t \phi(0, x)$  solutions de l'équation eikonale à  $t = 0$ . Il existe donc  $n$  phases distinctes associées à  $\phi(0, x)$ . La solution existe localement en espace-temps. Dans l'exemple classique avec donnée initiale  $e^{i\xi \cdot x}$  il y a existence sur  $0 \leq t \leq \underline{t}$  avec un certain  $\underline{t} > 0$ . Pour simplifier on suppose l'existence sur une telle bande.

Pour  $k \geq 1$ , on a  $b_{k-1} = 0$  si est seulement si

$$L_1(y, id\phi)a_k = L(y, \partial_t, \partial_x)a_{k-1}.$$

Soit  $\pi(y)$  le projecteur de rang 1 sur  $\ker L_1(y, d\phi(y))$  le long de l'image de  $L_1(y, d\phi(y))$ . Une analyse non triviale montre que, étant donnée une suite de conditions initiales  $g_k = \pi(y)g_k \in C^\infty(\mathbb{R}^d)$  à  $t = 0$ , avec support dans un compact indépendant de  $k$ , il existe une unique famille de solutions  $a_k \in C^\infty(\{0 \leq t \leq t\} \times \mathbb{R}^d)$  avec support compact indépendant de  $k$  telle que, pour tout  $k, y$ ,  $\pi(y)a_k(y) = g_k(y)$  à  $t = 0$ . Les amplitudes  $a_k$  sont déterminées par une équation de transport le long des rayons de l'optique géométrique associés à  $\phi$ .

- Avec  $a_k$  déterminé ainsi, la somme partielle

$$u_N := e^{i\phi(t,x)/\epsilon} \sum_{k=0}^N \epsilon^k a_k(y)$$

satisfait, pour un certain  $b \in C^\infty$ ,

$$Lu_N = \epsilon^{N-1} e^{i\phi(t,x)/\epsilon} b(y), \quad \text{avec} \quad \text{supp } b \subset \{0 \leq t \leq t, |x| \leq R\}.$$

On vérifie alors que  $\|Lu_N\|_{H^s(\{0 \leq t \leq t\} \times \mathbb{R}^d)} = O(\epsilon^{N-1-s})$ . L'estimation *a priori* standard pour  $L$  implique que la solution  $u$  du problème de Cauchy avec la même donnée initiale que  $u_N$  satisfait  $\|u - u_N\|_{H^s(\{0 \leq t \leq t\} \times \mathbb{R}^d)} = O(\epsilon^{N-1-s})$ . Peter Lax transforme ainsi les développements formels en approximations rigoureuses de précision arbitrairement grande.

- Peter Lax décompose ensuite la donnée initiale du problème de Cauchy pour  $Lu = 0$  à l'aide de la transformée de Fourier. Il décrit les contributions à petite longueur d'onde à l'aide de l'*ansatz* ci-dessus. Cela donne une solution approchée qui diffère de la solution exacte par une erreur  $C\epsilon^M$  avec  $M$  arbitrairement grand. Il conclut que *les singularités en un point initial  $p$  ne peuvent influencer les singularités en un point  $q$  que s'il existe un rayon de l'optique géométrique joignant  $p$  à  $q$* . La formule qui relie la donnée initiale à la solution approchée est un opérateur intégral de Fourier au sens de Hörmander. Le théorème sur les singularités est démontré par un argument de phase non stationnaire qui donnera, 13 ans plus tard, la propagation des singularités microlocales de Hörmander [14].
- Utilisant des solutions de la forme de l'*ansatz* avec une phase complexe, Lax démontre que le problème de Cauchy pour  $L$  est mal posé pour des opérateurs non hyperboliques dont les coefficients sont analytiques réels. Ceci généralise la démonstration classique de Hadamard pour les coefficients constants utilisant des ondes planes. L'hypothèse d'analyticité sera enlevée plus tard par Mizohata [31].

## 5 Conclusion

L'œuvre de Peter Lax est immense et il aurait été illusoire de prétendre la décrire extensivement dans les limites de cet article. Nous avons choisi d'évoquer trois thèmes, mais les apports de Peter Lax à d'autres sujets ont été tout aussi fondamentaux. C'est le cas notamment pour la théorie du *scattering*, en collaboration avec Ralph Phillips [28]. Pour plus de détails nous renvoyons les lecteurs à la biographie de Peter Lax par Reuben Hersh [12] ainsi qu'aux nombreuses et passionnantes interviews filmées par la Simons Foundation<sup>16</sup>, par le *Heidelberg Laureate Forum*<sup>17</sup> ou bien par l'*Atomic Heritage Foundation*<sup>18</sup>, sans oublier les deux volumes de ses articles choisis [22]. En conclusion de la remarquable série d'entretiens enregistrés par la *Simons Foundation*, Peter Lax déclarait « J'ai été heureux dans la communauté mathématique et je voudrais lui exprimer ici ma gratitude. » À notre tour de lui dire la nôtre.

## Références

- [1] Constantine M. DAFERMOS. *Hyperbolic conservation laws in continuum physics*. English. 3rd ed. T. 325. Grundlehren Math. Wiss. Berlin : Springer, 2010. ISBN : 978-3-642-04047-4; 978-3-642-04048-1. DOI : [10.1007/978-3-642-04048-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-04048-1).
- [2] Camillo DE LELLIS et László SZÉKELYHIDI. « On admissibility criteria for weak solutions of the Euler equations ». English. In : *Arch. Ration. Mech. Anal.* 195.1 (2010), p. 225-260. ISSN : 0003-9527. DOI : [10.1007/s00205-008-0201-x](https://doi.org/10.1007/s00205-008-0201-x).
- [3] Lawrence C. EVANS. *Partial differential equations*. English. T. 19. Grad. Stud. Math. Providence, RI : American Mathematical Society, 1998. ISBN : 0-8218-0772-2.
- [4] Kurt O. FRIEDRICHS. « Symmetric hyperbolic linear differential equations ». English. In : *Commun. Pure Appl. Math.* 7 (1954), p. 345-392. ISSN : 0010-3640. DOI : [10.1002/cpa.3160070206](https://doi.org/10.1002/cpa.3160070206).

16. <https://www.simonsfoundation.org/2014/04/10/peter-lax/>

17. <https://www.youtube.com/watch?v=oT0b9IwDhcI>

18. <https://www.youtube.com/watch?v=snB148gfP44&t=3839s>

- [5] Kurt O. FRIEDRICHs et Peter D. LAX. « Systems of conservation equations with a convex extension ». English. In : *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 68 (1971), p. 1686-1688. ISSN : 0027-8424. DOI : [10.1073/pnas.68.8.1686](https://doi.org/10.1073/pnas.68.8.1686). URL : [eur  
opepmc.org/articles/pmc389271](https://europepmc.org/articles/pmc389271).
- [6] Clifford S. GARDNER, John M. GREENE, Martin D. KRUSKAL et Robert M. MIURA. « Method for solving the Korteweg-de Vries equation. » English. In : *Phys. Rev. Lett.* 19 (1967), p. 1095-1097. ISSN : 0031-9007. DOI : [10.1103  
/PhysRevLett.19.1095](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.19.1095).
- [7] James GLIMM. « Solutions in the large for nonlinear hyperbolic systems of equations ». English. In : *Commun. Pure Appl. Math.* 18 (1965), p. 697-715. ISSN : 0010-3640. DOI : [10.1002/cpa.3160180408](https://doi.org/10.1002/cpa.3160180408).
- [8] James GLIMM et Peter D. LAX. *Decay of solutions of systems of nonlinear hyperbolic conservation laws*. English. T. 101. Mem. Am. Math. Soc. Providence, RI : American Mathematical Society (AMS), 1970. ISBN : 978-0-8218-1801-5; 978-0-8218-9891-8. DOI : [10.1090/memo/0101](https://doi.org/10.1090/memo/0101).
- [9] Edwige GODLEWSKI et Pierre-Arnaud RAVIART. *Hyperbolic systems of conservation laws*. English. T. 3/4. Math. Appl. (Paris). Paris : Ellipses, 1991.
- [10] Serguei K. GODUNOV. « An interesting class of quasilinear systems ». English. In : *Sov. Math., Dokl.* 2 (1961), p. 947-949. ISSN : 0197-6788.
- [11] Jonathan GOODMAN et Peter D. LAX. « On dispersive difference schemes. I ». English. In : *Commun. Pure Appl. Math.* 41.5 (1988), p. 591-613. ISSN : 0010-3640. DOI : [10.1002/cpa.3160410506](https://doi.org/10.1002/cpa.3160410506).
- [12] Reuben HERSH. *Peter Lax, mathematician. An illustrated memoir*. English. Providence, RI : American Mathematical Society (AMS), 2015. ISBN : 978-1-4704-1708-6.
- [13] Eberhard HOPF. « The partial differential equation  $u_t + uu_x = \mu u_{xx}$  ». English. In : *Commun. Pure Appl. Math.* 3 (1950), p. 201-230. ISSN : 0010-3640. DOI : [10.1002/cpa.3160030302](https://doi.org/10.1002/cpa.3160030302).
- [14] Lars HÖRMANDER. « On the existence and the regularity of solutions of linear pseudo-differential equations ». English. In : *Enseign. Math.* (2) 17 (1971), p. 99-163. ISSN : 0013-8584.
- [15] Thomas Y. HOU et Peter D. LAX. « Dispersive approximations in fluid dynamics ». English. In : *Commun. Pure Appl. Math.* 44.1 (1991), p. 1-40. ISSN : 0010-3640. DOI : [10.1002/cpa.3160440102](https://doi.org/10.1002/cpa.3160440102).
- [16] Peter D. LAX. « Asymptotic solutions of oscillatory initial value problems ». English. In : *Duke Math. J.* 24 (1957), p. 627-646. ISSN : 0012-7094. DOI : [10  
.1215/S0012-7094-57-02471-7](https://doi.org/10.1215/S0012-7094-57-02471-7).

- [17] Peter D. LAX. *Hyperbolic systems of conservation laws and the mathematical theory of shock waves*. English. T. 11. CBMS-NSF Reg. Conf. Ser. Appl. Math. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), Philadelphia, PA, 1973.
- [18] Peter D. LAX. « Hyperbolic systems of conservation laws. II ». English. In : *Commun. Pure Appl. Math.* 10 (1957), p. 537-566. ISSN : 0010-3640. DOI : [10.1002/cpa.3160100406](https://doi.org/10.1002/cpa.3160100406).
- [19] Peter D. LAX. « Integrals of nonlinear equations of evolution and solitary waves ». English. In : *Commun. Pure Appl. Math.* 21 (1968), p. 467-490. ISSN : 0010-3640. DOI : [10.1002/cpa.3160210503](https://doi.org/10.1002/cpa.3160210503).
- [20] Peter D. LAX. « Mathematics and computing ». English. In : *J. Stat. Phys.* 43 (1986), p. 749-756. ISSN : 0022-4715. DOI : [10.1007/BF02628302](https://doi.org/10.1007/BF02628302).
- [21] Peter D. LAX. « Nonlinear partial differential equations and computing ». English. In : *SIAM Rev.* 11 (1969), p. 7-19. ISSN : 0036-1445. DOI : [10.1137/1011002](https://doi.org/10.1137/1011002).
- [22] Peter D. LAX. *Selected papers. Vols. I, II. Edited by Peter Sarnak and Andrew Majda*. English. Sous la dir. de Peter SARNAK et Andrew MAJDA. New York, NY : Springer, 2005. ISBN : 0-387-22925-6; 0-387-22926-4.
- [23] Peter D. LAX. « Weak solutions of nonlinear hyperbolic equations and their numerical computation ». English. In : *Commun. Pure Appl. Math.* 7 (1954), p. 159-193. ISSN : 0010-3640. DOI : [10.1002/cpa.3160070112](https://doi.org/10.1002/cpa.3160070112).
- [24] Peter D. LAX et C. David LEVERMORE. « The small dispersion limit of the Korteweg-de Vries equation. I ». English. In : *Commun. Pure Appl. Math.* 36 (1983), p. 253-290. ISSN : 0010-3640. DOI : [10.1002/cpa.3160360302](https://doi.org/10.1002/cpa.3160360302).
- [25] Peter D. LAX et C. David LEVERMORE. « The small dispersion limit of the Korteweg-de Vries equation. II ». English. In : *Commun. Pure Appl. Math.* 36 (1983), p. 571-593. ISSN : 0010-3640. DOI : [10.1002/cpa.3160360503](https://doi.org/10.1002/cpa.3160360503).
- [26] Peter D. LAX et C. David LEVERMORE. « The small dispersion limit of the Korteweg-de Vries equation. III ». English. In : *Commun. Pure Appl. Math.* 36 (1983), p. 809-829. ISSN : 0010-3640. DOI : [10.1002/cpa.3160360606](https://doi.org/10.1002/cpa.3160360606).
- [27] Peter D. LAX et C. David LEVERMORE. « The zero dispersion limit for the Korteweg-deVries KdV equation ». English. In : *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 76 (1979), p. 3602-3606. ISSN : 0027-8424. DOI : [10.1073/pnas.76.8.3602](https://doi.org/10.1073/pnas.76.8.3602).
- [28] Peter D. LAX et Ralph S. PHILLIPS. *Scattering theory*. English. T. 26. Pure Appl. Math., Academic Press. Academic Press, New York, NY, 1967.

- [29] Peter D. LAX et Robert D. RICHTMYER. « Survey of the stability of linear finite difference equations ». English. In : *Commun. Pure Appl. Math.* 9 (1956), p. 267-293. ISSN : 0010-3640. DOI : [10.1002/cpa.3160090206](https://doi.org/10.1002/cpa.3160090206).
- [30] Peter D. LAX et B. WENDROFF. « Systems of conservation laws ». English. In : *Commun. Pure Appl. Math.* 13 (1960), p. 217-237. ISSN : 0010-3640. DOI : [10.1002/cpa.3160130205](https://doi.org/10.1002/cpa.3160130205). URL : [hdl.handle.net/2027/mdp.39015086457614](https://hdl.handle.net/2027/mdp.39015086457614).
- [31] Sigeru MIZOHATA. « Some remarks on the Cauchy problem ». English. In : *J. Math. Kyoto Univ.* 1 (1961), p. 109-127. ISSN : 0023-608X. DOI : [10.1215/kjm/1250525109](https://doi.org/10.1215/kjm/1250525109).
- [32] John von NEUMANN. *Collected works. Vol. VI : Theory of games, astrophysics, hydrodynamics and meteorology. General editor : A. H. Taub.* English. Oxford-London-New York-Paris : Pergamon Press, x, 538 p. (1963). 1963.
- [33] Denis SERRE. *Richness and the classification of quasilinear hyperbolic systems.* English. Multidimensional hyperbolic problems and computations, Proc. IMA Workshop, Minneapolis/MN (USA) 1989, IMA Vol. Math. Appl. 29, 315-333 (1991). 1991.
- [34] Denis SERRE. *Systems of conservation laws 2. Geometric structures, oscillations, and initial-boundary value problems. Translated from the French by I. N. Sneddon.* English. Cambridge : Cambridge University Press, 2000. ISBN : 0-521-63330-3.
- [35] Denis SERRE. *Systems of conservation laws. I : Hyperbolicity, entropies, shock waves. Translated from the French by I. N. Sneddon.* English. Cambridge : Cambridge University Press, 1999. ISBN : 0-521-58233-4.
- [36] Gerald B. WHITHAM. *Linear and nonlinear waves.* English. Pure Appl. Math., Wiley-Intersci. Ser. Texts Monogr. Tracts. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 1974.
- [37] Norman J. ZABUSKY et Martin D. KRUSKAL. « Interaction of 'solitons' in a collisionless plasma and the recurrence of initial states ». English. In : *Phys. Rev. Lett.* 15 (1965), p. 240-243. ISSN : 0031-9007. DOI : [10.1103/PhysRevLett.15.240](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.15.240).

## Grégoire ALLAIRE

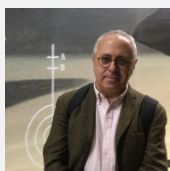


Grégoire ALLAIRE est professeur de mathématiques appliquées à l'École polytechnique. Il a été post-doctorant au Courant Institute en 1989-1990 où il a connu Peter Lax.

**Email :** [gregoire.allaire@polytechnique.fr](mailto:gregoire.allaire@polytechnique.fr)

**Site web :** [www.cmap.polytechnique.fr/~allaire/](http://www.cmap.polytechnique.fr/~allaire/)

## Henri BERESTYCKI



Henri BERESTYCKI est directeur d'études émérite à l'EHESS. Il a connu Peter Lax au cours de nombreuses visites à New York depuis 1982.

**Email :** [Henri.Berestycki@ehess.fr](mailto:Henri.Berestycki@ehess.fr)

**Site web :** [archives-cams.ehess.fr/henri-berestycki/](http://archives-cams.ehess.fr/henri-berestycki/)

## François GOLSE

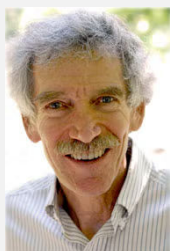


François GOLSE est professeur de mathématiques à l'École polytechnique. Il a rencontré pour la première fois Peter Lax durant sa thèse à Paris.

**Email :** [francois.golse@polytechnique.edu](mailto:francois.golse@polytechnique.edu)

**Site web :** [www.cmls.polytechnique.fr/perso/golse/](http://www.cmls.polytechnique.fr/perso/golse/)

## Jeffrey RAUCH



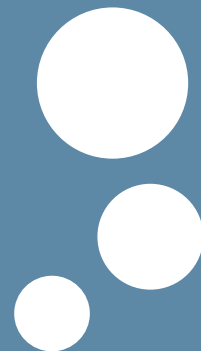
Jeffrey RAUCH est professeur émérite de mathématiques à l'université du Michigan. Il a obtenu sa thèse au Courant Institute sous la direction de Peter Lax.

**Email :** [rauch@umich.edu](mailto:rauch@umich.edu)

**Site web :** [lsa.umich.edu/math/people/emeritus-faculty/rauch.html](http://lsa.umich.edu/math/people/emeritus-faculty/rauch.html)



# Hommage à Jean-François Maitre (1937-2025)



---

## TABLE DES MATIÈRES

PARTIE : DE BESANÇON À GRE- NOBLE, 1961-70 .....	126	1970-2021 .....	130
PARTIE : LES ANNÉES LYONNAISES,		PARTIE : DÉBUTS DE L'ANALYSE NUMÉRIQUE À LYON .....	138



FIGURE 1 — Jean-François MAITRE.

*Jean-François MAITRE est décédé le 23 mars 2025, à l'âge de 87 ans, après cinq années d'une lutte courageuse contre la maladie. Il a été de 1970 à 2001 professeur à l'École Centrale de Lyon après avoir occupé des postes à Besançon et à Grenoble. Doté d'une personnalité rayonnante, il était très reconnu dans notre communauté pour ses qualités de chercheur et son implication dans de multiples tâches d'intérêt collectif comme la présidence du GAMNI. Sa disparition a suscité une vive émotion et de très nombreux témoignages. Divers hommages lui sont rendus ici.*

## DE BESANÇON À GRENOBLE, 1961-70

*par :*

*Pierre SPITERI<sup>1</sup> — Professeur Émérite à l'ENSEEIH,  
Institut National Polytechnique de Toulouse.*

Jean-François MAITRE est né le 7 juin 1937 à Le Ban Saint Martin, bourgade proche de Metz et ville de garnison où son père était militaire. Celui-ci étant prisonnier de guerre en Allemagne de 1940 à 1945, le reste de la famille rejoint Le Russey, petit village du Haut-Doubs, région que Jean-François affectionnait particulièrement. Après un début de scolarité à Besançon, en qualité de pupille de la nation, à l'âge de 11 ans, il est envoyé au Prytanée Militaire de la Flèche où il sera interne jusqu'à Maths Spé. Il intègre l'École Nationale Supérieure de Chronométrie et Micromécanique de Besançon. Parallèlement, en 1960, il obtient brillamment une licence de Mathématiques à la faculté des Sciences de Besançon. En 1961 il épouse Michelle PETIT et fonde avec elle une famille de quatre enfants constituée de deux filles Françoise et Catherine et de deux garçons Emmanuel et Raphael.

Cette même année il obtient un poste d'assistant auprès du Professeur Jean-Louis RIGAL au laboratoire d'Informatique de la faculté des sciences de Besançon. À cette époque les premiers ordinateurs étaient installés en France, ce qui suscitait beaucoup de curiosité médiatique et d'intérêt pour résoudre toute sorte de problèmes. En février 1962 l'université franc-comtoise fait l'acquisition d'une machine aux performances modestes, une « CAB 500 » (calculatrice automatique binaire) conçue en France par la SEA (société d'électronique et d'automatique). Jean-François s'investit totalement dans l'utilisation de ce matériel ce qui lui a permis d'effectuer ses premiers travaux pédagogiques et scientifiques.

Sur le plan pédagogique, l'acquisition de ce premier ordinateur voit l'émergence dans le cursus de la Licence de Mathématiques d'une matière nouvelle, l'analyse numérique, où Jean-François MAITRE enseigne le calcul matriciel numérique, assurant également les travaux dirigés et les travaux pratiques sur machine, ce dernier point étant, à l'époque, révolutionnaire dans une formation en mathématiques. Il assure également d'une part les enseignements de mathématiques à l'ENS de Micro-mécanique et d'autre part les travaux dirigés du certificat de Techniques Mathématiques de la Physique. Compte tenu de sa formation d'ingénieur, ses interventions sont particulièrement appréciées aussi bien des

---

1. [pierre.spiteri@toulouse-inp.fr](mailto:pierre.spiteri@toulouse-inp.fr)

élèves ingénieurs que des étudiants préparant un diplôme de physique. Enfin, dans des conditions difficiles à cause du climat rigoureux qui règne l'hiver dans cette région, il effectue des déplacements dans la région industrielle de Belfort-Montbéliard, pour dispenser aux cadres des usines Alstom et Peugeot des cours de mathématiques dans le cadre du CNAM.

Sur le plan scientifique l'activité à l'époque de Jean-François MAITRE est orientée vers l'étude de l'influence de la propagation des erreurs d'arrondi, provenant de la mauvaise représentation des nombres réels en machine, sur le résultat obtenu lors de la résolution numérique d'un système linéaire. La question est de savoir dans quelle mesure un vecteur calculé numériquement  $X$  peut être considéré comme la « solution acceptable » du système linéaire  $Ax = B$ , où  $x$  est la solution exacte. Ce sera le cas si  $X$  est solution exacte d'un système perturbé  $(A + \Delta A)X = B + \Delta B$ . Pour résoudre ce type de question, on a recours à « l'analyse *a posteriori* » qui consiste à ramener le problème à celui de l'existence d'un système suffisamment proche du système initial. La présence des perturbations  $\Delta A$  et  $\Delta B$  conduit à obtenir des majorations d'erreurs en relation avec le nombre de conditionnement. Jean-François obtient un premier résultat en établissant une évaluation d'une borne d'erreur pour la résolution numérique par la méthode de CHOLESKY d'un système linéaire, où  $A$  est évidemment symétrique définie positive. Il étend ensuite ce résultat au cas général où  $A$  n'est plus symétrique et il soutient le 25 janvier 1964 à Besançon une thèse de 3<sup>e</sup> cycle, travail pour lequel l'Université de Besançon lui décerne un prix de thèse. Cette étude permet de déterminer des critères théoriques de détermination de « solution acceptable » et de stabilité des calculs effectués lors de la résolution d'un système linéaire mal conditionnés par la méthode de GAUSS. À noter également un chapitre de la thèse regroupant plusieurs ensembles de « matrices tests », où sont indiquées les propriétés de ces matrices, permettant ainsi de tester les programmes de calcul implémentés sur machine; cette étude suscitera un grand intérêt de la communauté, en particulier des numériciens américains qui poursuivront ces travaux.

En 1964 Jean-François est recruté sur un poste de Maître-Assistant à la faculté des sciences de Besançon. Il poursuit son activité scientifique d'une part en étudiant l'utilisation de diverses classes de normes pour l'inversion de matrices mal conditionnées et d'autre part en collaborant avec Nguyen Huu VINH, introduisant notamment la notion de valeur singulière généralisée et caractérisant la meilleure approximation de rang  $r$  donné d'un opérateur linéaire.

Il est à noter qu'à cette époque, le laboratoire d'informatique bisontin développe des contacts scientifiques avec l'Université de Grenoble, notamment avec Noël GASTINEL et François ROBERT qui sont régulièrement invités au séminaire de Besançon de même que d'autres scientifiques comme par exemple Alexander OSTROWSKI.



**FIGURE 2** — Michel LAGONDET et Jean-François MAITRE au colloque de Besançon en 1966.

Lors du Colloque International CNRS d'Analyse Numérique de septembre 1966, Jean-François effectue un exposé relatif aux valeurs singulières généralisées, travail qui intéresse Friedrich Ludwig BAUER. Celui-ci l'invite à l'université de Munich. Il séjournera au *Technische Hochschule der TH München (Mathematisches Institut)*, de mai 1967 à septembre 1968, dirigeant d'une part les travaux d'un groupe de six personnes et étendant d'autre part les résultats existant concernant « l'analyse à postériori » d'un système linéaire; cette dernière étude établit de façon simple et générale des critères caractérisant la solution numérique d'un système linéaire comme « solution acceptable ». F. L. BAUER souhaite que Jean-François séjourne dans son institut, mais celui-ci souhaite rentrer en France. Il est recruté par N. GASTINEL sur un poste de Maître-Assistant à Grenoble. Il poursuit ses travaux et soutient en novembre 1974 à Grenoble une thèse de doctorat *es sciences* sous la direction de N. GASTINEL, cette contribution étendant ses résultats antérieurs sur les normes de matrices et d'opérateurs.

Il convient de préciser que ce sujet sur « l'analyse à postériori » est encore de nos jours d'actualité en Europe et aux USA dans le cadre du calcul à haute performance.

Jean-François était très attaché à Besançon et portait un grand intérêt aux activités scientifiques développées par Jean-Claude MIELLOU, qui occupait début 1967 le poste libéré par J. L. RIGAL; il était également intéressé par l'activité de

Pierre LESAIN ainsi que par celle des membres du laboratoire d'analyse numérique. Il se déplaçait souvent à Besançon et participait activement au séminaire, effectuant des exposés sur les thèmes d'études abordés après 1974, en particulier sur la méthode des éléments finis où sur la méthode multi-grilles. Il a également été membre de plusieurs jurys de thèse.

## LES ANNÉES LYONNAISES, 1970-2021

*par :*

*MARTINE MARION<sup>2</sup> — Professeur (de 1989 à 2023) à  
l'École Centrale de Lyon*

La carrière lyonnaise de Jean-François MAITRE s'est déroulée de 1970 à 2001 à l'École Centrale de Lyon (ECL), période suivie de vingt années en qualité de professeur émérite.

Avant 1969-70, les mathématiques et l'informatique n'étaient présentes à l'ECL que via des enseignements assurés par des collègues d'autres disciplines ou en poste à l'université Lyon 1. En 1970, Jean-François MAITRE est recruté en qualité de chargé d'enseignement en informatique. Il lui est demandé de mettre en place et de diriger un centre de calcul — à l'état d'ébauche juste avant son arrivée — et une équipe de recherche en informatique. Il s'y attelle avec énergie et des premières thèses en informatique sont soutenues à partir de 1973. Les deux structures deviendront indépendantes et le laboratoire évoluera vers un laboratoire de mathématiques et informatique (incluant aussi une équipe d'automatique à une certaine époque).

Jean-François joue un rôle moteur dans le développement de l'enseignement de l'analyse numérique tant au niveau de l'ECL que de la « région lyonnaise » : citons l'introduction (en collaboration avec François ROBERT) de cours d'analyse numérique à l'université de Saint-Etienne conduisant à la création d'un poste de professeur des universités où Claude CARASSO est recruté en 1973, la responsabilité de l'enseignement de l'analyse numérique dans la toute nouvelle ENTPE de Vaulx-en-Velin, suite au transfert de l'école depuis Paris en 1975. Ces activités très prenantes expliquent que Jean-François ne soutient qu'en 1974 sa thèse d'État sous la direction de Noël GASTINEL dont le plan était pourtant prêt depuis fin 1968. Jean-François est nommé maître de conférences en 1975 (premier niveau de la catégorie A dans l'enseignement supérieur à l'époque), et devient donc professeur des universités de deuxième classe lors de la réforme de 1979. Il finit sa carrière en qualité de professeur de classe exceptionnelle.

L'année 1973 voit l'arrivée à l'ECL d'un deuxième professeur de mathématiques, Claude-Michel BRAUNER (d'abord nommé comme chargé de cours) et d'assistants dont François MUSY avec lequel Jean-François mènera beaucoup d'activités de recherche. Avec le recrutement au même moment de Jacques BARANGER comme professeur à l'université Lyon 1, et celui mentionné plus haut de

---

2. [martine30.marion@free.fr](mailto:martine30.marion@free.fr)

Claude CARASSO à l'université de Saint-Étienne, de nombreuses activités communes sur les sites de Lyon et de Saint-Étienne se mettent progressivement en place : création de l'équipe d'analyse numérique de Lyon-Saint-Etienne, d'un séminaire commun tenu tantôt à Lyon, tantôt à Saint-Etienne, ce qui demandait une forte implication de tous et de nombreux kilomètres parcourus chaque semaine et d'un DEA commun.

En relation étroite avec les collègues cités, Jean-François a aussi joué un rôle important pour obtenir pour l'équipe d'analyse numérique de Lyon-Saint-Etienne la reconnaissance du CNRS. Cette reconnaissance est obtenue sous forme d'une modeste aide financière d'environ 10 kF en 1981 et 1982, puis par la création en 1983 de l'ERA 1017 qui deviendra l'URA 740. Cette équipe associée a été dirigée à ses débuts par J. BARANGER, puis Jean-François a pris la suite de 1987 à 1995. Pendant ces huit années, il a mis beaucoup de conviction et d'énergie pour assurer la promotion de l'équipe.

Du point de vue scientifique, les travaux concernant la résolution de systèmes linéaires ont trouvé un domaine de recherche particulièrement intéressant pour une école d'ingénieurs, à savoir la méthode des éléments finis, dans le contexte du développement en France des premières études mathématiques et de projets de mise au point de codes très généraux. Jean-François a été l'ardent promoteur à Lyon (et au niveau national) des éléments finis : adhésion au club MODULEF dès sa création dans le cadre de l'IRIA en 1974, engagement au GAMNI dès presque sa création en 1975, organisation d'un stage à l'ECL en 1974-75, enseignement d'un cours de DEA sur les éléments finis à la même époque.

Le premier travail de recherche dans le domaine des éléments finis s'est fait dans le cadre la thèse de troisième cycle de F. MUSY à partir de 1973. En vue de gains en temps de calcul, deux méthodes originales de résolution de systèmes obtenus par discrétisation éléments finis sont introduites : l'une basée sur la notion d'éléments hiérarchiques comme, par exemple, les éléments  $P_1$  et  $P_2$  sur un triangle, l'autre supprimant la phase d'assemblage pour aboutir à la résolution d'un système linéaire de type point-selle. Cette méthode « sans-assemblage » a été intégrée au code MODULEF dans le cadre d'un contrat avec l'IRIA.

Toujours dans le but d'élaborer des solveurs performants, la collaboration entre J.-F. MAITRE et F. MUSY s'est poursuivie par l'étude d'algorithmes multi-niveaux. Pour ce qui concerne les méthodes à deux niveaux de discrétisation, des estimations fines du cosinus de l'angle entre deux sous-espaces ont été obtenues en se ramenant à des calculs sur l'élément.

J.-F. MAITRE et F. MUSY ont ensuite été parmi les premiers en France à s'intéresser à l'analyse numérique des méthodes multi-grilles pour la résolution de problèmes aux limites discrétisés par éléments finis. Cette méthode consiste à

effectuer sur des grilles de finesse différente quelques itérations d'une méthode itérative bien choisie appelée *lisseur*. Son coût est optimal au sens où il est proportionnel au nombre d'inconnues sur la grille la plus fine. Au début des années 1980, la méthode était inconnue en France alors qu'en Allemagne, à Cologne, se tenait le premier congrès multi-grille (novembre 1981). L'organisation à l'ECL en septembre 1983 d'une école d'été a eu pour but de la faire découvrir. La plupart des résultats de l'époque étaient obtenus par une analyse de FOURIER préconisée par Achi BRANDT et restaient donc essentiellement limités aux problèmes à coefficients constants et aux grilles régulières. De son côté, Wolfgang HACKBUSH proposait une approche plus générale basée sur un découplage propriété de lissage/propriété d'approximation.

L'introduction d'un formalisme variationnel a permis à J.-F. MAITRE et F. MUSY de développer une théorie très générale sur la convergence de la méthode dans le cas de problèmes elliptiques symétriques. Le cas du schéma multi-grille « *V-cycle* » qui nécessite une analyse différente du « *W-cycle* » plus simple à étudier, a pu être appréhendé de façon systématique par l'introduction de nouvelles quantités « 2-grilles » permettant ainsi de borner le taux de convergence multi-grille indépendamment de la finesse du maillage pour des problèmes aux limites  $H^2$ -réguliers. Des estimations réalistes de ces quantités « 2-grilles » pour différentes classes de lisseurs comme par exemple GAUSS-SEIDEL ont été obtenues, justifiant certains comportements de la méthode. Dans la thèse d'El Montasser ABDALASS, un solveur performant pour le problème de STOKES mêlant multi-grilles et éléments finis adaptatifs est ensuite proposé.

Les liens entre volumes finis et éléments finis et les estimateurs *a posteriori* que l'on peut leur associer ont aussi fait l'objet d'un nombre important de travaux de Jean-François. Ceux-ci ont commencé à la fin des années 80 et se sont poursuivis après son départ à la retraite. Ils sont associés à des thèses soutenues à l'université Lyon 1 que Jean-François a dirigées conjointement avec Jacques BARANGER et d'une thèse en co-direction avec Abdel-Malek ZINE à l'ECL ensuite. La première thèse est celle de Philippe EMONOT soutenue en décembre 1992 (thèse avec financement industriel de la CISI-Grenoble). Elle concerne entre autres les volumes éléments finis : en sus de la proposition et mise en œuvre d'une méthode volumes éléments finis pour les équations de NAVIER-STOKES, on y trouve des résultats pour l'élément fini  $Q_1$  (rectangle) et l'élément  $P_1$  bulle- $P_1$  de CROUZEIX-RAVIART pour le problème de STOKES. Deux autres thèses sont soutenues en novembre 95. Celle de Fabienne OUDIN étudie les liens volumes finis-éléments finis mixtes avec intégration numérique, puis le cas des éléments non conformes. Les équivalences entre ces méthodes fournissent un résultat de super-convergence et un estimateur *a posteriori* volumes finis (avec une version en

décomposition de domaines). Celle de Boujemâa ACHCHAB (maintenant professeur au Maroc) concerne entre autres les estimateurs d'erreur *a posteriori* éléments finis pour des problèmes de convection-diffusion (SUPG) et de transport (SUPG et GLS), et les estimateurs d'erreur *a posteriori* hiérarchiques avec application aux éléments finis mixtes ( $RT_k$  pour le Laplacien,  $P_1$  non conforme,  $P_0$  pour STOKES). Dans ces deux thèses, l'interprétation des volumes finis en terme d'éléments finis mixtes avec intégration approchée a permis d'utiliser les techniques éléments finis dans un domaine où les outils spécifiques étaient peu nombreux. Abdellatif AGOUZAL a participé aux recherches de ces deux thèses de 1995. Divers aspects des estimateurs d'erreur *a posteriori* de la thèse de B. ACHCHAB ont fait ensuite l'objet de nombreuses études car ils permettent de faire du raffinement de maillage en contrôlant la qualité de la solution. Notons que des résultats ont également été obtenus avec J. BARANGER sur la liaison volumes finis/éléments finis pour des maillages rectangulaires.

La dernière thèse a été soutenue par Hicham SOUHAIL en 2004 et co-dirigée avec A.M. ZINE dans le cadre d'un contrat avec Michelin. Elle a permis d'expliquer un estimateur *a posteriori* pour les schémas volumes finis introduits dans la thèse de F. OUDIN, cela en utilisant l'analyse de ces schémas dans le cadre des éléments finis mixtes de RAVIART-THOMAS et l'estimation hiérarchique. Ce travail a aussi permis de développer des schémas volumes finis d'ordre élevé avec application à la résolution de problèmes d'élasticité non-linéaire en grandes déformations.

Dans les années 1990-2000, Jean-François a mené des travaux dans le domaine des méthodes de domaines fictifs en collaboration avec J. HASLINGER et L. TOMAS. Ces méthodes, basées sur l'introduction astucieuse de multiplicateurs de Lagrange distribués, permettent de résoudre efficacement par des solveurs rapides des problèmes de géométrie complexe en utilisant des maillages indépendants des frontières réelles. Leur application aux problèmes d'optimisation a été particulièrement intéressante.

Les travaux scientifiques de Jean-François lui ont valu une belle reconnaissance à l'étranger, aux USA, en Europe (dont bien sûr à Oberwolfach où il a été invité au moins une dizaine de fois). Il a participé à de nombreuses conférences en France et à l'international, et en a organisé ou co-organisé lui-même beaucoup. Outre l'école sur les multi-grilles déjà mentionnée, citons la co-organisation avec C.-M. BRAUNER du congrès national d'analyse numérique à Aussois en 1981 ou l'école sur les éléments finis mixtes à l'ECL en 1986 ou d'autres conférences organisées dans le cadre du GAMNI, on reviendra sur ce point. Son dynamisme dans la participation à l'organisation du congrès SMAI 2015 par l'Institut Camille Jordan avait encore impressionné de nombreux collègues!

La formation par la recherche et plus généralement l'enseignement ont joué un rôle central dans la carrière de Jean-François. Il a marqué de nombreuses générations d'étudiants par ses cours au contenu dense et au rythme soutenu, sa disponibilité, son enthousiasme. Il a dirigé une vingtaine de thèses. Outre les thèses sur des aspects fondamentaux de l'analyse numérique, il s'est aussi intéressé à des sujets plus appliqués qui ont conduit certains de ses élèves à de belles carrières dans l'industrie, comme par exemple Pascal MIALON à EDF ou Yves PERREAL chez Thales.

Jean-François MAITRE avait un sens profond du service de la communauté scientifique comme l'atteste sa participation au CNU de 1983 à 1991. Il s'est aussi beaucoup investi dans la SMAI dont il a été membre du conseil d'administration pendant de nombreuses années. En particulier, il a été très actif pour les manifestations à l'occasion des 20 ans de la SMAI en 2003, pour lesquelles il avait rédigé un historique de la SMAI et des fameux CANUM (congrès national d'analyse numérique). Jean-François avait d'ailleurs assisté à tous les CANUM sauf celui de Royan en 1991. En 2017, au congrès SMAI à Ronce-les-Bains, Jean CÉA et Jean-François MAITRE ont fait une intervention remarquable rappelant l'histoire et la motivation de la création des CANUM (dont la première édition organisée par J. CÉA a eu lieu à Paimpol en 1967); un article commémorant le 50<sup>e</sup> anniversaire et rédigé par Jean et Jean-François a aussi été publié dans Matapli en 2017.

C'est son engagement au sein du GAMNI qui a été le plus remarquable et essentiel pour lui. Le GAMNI (groupement pour l'avancement des méthodes numériques de l'ingénieur) était une association indépendante créée en 1974, qui a ensuite fusionné avec la SMAI dès 1985. Il s'agissait à cette époque du seul groupe thématique de la SMAI. Longtemps vice-président du groupement puis du groupe, c'est comme président de 2001 à 2004 que Jean-François a eu un rôle décisif.

Jean-François a mis dans sa présidence du GAMNI la même énergie qu'il déployait dans toutes ses activités. Loin de présider de loin en se reposant sur les plus jeunes, il n'hésitait jamais à s'occuper lui-même des tâches concrètes, ce qui naturellement facilitait le travail du secrétaire de l'époque, Michel KERN! Les réunions semestrielles du comité de liaison avaient souvent lieu dans les locaux de « Paris 6 », déplacés rue du Chevaleret pour cause de désamiantage, ce qui imposait un aller-retour Lyon-Paris à Jean-François. Ces réunions étaient régulièrement suivies ou précédées d'un déjeuner convivial, au cours duquel Jean-François ne manquait pas de raconter sa sortie à vélo de la veille!

Au début des années 2000, l'émergence de nouveaux acteurs et le grand nombre de conférences organisées autour de ce qui devenait le calcul scienti-



**FIGURE 3** — *Intervention de Jean CÉA et Jean-François MAITRE au congrès SMAI en 2017.*

fique a conduit Jean-François à orienter l'activité du GAMNI vers l'organisation de journées plus ciblées que les grandes conférences qui avaient été la marque du GAMNI jusque-là. Ces journées correspondaient à des besoins bien identifiés et ont toujours rencontré un grand succès. Celle qui revient le plus à la mémoire de M. KERN est la journée « Codes d'éléments finis libres » organisée au CNAM à Paris en 2003. Jean-François s'était particulièrement investi dans son organisation. Développer des logiciels libres n'allait pas encore de soi en 2003, Jean-François avait senti l'importance de donner de la visibilité à ces projets dont certains existent toujours aujourd'hui (FreeFem, GetFEM, ...). La journée avait réuni soixante-dix personnes, le compte rendu rédigé par J.-H. SAÏAC est disponible en ligne sur le site du CMAP de l'École Polytechnique. C'est sous la présidence de Jean-François que le GAMNI a fêté ses 30 ans, marqués par une journée sur la « Résolution performante des systèmes linéaires pour la solution d'équations aux dérivées partielles couplées », organisée à l'IHP.

Une autre action dans laquelle Jean-François s'est beaucoup investi concernait les liens avec d'autres sociétés savantes, en particulier la CSMA (*Computational Structural Mechanics Association*). Jean-François a beaucoup œuvré pour tenter de recréer ces liens. Les deux groupes avaient en commun d'être membres de la société européenne ECCOMAS, et les rapports avec cette dernière ont parfois été délicats. Il a par ailleurs été à l'origine du prix de thèse du groupe GAMNI-SMAI qui a été attribué pour la première fois en 2005 et dont la liste des récipiendaires contient des noms maintenant bien connus dans notre communauté!

Jean-François a été nommé président d'honneur du GAMNI. Et c'est tout naturellement lui qui se trouva, en 2014, à l'initiative des journées pour les 40 ans du GAMNI à Ecully. On retrouve ainsi à la fois son souci de préserver l'histoire du GAMNI, et celui d'associer Lyon et l'École Centrale à ses activités. À cette occasion, il a présenté un exposé sur l'histoire du groupe. Ces précieux documents sont présents sur le site de la SMAI.



**FIGURE 4** — *Cocktail des 30 ans du GAMNI, IHP, 2004. De gauche à droite : Jean-Pierre PUEL, Patrick LASCAUX, Jean-François MAITRE, Jacques PÉRIAUX, Olivier PIRONNEAU.*

C'est donc la mémoire d'un très cher et précieux collègue que nous saluons ici. De l'avis de tous, Jean-François était un chercheur passionné, curieux, rigoureux, très généreux et humain. Il était extrêmement ouvert et aimait débattre sur toutes sortes de sujets scientifiques. Beaucoup ont pu bénéficier de ses connaissances, ses conseils judicieux, sa bienveillance. Il aimait adresser à chacun des publications pointues et pertinentes. Il était aussi très soucieux de garder la trace



**FIGURE 5** — *Un moment de détente au congrès SMAI 2015, Les Karellis, avec des collègues de l'Institut Camille Jordan, laboratoire organisateur du congrès.*

du passé.

Concluons en mentionnant une autre activité fort importante pour lui : il a été un des membres fondateurs du groupe cycliste (qui s'appelait « les truites » à l'origine) qui a vu durant de nombreuses années d'éminents collègues s'activer du jarret la journée (et de la mâchoire, semble-t-il, le soir à l'étape) l'été dans diverses régions de France (groupe pour lequel Michèle, sa femme, jouait un rôle logistique et psychologique essentiel) et la rumeur dit que parfois sur son vélo lui venaient quelques idées mathématiques intéressantes.

*Mes remerciements les plus vifs à Grégoire ALLAIRE, Jacques BARANGER, Michel KERN et François MUSY pour leurs contributions, et à Claude-Michel BRAUNER pour ses suggestions et commentaires.*

## DÉBUTS DE L'ANALYSE NUMÉRIQUE À LYON

*par :*

*FRANÇOIS ROBERT<sup>3</sup> – Professeur (de 1973 à 1999) à  
l'ENSIMAG, Institut National Polytechnique de  
Grenoble.*

La période de 1971 à 1974 correspond à quatre années de collaboration avec Jean-François MAITRE pour développer l'analyse numérique en région Lyonnaise.

Dans la seconde partie des années (19)60, l'étude des normes de matrices et d'opérateurs, avec application à la convergence des méthodes itératives d'analyse numérique linéaire était centrale, aussi bien aux USA qu'en Europe, avec Friedrich Ludwig BAUER à Munich, Miroslav FIEDLER et Vlastimil PTÁK à Prague, Noël GASTINEL à Grenoble, tous très liés à Alston Scott HOUSEHOLDER, Richard Steven VARGA, Gene Howard GOLUB aux USA, à James Hardy WILKINSON au Royaume uni etc.

C'est dans ce contexte que le jeune bisontin Jean-François MAITRE eut l'occasion d'un séjour de recherche à Munich sur invitation de F. L. BAUER (mai 1967 à septembre 1968) tout en étant comme moi élève de N. GASTINEL en Thèse d'Etat à Grenoble (sur 5 ans, à peu près l'équivalent de l'actuelle HDR) où il occupa un poste de Maître-Assistant de 1968 à 1970.

Nous étions donc de vieux camarades, frères d'armes lorsque à la rentrée 1970 nous nous retrouvâmes l'un et l'autre à Lyon, Jean-François à l'École Centrale de Lyon à Ecully et moi à l'Université de Lyon 1, UFR de mathématiques (où j'étais d'ailleurs le seul matheux appliqué...)

De fait, en mathématiques appliquées, le contexte universitaire lyonnais disposait déjà d'unités d'enseignement, mais on y manquait cruellement d'enseignants spécialisés... et de moyens de calcul! La tendance de l'époque était à la création de Centres de Calcul, cette structure manquait à Lyon et il fallait vraiment œuvrer et mouiller la chemise pour la mettre sur pied. Les bonnes volontés étaient là, dans une concertation solidaire d'enseignants entre l'ECL, Lyon 1 et l'INSA (Guy BAYADA)

C'est ainsi que Jean-François et moi nous nous investissions pour fédérer les jeunes enseignants de façon concertée et faire avancer leur recherche. Cette petite communauté se sentait assez isolée dans le contexte universitaire Lyonnais,

---

3. [robertfranc@orange.fr](mailto:robertfranc@orange.fr)

mais le Directeur de l'ECL, Monsieur Paul COMPARAT, nous apporta aide et appui avec constance. Une première esquisse informelle (dénommée le CLAC, centre lyonnais d'analyse et de calcul!) fut réalisée par une offre faite aux mécaniciens, physiciens, chimistes des Campus lyonnais de nous apporter leurs problèmes de calcul. Curieusement, elle remporta un franc succès, car notre petit groupe offrait ainsi une aide réelle en méthodes numériques et en programmation. Ces quelques résultats très positifs créèrent une dynamique, et un projet effectif de Centre de Calcul avec achat d'une machine IRIS de la CII vit le jour. Avec la forte dynamique insufflée alors par deux nouveaux Grenoblois, Jean-Claude SABONNADIÈRE et Michel TERRENOIRE (ça commençait à faire beaucoup de Grenoblois pour les matheux lyonnais) le centre interuniversitaire de calcul de Lyon Saint Etienne (CICLS) fut effectivement créé!

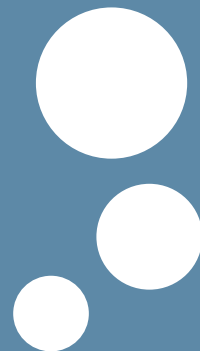
Bien que nous eûmes tous à affronter pas mal de difficultés, je garde un excellent souvenir de cette période, car il s'était ainsi créé une dynamique commune, à laquelle Jean-François et moi apportions ensemble toute notre conviction et notre bonne volonté. Nous coordonnions les enseignements entre l'INSA, l'ECL et Lyon, coachions les thèses de troisième cycle préparées par quelques assistants et avons publié ensemble une théorie sur les découpages de matrices (comme extension du passage classique à l'époque entre les méthodes de JACOBI et de GAUSS-SEIDEL!)

Par ailleurs, l'Université de Saint Etienne cherchait aussi à développer des enseignements d'analyse numérique, sans encore aucun poste créé. Dans l'attente d'en obtenir, et pour prouver le mouvement en marchant (stratégie efficace à l'époque, voir plus haut!) on nous demanda d'aller prêter main forte aux enseignements nouvellement créés en Analyse numérique à Saint Etienne.

C'est ainsi que chaque semaine, Jean-François et moi prenions chacun notre voiture à deux jours d'intervalle pour porter la bonne parole aux étudiants stéphanois! Il faut dire que cette collaboration interuniversitaire était estimée et appréciée, et que nous étions l'un et l'autre très bien reçus dans le contexte novateur de l'époque. Cela dura, je pense, pendant deux années au moins, jusqu'à ce qu'enfin un poste soit effectivement créé à Saint Etienne, et c'est notre regrettable vieux camarade Claude CARASSO (encore un grenoblois...) qui fut nommé et prit de suite le relais.

Dans ce texte, j'espère avoir rendu sensible un peu de l'ambiance professionnelle de l'époque, où notre jeunesse et nos convictions ont réussi à faire avancer les choses. Cette tranche de vie professionnelle avec Jean-François MAITRE reste pour moi un témoignage de sérieux, d'enthousiasme et d'entraide partagée. Jean-François aura développé ultérieurement plein d'autres aventures scientifiques. Mon amitié pour lui s'inscrit dans l'estime générale qui lui est unanimement portée.





*par :*

*Henri MASSIAS<sup>1</sup> – XLIM, CNRS*



## Introduction

---

Le Réseau Thématique Mathrice<sup>2</sup> rassemble les informaticiennes et informaticiens, administrateurs et administratrices systèmes et réseaux (ASR) des laboratoires de mathématiques du CNRS, des universités et des écoles d'ingénieurs et ingénieurs françaises.

Mathrice est à la fois un lieu d'échange et d'entraide et un soutien à la recherche en mathématique par la mise à disposition de multiples services. Parmi ces derniers, on peut citer l'annuaire de la communauté mathématique, l'annuaire d'authentification, des logiciels mutualisés<sup>3</sup>, l'accès aux revues scienti-

---

1. [henri.massias@math.cnrs.fr](mailto:henri.massias@math.cnrs.fr)

2. <https://www.mathrice.fr>

3. Voir le paragraphe 3

fiques, l'hébergement de sites Web, des espaces de travail collaboratifs. Ces services constituent un ensemble désigné par la suite PLM pour Plate-forme en Ligne pour les Mathématiques<sup>4</sup>.

## 1 Genèse

Mathrice est né en 2000<sup>5</sup>. Christian Peskine (directeur scientifique adjoint au département Sciences Physiques et Mathématiques du CNRS) a organisé une réunion adressée aux directeurs d'unité et à toute personne intéressée en mai 2000 au siège du CNRS, au cours de laquelle les différents services pour les mathématiciennes et les mathématiciens ont été présentés : Idris (Institut du développement et des ressources en informatique scientifique), Calcul Formel Medicis, Urec (Unité REseaux du CNRS), etc. C'est là qu'a été faite la déclaration de principe de créer un réseau métier pour l'informatique dans les laboratoires de mathématiques animé par Joël Marchand (ingénieur informaticien à l'Institut de mathématiques de Jussieu).

## 2 Le réseau de métier

Au cours des vingt cinq années passées, les actions et activités de Mathrice se sont fortement enrichies et diversifiées. De l'idée de faciliter les échanges d'expériences et de créer de la proximité entre les ASR de laboratoire de toute la France, dans le but de générer au niveau national un effet structurant sur l'informatique des laboratoires de mathématiques, sont nés :

- Des informations utiles, via une liste de diffusion (formations, alertes de sécurité, messages de l'INSMI, du CNRS, etc.), et des questions techniques ou spécifiques à la communauté mathématique.
- Des rencontres où les mathriciennes et les mathriciens présentent leur travaux, leurs expérimentations.
- Des actions de formation, notamment l'organisation d'ANF (Action Nationale de Formation financées par le CNRS).
- Des visites de laboratoire au cours desquelles des membres du réseau apportent un regard extérieur sur l'informatique locale.

4. <https://services.math.cnrs.fr>

5. Voir l'article très complet rédigé à l'occasion de la célébration des 20 ans de Mathrice : <https://www.insmi.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/le-reseau-thematique-mathrice-20-ans>

- Des services numériques à destination de l'ensemble des membres des laboratoires de la communauté mathématique.
- De la documentation technique.
- Des actions de communication.

Des rencontres Mathrice sont planifiées tous les six mois et durent quatre demi-journées réparties sur trois jours. Tous les deux ans, l'une de ces réunions est remplacée par une ANF. Ces actions qui participent à la formation, sont particulièrement importantes afin de permettre aux participantes et aux participants d'anticiper les évolutions de nos métiers.

Les dernières rencontres ont eu lieu au laboratoire XLIM à Limoges en mai 2025. Elles ont été lancées par l'intervention habituelle de la direction du CNRS Mathématiques. Une table ronde avec des enseignants-chercheurs et une enseignante-chercheuse de XLIM a permis d'échanger sur leurs besoins et connaître leur utilisation de la PLM. Des présentations variées sur des sujets d'intérêt pour les ASR ont été données par les participantes et les participants. Un atelier sur Nix a également été proposé. Des discussions en groupe entre toutes ces personnes ont donné lieu à des contributions collectives sur le thème du renouvellement du RT Mathrice, de la prochaine ANF et de l'utilisation de l'IA dans nos professions.

Les prochaines rencontres auront lieu au LAMA<sup>6</sup> à Champs sur Marne début décembre. Elles seront aussi l'occasion de célébrer les 25 ans de Mathrice<sup>7</sup>.

## 3 Les services à la communauté mathématique

### 3.1 L'annuaire de la communauté mathématique

Cet annuaire<sup>8</sup> des mathématiciennes et mathématiciens, membres des laboratoires de recherche (UMR, FR, UMI, EA, etc.), des départements d'enseignement supérieur, et des sociétés savantes (SMAI, SMF, SFDS) référence environ 9500 personnes réparties sur une centaine d'entités.

L'équipe restreinte en charge de cet annuaire s'appuie sur un réseau de correspondantes et correspondants dans les unités, chargés de veiller à la bonne collecte des informations sur les membres de leur unité. De nombreux contacts avec les laboratoires ont permis de maintenir ce réseau opérationnel, gage de qualité de cet annuaire. Celui-ci joue un rôle clé afin de gérer les droits d'accès aux

6. <https://lama-umr8050.fr>

7. <https://indico.math.cnrs.fr/e/25ans-mathrice>

8. <https://portail.math.cnrs.fr/annuaire/Personnes>

services numériques et de faciliter et automatiser la création de comptes PLM. C'est aussi une base de donnée nationale qui, au delà des divers employeurs, rassemble l'ensemble des personnels œuvrant pour produire de la recherche et de l'enseignement en mathématiques. C'est un bien commun précieux.

### 3.2 la PLM : Plate-forme en Ligne pour les Mathématiques

Actuellement la PLM comporte 21 services<sup>9</sup> dont plusieurs mis en place lors de la pandémie COVID-19 (CodiMD, Rocket.Chat, PLMkan, forum). Il y a actuellement 7755 comptes PLM dont 3500 comptes invités ou invitées. Cette plateforme est développée et maintenue par une équipe technique (PLMteam) nationale composée de volontaires, informaticiennes et informaticiens dans les laboratoires.



La PLM propose les services suivants :

**Invitations** qui permet de créer un compte invité pour pouvoir collaborer avec des personnes non référencée sur l'annuaire de la communauté mathématique (par exemple pour une chercheuse étrangère ou appartenant à une autre communauté de recherche).

**Forum** qui est un lien d'échanges, de partage d'expériences, de discussions.

**Rocket.Chat** un service de (T)chat/clavardage qui permet d'échanger des messages instantanés au sein d'une équipe et qui ne nécessite pas un compte PLM.

**Mattermost** qui est également un service de (T)chat mais qui requiert un compte PLM.

**Hébergement web** pour héberger un site web ou ses pages professionnelles.

**Indico** qui est un outil pour planifier et organiser des événements, de la simple réunion à des rencontres plus complexes : workshops, conférences avec sessions multiples thématiques et/ou parallèles.

9. <https://services.math.cnrs.fr>

**CodiMD** qui est un service web de traitement de texte collaboratif et en temps réel basé sur le format Markdown.

**PLMbox** qui permet de synchroniser des fichiers entre différentes machines ou différents utilisateurs, de partager des fichiers (en lecture et écriture), proposer des fichiers en téléchargement, recevoir des fichiers (quelles que soient leurs tailles). Il est également possible d'éditer des fichiers word, excel ou powerpoint depuis votre navigateur web en simultané (ou pas) avec des collaborateurs.

**plmlab** qui est une forge logicielle avec des fonctionnalités d'intégration continue, fonctionnant sous gitlab.

**plmsurvey** qui est un outil de génération d'enquêtes, sondages, formulaires d'évaluation.

**VPN (Virtual Private Network)** qui permet un accès sécurisé à des services lors de déplacements.

**Listes** qui permet de créer et gérer des listes de diffusion.

Courrier électronique qui permet la création d'une adresse mél. pérenne en [@math.cnrs.fr](mailto:@math.cnrs.fr).

**PLMkan** qui est un outil collaboratif de planification et de gestion des tâches qui est basé sur la méthode kanban.

**WIMS** <sup>10</sup> qui est un serveur éducatif.

**Jetons** qui propose des jetons logiciels accessibles nationalement pour les logiciels Maple et Matlab.

PLMlatex<sup>11</sup>, qui est une instance d'Overleaf Community Edition, est le service de la PLM le plus utilisé : 137000 projets, 37000 utilisateurs et utilisatrices, dont une moyenne de 4000 par semaine et 1800 par jour. Il permet l'édition collaborative simultanée via un navigateur web de documents  $\LaTeX$ . Son succès est expliqué d'une part par le fait que la rédaction de documents  $\TeX/\LaTeX$  est une part importante de l'activité des chercheurs et des chercheuses en mathématiques et d'autre part par l'absence d'autre solution destinée à la communauté enseignement supérieur et recherche. Il est utilisé au delà de la communauté mathématique car l'accès est possible pour toute personne possédant un identifiant sur la fédération d'identité Éducation Recherche (opérée par RENATER).

La mise en oeuvre dès 2019 de plateformes Kubernetes (solution d'orchestration de conteneurs, connues sous le nom de PLMshift ou PLMapps) a permis de déployer rapidement et de façon reproductible des environnements logiciels

10. <https://wims.univ-cotedazur.fr/description.xhtml>

11. <https://plmlatex.math.cnrs.fr>

de complexité variable sous forme de conteneurs. Ces plateformes permettent à la PLMteam de redéployer une grande partie des services depuis des systèmes virtualisés vers des applications conteneurisées. De plus, il a été fait le choix de mettre ces environnements à disposition de l'ensemble de la communauté mathématique qui a su se l'approprier afin de déployer ses propres projets, comme des instances shinyR<sup>12</sup> (avec une petite communauté qui s'est constituée autour de cette solution), des applications de gestion d'événements (comme des sites de rencontres de la SMAI, du CANUM), les sites de partenaires (AMIES, RNBM, Resinfo, CIMPA), etc. et aussi d'applications à vocation scientifique comme les plateformes JupyterHub ouvertes<sup>13</sup> à la fédération Education Recherche (périmètre national) et eduGAIN (périmètre international). Ces dernières ont permis à des projets de formation de se réaliser (une à deux formations nationales par an), à des utilisateurs et des utilisatrices de notre communauté de profiter de notebook jupyter à jour et à disposition sans pré-requis. De plus, dans le cadre de l'effort d'équipement porté par l'INSMI et le groupe Calcul, nous avons pu équiper les serveurs sous-jacents de cartes GPUs performantes (NVidia A100), ce qui a donné une valeur ajoutée à cette offre. En effet, à notre connaissance, il n'existe pas de service de ce type avec GPUs accessibles à la demande dans notre contexte académique.

Enfin, une offre de stockage Cloud est en préparation à destination des laboratoires et des projets ne trouvant pas d'offre adaptée à leurs besoins.

Ces services sont hébergés sur deux infrastructures Cloud (GRICAD à Grenoble et Virtual Data à Paris Saclay), sur des serveurs physiques à Bordeaux et Lyon. Un serveur de sauvegarde est aussi localisé chez Mathdoc à Grenoble. L'évolution vers des infrastructures Cloud a débuté dès 2020 et l'objectif est de ne plus utiliser que des hébergements de ce type.

## 4 Les défis

Comme tous les Réseaux Thématiques du CNRS, Mathrice fonctionne sur des mandats de cinq ans. Le dossier de renouvellement<sup>14</sup> pour le prochain mandat 2026-2030 a fait l'objet, comme les autres, d'un intense travail collectif.

Les objectifs pour le prochain mandat sont de conserver une communauté dynamique et soudée en continuant les efforts d'animation du réseau de métier,

---

12. [https://plmshift.pages.math.cnrs.fr/exemples\\_de\\_deploiement/deployer\\_shinyr/](https://plmshift.pages.math.cnrs.fr/exemples_de_deploiement/deployer_shinyr/)

13. <https://jupytercloud.math.cnrs.fr/sites/>

14. Les dossiers de demande de renouvellement du RT sont consultables à l'adresse suivante : <https://www.mathrice.fr/gds/>

en testant, par exemple, de nouvelles formes d'échanges et de collaboration.

Des réflexions sur les services à maintenir, faire évoluer ou arrêter continuent, bien sûr, à être menées. L'émergence de l'utilisation de l'IA<sup>15</sup> dans nos métiers et dans ceux de la communauté mathématique est aussi évidemment un point d'attention.

Pour relever ces défis, il est important de continuer à bénéficier de l'implication des collègues et de l'appui de la communauté. Les directions successives de CNRS Mathématiques ainsi que les directeurs des unités de mathématiques incitent les ASR à participer aux activités de Mathrice. Avec le soutien de la direction de CNRS Mathématiques, la PLMteam a été étoffée grâce au recrutement de plusieurs collègues affecté à la PLM (à 50%) ce qui permet de sécuriser le maintien en condition opérationnelle des services (monitoring, traitement des demandes et signalement des incidents, suivi de l'exploitation des services et de leurs sauvegardes, etc.) tout en renforçant la présence d'ASR dans les unités. Des recrutements en cours au CNRS intègrent des quotités de 20 à 30% qui pourront compléter les forces plus largement.

### Henri MASSIAS



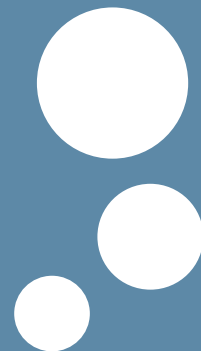
Henri Massias est ingénieur de recherche au laboratoire XLIM à Limoges et est très impliqué dans le réseau Mathrice depuis de nombreuses années. Il est notamment le référent réseau métier Mathrice et membre de l'équipe nationale PLM Team qui gère les services numériques au sein de la Plateforme en ligne pour les Mathématiques. Il est également membre du bureau du Conseil Scientifique de CNRS Mathématiques.

**Email :** [henri.massias@math.cnrs.fr](mailto:henri.massias@math.cnrs.fr)

---

15. Intelligence Artificielle





---

## TABLE DES MATIÈRES

**PARTIE : CALCULUS OF VARIATIONS IN LILLE - 4TH EDITION - 2024** ..... 149

**PARTIE : ÉTUDE ET COMPARAISON DE DIFFÉRENTS MODÈLES DE DYNAMIQUE PIÉTONNIÈRE** ..... 151

## CALCULUS OF VARIATIONS IN LILLE - 4TH EDITION - 2024

La conférence *Calculus of Variations in Lille* s'est tenue du 24 au 28 juin 2024, et a réuni des experts internationaux ainsi que de jeunes chercheurs dans le domaine du calcul des variations. Elle a été co-organisée par Marc Pegon, Benoît Merlet, Andrea Natale et Juliette Venel. Soutenue par diverses institutions, cette rencontre visait à explorer les applications du calcul des variations dans des domaines aussi variés que la physique, la mécanique et le traitement d'images.

Cette quatrième édition a comporté un programme scientifique dense et varié : 16 conférences plénières données par des chercheurs de renommée internationale, 11 exposés contributifs, ainsi qu'une session de posters. Les jeunes chercheurs ont occupé une place importante dans ce programme.

Neuf d'entre eux ont eu l'opportunité de présenter leurs travaux sous la forme d'exposés courts :

- Benoît Van Vaerenbergh (Université catholique de Louvain)
- David Padilla-Garza (IST Austria)
- Benjamin Lledos (Université catholique de Louvain)
- Alessandro Cosenza (Université Paris Cité)

- Rossella Giorgio (Technische Universität Wien)
- Nicolas Clozeau (IST Austria)
- Yana Teplitskaya (Université Paris-Saclay)
- Federico Luigi Dipasquale (Scuola Superiore Meridionale)
- Dorian Martino (Université Paris Cité)

De plus, une session posters a permis aux doctorant.e.s/post-doctorant.e.s suivants de présenter et discuter de leurs recherches :

- Sana Ben Hafsia (Université Paris-Est Créteil)
- Silvio Bove (Université de Rouen Normandie)
- Leon Happ (TU Wien)
- Richard Joly (École Polytechnique)
- Erwan Le Quiniou (Université de Lille)
- Armand Ley (Université de Haute-Alsace)
- Ève Machefert (Université Paris Saclay)

Ces moments ont favorisé des échanges scientifiques particulièrement riches et des discussions approfondies entre les participants.

La Société de Mathématiques Appliquées et Industrielles (SMAI) a joué un rôle clé dans la réussite de cette édition, en apportant un soutien financier dans le cadre de son appel à projets *BOUM*. Ce financement a permis de prendre en charge partiellement les frais de déplacement et de repas de plusieurs jeunes chercheurs, facilitant ainsi leur participation active à la conférence.

Au-delà du programme scientifique, la conférence a également favorisé un cadre convivial et stimulant, encourageant les interactions entre les générations de chercheurs et renforçant les liens au sein de la communauté. Nous remercions chaleureusement la SMAI pour sa contribution essentielle à la réussite de cette rencontre.

# ÉTUDE ET COMPARAISON DE DIFFÉRENTS MODÈLES DE DYNAMIQUE PIÉTONNIÈRE

Pour ce projet BOUM, nous avons bénéficié du soutien de la SMAI et du CIRM pour une semaine de recherche en résidence du 9 - 14 Février 2025.

## Modèles macroscopiques de dynamique piétonnière

Par ses applications et aussi par les nombreux modèles existants, la dynamique piétonnière est un domaine suscitant beaucoup d'intérêt.

Les modèles de dynamique piétonnière sont typiquement regroupés en trois catégories, en fonction de leur échelle de modélisation.

- **Modèles microscopiques.** La dynamique de chaque agent est modélisée de manière individuelle, donnant lieu à un système couplant de nombreuses équations différentielles.
- **Modèles mésoscopiques.** Adaptent la méthodologie de la physique statistique et conduisent typiquement à l'étude d'équations cinétiques.
- **Modèles macroscopiques.** Étudient la dynamique de la distribution des agents au lieu de les considérer individuellement. Cela conduit typiquement à étudier des systèmes couplés d'équations aux dérivées partielles (EDPs).

Dans notre travail nous nous sommes concentrés sur les modèles macroscopiques en deux dimensions d'espace, et plus particulièrement aux modèles issus des jeux à champ moyen et au modèle de Hughes et ses variantes.

### Jeux à champ moyen

Les jeux à champ moyen (MFG pour Mean Field Games en anglais), introduits indépendamment par Lasry-Lions [8] et Huang-Caines-Malhamé [5], forment un cadre théorique pour analyser les équilibres de Nash de jeux dynamiques comportant un très grand nombre d'agents identiques, où chaque agent a une influence individuelle négligeable mais interagit avec la distribution collective des autres agents. Dans le contexte d'un problème d'évacuation,

on choisit de voir le problème comme un jeu où les agents cherchent à sortir le plus rapidement possible. Le paradigme des MFG est alors pertinent si le nombre d'agents est suffisamment grand. Dans l'approche de Lasry et Lions, le problème se ramène à l'étude d'un système couplé d'EDPs, comprenant une équation d'Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) — qui décrit la fonction valeur du problème de contrôle optimal d'un agent représentatif — et une équation de Kolmogorov-Fokker-Planck — donnant l'évolution de la distribution des agents. Différentes variantes des modèles MFG permettent de

- modéliser des agents très rationnels [1] ou, à l'inverse, des agents qui paniquent [9];
- considérer plusieurs groupes de piétons ayant des objectifs différents [7].

### Modèles type Hughes

Le modèle de Hughes, introduit en 2002 dans [6], est un système de deux EDPs non linéaires du premier ordre modélisant l'évacuation d'une foule de piétons dans un domaine comportant des sorties. La direction de mouvement des agents dans le domaine est modélisée par le gradient normalisé de la solution d'une équation eikonale dont le terme source dépend de la densité locale de piétons. L'évolution de la densité de piétons au cours du temps est régie par une loi de conservation scalaire dirigée par ce gradient normalisé. Ce modèle mathématique, d'apparence simple, a été étudié au cours des deux dernières décennies. Si aucun résultat général d'existence d'une solution au modèle de Hughes n'est disponible dans la littérature, de nombreux résultats intermédiaires, numériques et théoriques, ont été établis (voir [2] pour un état de l'art récent sur le sujet). Plusieurs variantes et raffinements du modèle de Hughes ont été proposés au cours du temps, par exemple :

- dans [4], les piétons choisissent le plus court chemin indépendamment de la densité mais sont déviés de leur trajectoire via une évaluation non-locale de la densité;
- dans [3], les auteurs introduisent des cônes de vision rendant le calcul du chemin optimal « subjectif ».

### Objectifs et avancées du projet BOUM

L'idée de ce projet, encore en cours, est donc dans un premier temps de recenser différents modèles de dynamique piétonnière pour ensuite en comparer

les différents mécanismes. En effet, plusieurs phénomènes identifiables et mesurables peuvent constituer des caractéristiques distinctives des modèles : l'effet « *Faster is Slower* », le paradoxe de Braess, les ondes Stop and Go, le profil géométrique des engorgements aux sorties, etc. On cherche donc à dresser un bilan qualitatif en déterminant quel modèle pourrait reproduire chacun de ces phénomènes. À cet effet, nous avons construit pendant la semaine du projet BOUM différents scénarios permettant de tester numériquement les propriétés et comportements des différents modèles.

Une des difficultés rencontrées fut de trouver un terrain de comparaison raisonnable entre les différents modèles. Nous avons identifié deux différences principales entre les deux classes de modèles. D'une part les modèles de type Hughes travaillent avec une densité physique alors que les MFG manipulent une densité probabiliste. D'autre part, les MFG permettent typiquement aux agents de choisir leur direction et leur vitesse pour optimiser leur évacuation, tandis que, pour Hughes, la vitesse est déterminée par la congestion.

Compte tenu de ces difficultés, nous avons conçu un certain nombre de scénarios et d'outils de mesure, en nous focalisant sur des situations d'évacuation, nous permettant d'étalonner les différents modèles. Les simulations numériques que nous avons effectuées pendant cette semaine ont permis de dégager des différences de comportement significatives entre les modèles. Certains tests ont également permis d'établir des conjectures mathématiques qui pourraient faire l'objet d'approfondissements théoriques à l'avenir.

## Références

- [1] Y. ACHDOU et J.-M. LASRY. « Mean field games for modeling crowd motion ». In : *Contributions to partial differential equations and applications*. Cham : Springer, 2019, p. 17-42.
- [2] D. AMADORI et al. « The mathematical theory of Hughes' model : a survey of results ». In : *Crowd Dynamics, Volume 4 : Analytics and Human Factors in Crowd Modeling*. Modeling and Simulation in Science, Engineering and Technology. Springer, 2023.
- [3] J. A. CARRILLO, S. MARTIN et M.-T. WOLFRAM. « An improved version of the Hughes model for pedestrian flow ». In : *Math. Models Methods Appl. Sci.* 26.04 (2016), p. 671-697.
- [4] R. M. COLOMBO, M. GARAVELLO et M. LÉCUREUX-MERCIER. « A class of non-local models for pedestrian traffic ». In : *Math. Models Methods Appl. Sci.* 22.04 (2012), p. 1150023.

- [5] M. HUANG, R. MALHAMÉ et P. E. CAINES. « Large population stochastic dynamic games : closed-loop McKean-Vlasov systems and the Nash certainty equivalence principle ». In : *Commun. Inf. Syst.* 6.3 (2006), p. 221-252.
- [6] R. L. HUGHES. « A continuum theory for the flow of pedestrians ». In : *Transp. Res., Part B : Methodol.* 36.6 (2002), p. 507-535.
- [7] A. LACHAPPELLE et M.-T. WOLFRAM. « On a mean field game approach modeling congestion and aversion in pedestrian crowds ». In : *Transp. Res., Part B : Methodol.* 45.10 (2011), p. 1572-1589.
- [8] J.-M. LASRY et P.-L. LIONS. « Mean field games ». In : *Jpn. J. Math. (3)* 2.1 (2007), p. 229-260.
- [9] C. MOUZOUNI. « On quasi-stationary mean field games models ». In : *Appl. Math. Optim.* 81.3 (2020), p. 655-684.

### Jules BERRY



Jules Berry est doctorant à l'INSA Rennes. Sa thèse porte sur les jeux à champ moyen.

**Email :** [jules.berry@insa-rennes.fr](mailto:jules.berry@insa-rennes.fr)

**Site web :** <https://jules-berry.github.io/>

### Théo GIRARD

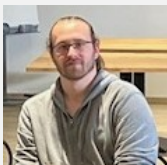


Théo Girard est docteur de l'université de Tours, spécialiste du modèle de Hughes.

**Email :** [girard-theo@orange.fr](mailto:girard-theo@orange.fr)

**Site web :** <https://theogirard.github.io/>

### Florian PERU



Florian Peru est doctorant à l'UMLP, à Besançon. Sa thèse porte sur les méthodes d'approximation de lois de conservation.

**Email :** [florian.peru@univ-fcomte.fr](mailto:florian.peru@univ-fcomte.fr)

# Du côté du réseau MSO-DE et des entreprises

*par :*

*Christian GOUT<sup>1</sup> – LMI, INSA Rouen et AMIES*

*Valérie MONBET<sup>2</sup> – CNRS, IRMAR Rennes et AMIES*

## POSTDOC PASSERELLE

En 2023, AMIES a lancé pour la première fois l'appel à projets "Postdoc Passerelle", qui vise à permettre aux docteurs ayant récemment soutenu une thèse en mathématiques sur un sujet théorique d'ajouter une dimension plus appliquée à leurs compétences. Il s'agit d'un postdoctorat dans un cadre académique, sur le modèle du postdoctorat classique, permettant de se former aux mathématiques appliquées.

Les objectifs principaux de cet appel sont les suivants :

- Permettre aux docteurs en mathématiques ayant un profil purement théorique de se tourner vers des mathématiques plus appliquées et d'acquérir de nouvelles compétences.
- Favoriser l'orientation vers les métiers des mathématiques en entreprise.
- Renforcer l'attractivité du CV des candidats auprès des entreprises.
- Amener les candidats vers un emploi en entreprise à l'issue du postdoctorat.

L'appel a été un véritable succès avec 11 dossiers reçus en juin 2023. Cinq candidatures ont été retenues et financées par AMIES. Il est à noter que trois des cinq lauréats étaient des femmes. L'appel a été renouvelé en 2025 : 15 candidatures ont été reçues, ce qui confirme le succès du dispositif. Trois candidatures ont été retenues, dont une femme.

Les sujets des postdoctorats sont variés :

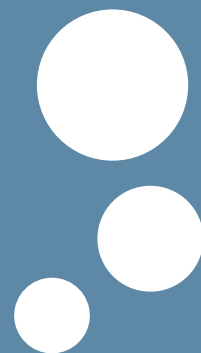
---

1. [christian.gout@agence-maths-entreprises.fr](mailto:christian.gout@agence-maths-entreprises.fr)  
2. [valerie.monbet@agence-maths-entreprises.fr](mailto:valerie.monbet@agence-maths-entreprises.fr)

- Développement d'algorithmes d'optimisation discrète pour la gestion de réseaux, en partenariat avec EDF;
- Développement de modèles d'apprentissage profond pour la détection d'anomalies dans des mesures issues de capteurs low-cost pour la détection de pollen, en partenariat avec la start-up LifyAir;
- Développement de modèles de prédiction pour identifier les patients pour lesquels la thérapie CAR19-T contre le lymphome à grandes cellules B serait particulièrement efficace, en collaboration avec un CHU;
- Modélisation de câbles sous-marins lors de la mise à l'eau, en partenariat avec l'entreprise D-ICE ENGINEERING SAS.

Les retours des lauréats montrent que ce dispositif constitue une véritable opportunité de développement professionnel et personnel. Il encourage à explorer des problématiques industrielles concrètes, à travailler avec des équipes interdisciplinaires (ingénieurs, etc.) et à développer de nouvelles compétences techniques. À ce jour, l'un des lauréats a été embauché en CDI chez TopSolid, le postdoctorat ayant été déterminant dans son recrutement. Les postdoctorants "Passerelle" sont accompagnés par un chercheur sur le projet. Ce soutien contribue à renforcer la confiance des jeunes chercheurs, leur autonomie et leur capacité d'initiative dans la conduite de projets de mathématiques à l'interface avec des entreprises. La plupart des bénéficiaires du Postdoc Passerelle envisagent de poursuivre leur parcours dans des postes en R&D, soit dans l'équipe d'accueil, soit dans des entreprises innovantes. Le Postdoc Passerelle constitue ainsi une étape clé pour l'insertion professionnelle des jeunes docteurs en R&D. Enfin, le dispositif Passerelle représente également une opportunité pour les laboratoires de mathématiques de développer des relations à plus long terme avec de nouvelles entreprises.





*Il est rappelé aux personnes qui souhaitent faire apparaître un résumé de leur thèse ou de leur HdR que celui-ci ne doit pas dépasser 400 mots ou 3000 caractères. Le non-respect de cette contrainte conduira à une réduction du résumé (pas forcément pertinente) par le rédacteur en chef, voire à un refus de publication.*

## HABILITATIONS À DIRIGER DES RECHERCHES

► *Habilitation soutenue par* : **Farida ENIKEEVA**

---

### **Contributions to Change-Point Detection and Nonparametric Inference**

*Soutenue le 3 juillet 2025  
LMA, Université de Poitiers*

---

#### **Résumé :**

This habilitation thesis presents the author's results on the minimax optimal estimation and testing in change-point problems, as well as contributions to the problem of smoothness selection and non-parametric adaptive filtering through the empirical Bayes approach. The primary focus is on minimax optimal testing in change-point problems across various settings, including models with dependent noise and high-dimensional frameworks. The final chapter explores applications of Bayesian and empirical Bayes inference in the Gaussian white noise model, tackling issues of non-parametric signal estimation, smoothness testing, and inference involving discontinuous signals.

**Mots-clés :** statistical testing, minimax optimality, change-point problem, dependent noise, high dimension, sparsity, smoothness, empirical Bayes.

► *Habilitation soutenue par :* **Maxime BREDEN**

---

**Computer-assisted proofs for differential equations and dynamical systems**

*Soutenu le 30 juin 2025  
CMAP, Institut polytechnique de Paris*

---

**Résumé :**

The purpose of this manuscript is to describe my contributions to the field of computer-assisted proofs for differential equations and dynamical systems. The aim of Chapter 1 is to give a gentle introduction to the field of computer-assisted proofs in nonlinear analysis, and hopefully to provide a good entry-point for researchers not yet familiar with computer-assisted proofs. Some of the essential tools and their different variations are presented in full details, and a relatively simple but still non trivial example is discussed in a self-contained manner, and solved using two different computer-assisted approaches. None of the material contained in this first chapter is new, but the presentation is sometimes slightly more modern or simplified compared to the existing literature.

Chapter 2 describes two computer-assisted proofs, for the Navier–Stokes equations and the so-called DPCM. The aim of this chapter is twofold. First, it provides good examples of problems that were already of interest to the mathematical community, but that could not be fully solved with traditional pen-and-paper analysis, and for which computer-assisted proofs can provide helpful answers, and pave the way to further investigations. Second, it showcases that some of the relatively simple ideas presented on basic examples in Chapter 1 can also be used successfully on significantly more complex problems.

In Chapter 3, we discuss various problems which are outside of the “traditional” framework that was described in Chapter 1, and present new approaches to study them with computer-assistance. The first topic is that of quasilinear equations, for which some of the classical computer-assisted techniques developed for semi-linear equations no longer apply. We then

discuss recent developments in the treatment of non-polynomial nonlinearities within computer-assisted proofs based on spectral methods, and we revisit computer-assisted proofs for Feigenbaum renormalization operators. Finally, we present computer-assisted proofs for a class of problems on unbounded domains.

Whereas the first chapters only dealt with stationary or periodic problems, Chapter 4 is focused on rigorous time-integration of parabolic PDEs, with the goal of eventually studying connecting orbits in PDEs with computer-assisted proofs. There has been a lot of recent activity around rigorous integration of PDEs, and we present our own take on this question.

Chapter 5 discusses rigorous continuation techniques, for which we recently proposed a new approach, that is significantly simpler and more efficient than previous techniques, and also generalizes in a straightforward manner to multi-parameter continuation.

Finally, Chapter 6 describes the ongoing journey I have embarked upon, with several collaborators from the stochastic world, whose aim is to develop computer-assisted tools to study stochastic systems in a quantitative way. Of particular note are the results of Section 6.3, in which we present new techniques to precisely study Lyapunov exponents of SDEs, and in particular to prove that some stochastic systems have positive Lyapunov exponents, which is often associated with chaotic dynamics.

► *Habilitation soutenue par* : **Jean-Charles QUINTON**

---

**Études empiriques et computationnelles des dynamiques  
décisionnelles situées : de la fraction de seconde à la vie entière, des  
neurones aux groupes sociaux**

*9 juillet 2025*

*Laboratoire Jean Kuntzmann, Université Grenoble Alpes*

---

**Résumé :**

Ce manuscrit vise à apporter une perspective des sciences cognitives sur les activités de recherche académique, y compris dans ses composantes métascientifiques et éthiques, ainsi que sur la complémentarité d'études empiriques et computationnelles de la cognition, aussi bien pour les systèmes naturels qu'artificiels. Il reflète simplement le parcours de vie de son auteur,

mais décrit quelques outils et principes pour suivre et comprendre les composantes dynamiques et interactives ainsi que les biais dans les activités humaines. Une première partie se concentre sur les outils utilisés pour suivre et rendre compte de la recherche académique, proposant que la plupart des connaissances soient présentées comme un réseau de composants interactifs dont la forme et le niveau de détail dépendent du public ciblé et de la maturité du projet, une démarche que les normes régissant la communication et la publication des avancées de la recherche ne facilitent pas. Ces normes sont développées plus en détail dans la deuxième partie, qui se concentre sur les nombreuses perspectives théoriques sur la cognition, ainsi que sur la place de l'interdisciplinarité et de l'éthique dans leur développement. La dernière partie du manuscrit résume les nombreuses formes de modèles souvent manipulées sans le réaliser dans la recherche empirique et computationnelle. Des détails sont fournis sur les méthodes utilisées pour étudier empiriquement la dynamique des comportements cognitifs, ainsi que les principes utilisés pour les modéliser formellement, en adoptant une perspective dynamique, interactive et située (de décisions perceptuelles prises en une fraction de seconde aux trajectoires sociales à long terme).

**Mots-clés :** Situated cognition, metascience, process tracking, anticipation, decision-making.

## THÈSES DE DOCTORAT D'UNIVERSITÉ

► *Thèse soutenue par :* Ali ABBOUD

► *Sous la direction de :* Josselin Garnier (CMAP, École polytechnique), Bertrand Leturcq (CEA Saclay) et Stanislas de Lambert (CEA Saclay)

### **Quantification d'incertitudes appliquée à la déformation des assemblages combustibles au sein d'un réacteur à eau pressurisée**

*Soutenue le 17 octobre 2025  
CMAP, Institut polytechnique de Paris*

#### **Résumé :**

Dans le cœur des réacteurs nucléaires, les interactions fluide-structure et l'irradiation intense entraînent des déformations progressives au cours des

cycles de fonctionnement. Lorsque ces déformations deviennent significatives, elles peuvent perturber le positionnement des assemblages, endommager les grilles, et bloquer ou retarder l'insertion des barres de contrôle, mettant en péril la sûreté du réacteur et augmentant les coûts d'exploitation. La compréhension et la maîtrise de ces déformations sont donc cruciales. Toutefois, leur simulation demeure incertaine en raison de la complexité des couplages multiphysiques impliqués : les modèles thermohydrauliques et thermomécaniques, fortement non linéaires et multidimensionnels, interagissent sur plusieurs cycles d'irradiation, rendant la propagation des incertitudes difficile à évaluer et à contrôler. L'objectif de cette thèse est de développer une méthodologie robuste de quantification d'incertitudes, adaptée à la nature couplée, non linéaire et coûteuse des simulations, tout en proposant des outils d'analyse permettant d'améliorer la fiabilité prédictive. Nous cherchons à répondre aux questions suivantes :

- (Q1)** Quelle est l'ampleur des incertitudes dans les résultats issus de simulations couplées ?
- (Q2)** Quels leviers permettent de réduire ces incertitudes ?
- (Q3)** Comment une modification de conception impacte-t-elle les résultats d'une simulation ?

L'approche adoptée consiste d'abord à analyser séparément les codes thermohydrauliques et mécaniques pour identifier leurs principales sources d'incertitude à l'aide de techniques d'analyse de sensibilité. Des métamodèles sont ensuite construits pour chaque domaine, afin de réduire le coût de calcul tout en conservant une précision suffisante pour les besoins de la quantification d'incertitudes. Ces métamodèles permettent finalement de mettre en œuvre une stratégie de couplage efficace, utilisée pour simuler un cycle complet d'irradiation et propager les incertitudes de manière maîtrisée. La méthodologie repose sur quatre objectifs principaux :

- (O1)** Identifier et caractériser les sources d'incertitude dans la chaîne de calcul.
- (O2)** Développer des métamodèles adaptés à la propagation d'incertitudes et aux analyses de sensibilité.
- (O3)** Déterminer les paramètres influents et les interactions non linéaires au moyen d'analyses de sensibilité globales.
- (O4)** Quantifier et, si possible, réduire les incertitudes afin d'orienter les efforts de modélisation et d'expérimentation.

En résumé, cette thèse propose une démarche de quantification d'incertitudes, adaptée aux simulations multiphysiques complexes, avec pour finalité l'amélioration de la sûreté, de la fiabilité et de la rentabilité des réacteurs nucléaires.

► *Thèse soutenue par* : **Abdallah ABDEL WAHAB**

► *Sous la direction de* : Piernicola Bettiol (université de Bretagne Occidentale)

---

### **Problèmes stratifiés en optimisation dynamique**

*Soutenue le 23 mai 2025*

*Université de Bretagne Occidentale, Laboratoire de Mathématiques de Bretagne Atlantique*

---

#### **Résumé :**

Ce manuscrit se penche sur le domaine mathématique de la théorie du contrôle optimal, en mettant spécifiquement l'accent sur les problèmes stratifiés du contrôle optimal. Le terme *stratifié* fait ici référence à des problèmes structurellement complexes, incluant des scénarios multi-dynamiques, des problèmes paramétrés et des niveaux d'optimisation variables, entre autres. L'accent de ce manuscrit est mis sur les problèmes de contrôle optimal impliquant des paramètres, particulièrement pertinents dans des domaines tels que l'ingénierie aérospatiale et la biologie. Ces problèmes englobent des questions d'optimisation minimax et des problèmes bi-niveaux, où un problème de contrôle optimal est couplé à un défi de programmation non linéaire. Le manuscrit vise à élucider les conditions d'optimalité nécessaires pour ces problèmes paramétriques et à démontrer l'application de ces conditions aux problèmes structurés bi-niveaux.

Le manuscrit comprend six chapitres. Le chapitre 1 introduit le cadre général de la littérature existante et décrit les concepts fondamentaux nécessaires au développement des problèmes d'optimisation minimax et bi-niveaux, qui représentent l'objectif de la thèse. Il présente également un résumé des nouvelles contributions de la thèse. Le chapitre 2 introduit les outils et les résultats de base de l'analyse non lisse, et discute de son importance ainsi que de celle de ses outils dans la théorie du contrôle. Le chapitre 3 illustre les conditions d'optimalité classiques associées aux problèmes de contrôle optimal impliquant des équations différentielles ou des inclusions

différentielles. Le chapitre 4 introduit des scénarios de contrôle optimal plus complexes impliquant plusieurs processus (multiprocess), en mettant l'accent sur le principe du maximum. Le chapitre 5 est consacré à l'étude d'une nouvelle classe de problèmes : les "minimax multiprocess problems", sur lesquels de nouveaux résultats sont donnés concernant les conditions nécessaires d'optimalité. Le chapitre 6 introduit une nouvelle classe de problèmes dits bi-niveau et fournit les conditions nécessaires d'optimalité pour les problèmes bi-niveaux, qui combinent un problème d'optimisation paramétré avec un scénario d'optimisation dynamique. Cette approche structurée vise à combler le fossé entre les concepts théoriques et les applications pratiques, améliorant la compréhension des problèmes complexes de contrôle optimal. **Mots-clés** : Optimisation, contrôle optimal, analyse non lisse, problème de Bolza, conditions nécessaires d'optimalité, problèmes bi-niveaux, processus multiple.

► *Thèse soutenue par* : **Pierre ANDRAUD**

► *Sous la direction de* : Nicolas Vayatis (ENS Paris-Saclay), Frédéric Dias (ENS Paris-Saclay) et Audrey Gailler (CEA/DAM Ile-de-France)

---

### **Estimation rapide des inondations et courants de tsunami à partir d'algorithmes de Deep Learning**

*Soutenue le 2 juillet 2025*

*Centre Borelli, ENS Paris-Saclay, Université de Paris*

---

#### **Résumé :**

Dans un contexte où les délais imposés au Centre National d'Alerte aux Tsunamis rendent inexploitable les simulations numériques haute fidélité, cette thèse propose une alternative fondée sur l'intelligence artificielle pour prédire rapidement les effets côtiers d'un tsunami en Méditerranée. Un premier modèle, inspiré de la littérature et basé sur un réseau de neurones dense, a été conçu pour estimer directement les hauteurs d'eau, vitesses maximales et retraits à la côte à partir de simulations en océan profond. Malgré des résultats convaincants, sa complexité limite son usage en conditions opérationnelles. Une seconde approche, plus légère, s'appuie sur la représentation latente des données, obtenue par Analyse en Composantes Principales (ACP) pour réduire considérablement la complexité et les temps

d'apprentissage. Deux nouveaux modèles ont ainsi été développés : un réseau dense appliqué aux coefficients (ACP) et un modèle de Gradient Boosting. Ces approches permettent de générer, en quelques secondes, des cartes d'inondation à haute résolution avec des performances proches de celles des simulations classiques. Toutefois, une sous-estimation est observée dans les zones inondées, peu représentées dans la base d'apprentissage. Pour renforcer la robustesse des prédictions, un volet de la thèse a été consacré à l'implémentation de méthodes bayésiennes pour la quantification des incertitudes épistémiques. Celles-ci, appliquées notamment aux modèles latents, ont permis d'obtenir des intervalles de confiance bien calibrés, sans alourdir les calculs, ouvrant la voie à un outil rapide, fiable et adapté aux contraintes de l'alerte tsunami.

► *Thèse soutenue par* : **Ali ASAD**

► *Sous la direction de* : Marc Massot (CMAP, École polytechnique), Romain de Loubens (OneTech TotalEnergies), Laurent François (ONERA)

---

### **Stratégies numériques pour la simulation à l'échelle microscopique des batteries lithium-ion**

*Soutenue le 27 mai 2025*

*CMAP, Institut Polytechnique de Paris*

---

#### **Résumé :**

Dans cette thèse, nous développons et analysons des stratégies numériques pour la simulation des batteries lithium-ion (LIBs) basées sur leur description continue à l'échelle microscopique. Notre objectif est de relever les défis computationnels posés par ce problème intrinsèquement multiphysique et multi-échelle, en particulier la non-linéarité à l'interface de réaction et la raideur des équations aux dérivées partielles associées. Dans la première phase de ce travail doctoral, nous abordons la nature multi-échelle temporelle des LIBs en découplant les domaines en sous-problèmes pouvant être résolus indépendamment. En nous appuyant sur une stratégie de couplage adaptatif d'ordre élevé, nous implémentons cette approche dans un code Python. L'efficacité et les performances de cette méthode sont démontrées à travers des simulations de demi-cellules LIB en 1D. La nature multiphysique du modèle LIB nous pousse également à explorer des méthodes adaptatives en espace et en temps afin de réduire les coûts computationnels. Pour étendre

notre étude aux dimensions supérieures, nous utilisons un code C++ avec une stratégie de solution monolithique. Plus précisément, nous implémentons une technique de raffinement de maillage adaptatif (AMR) basée sur la multi-résolution avec SAMURAI, ainsi qu'un intégrateur temporel implicite adaptatif d'ordre élevé avec PETSc, et nous examinons leurs performances lorsqu'ils sont utilisés ensemble. La thèse se conclut en synthétisant les deux stratégies numériques développées pour relever les défis computationnels des simulations à l'échelle microscopique des LIB. Dans le prolongement naturel de ce travail, nous proposons un cadre unifié intégrant ces approches, offrant ainsi une base solide pour aborder les complexités supplémentaires susceptibles de survenir dans les développements futurs des modèles de LIB à l'échelle microscopique.

► *Thèse soutenue par* : **Adama BARRY**

► *Sous la direction de* : François Bachoc (Institut Mathématiques de Toulouse), Clémentine Prieur (Université Grenoble Alpes) et Miguel Munoz Zuniga (IFPEN)

---

### **Plans d'expériences pour la calibration de codes de calcul coûteux**

*25 juin 2025*

*Institut Mathématiques de Toulouse, Université de Toulouse*

---

**Résumé** : Dans cette thèse, nous étudions le problème de calibration bayésienne de codes de calculs coûteux, à sortie scalaire, vectorielle ou fonctionnelle, à l'aide de données physiques en nombre limité. Un code de calculs est dit coûteux lorsque son évaluation requiert un temps de calcul important. Dans ce contexte, l'inférence bayésienne sur ses paramètres nécessite l'utilisation d'un émulateur ou modèle de substitution.

Nous introduisons une stratégie en deux étapes combinant une sélection optimale du plan d'expériences physiques (pour les mesures physiques à effectuer sur le terrain) et du plan d'expériences numériques (pour la construction de l'émulateur par processus gaussien). La première phase consiste à construire un émulateur initial par processus gaussien, qui servira au calcul des critères d'optimalité du plan d'expériences physiques. Deux types de critères sont introduits. D'une part, des critères bayésiens basés sur la distribution a posteriori des paramètres de calibration. Ces critères ont la particularité de prendre en compte l'ensemble des incertitudes, qu'elles soient

liées aux observations physiques, numériques ou aux paramètres du code de calculs. D'autre part, un critère utilisant la variation du code en fonction de ses paramètres combiné à la répartition du plan dans l'espace expérimental. Ce dernier se distingue par son coût d'optimisation réduit. Pour optimiser ces critères, quatre algorithmes sont proposés : le recuit simulé, un algorithme glouton, un algorithme génétique et un algorithme d'optimisation stochastique par perturbation simultanée. Après acquisition des données physiques, l'émulateur est amélioré par une planification séquentielle d'expériences numériques, guidée par un critère d'acquisition visant une réduction progressive de l'incertitude de calibration. Deux critères d'acquisition, exclusivement dédiés à la calibration, ont été définis : le premier repose sur la somme des variances a posteriori des paramètres de calibration et le second est basé sur l'erreur de prédiction des observations physiques. L'émulateur final est ensuite utilisé pour approcher la densité a posteriori des paramètres à l'aide d'un échantillonnage Monte Carlo par chaînes de Markov, couplé à une estimation non paramétrique par noyaux. Une application numérique sur des fonctions analytiques à sortie scalaire a permis d'évaluer la pertinence des critères et des stratégies de planification d'expériences numériques, en les comparant à d'autres approches de l'état de l'art. De plus, une adaptation de la méthodologie de calibration aux codes de calculs à sortie vectorielle ou fonctionnelle est proposée.

Enfin, la méthodologie a été appliquée à la calibration d'un simulateur numérique dédié au stockage géologique du CO<sub>2</sub>, en utilisant des données synthétiques.

**Mots-clés :** Design of physical experiments, design of numerical experiments, Gaussian processes, Bayesian optimization.

► *Thèse soutenue par :* **Lisa BEDIN**

► *Sous la direction de :* Eric Moulines (CMAP, École polytechnique) et Michal Valko (Inria Lille)

---

**Avancées dans les modèles génératifs :  
méthodologies et applications en cardiologie**

*Soutenue le 13 mai 2025*

*CMAP, Institut Polytechnique de Paris*

---

**Résumé :**

Cette thèse explore l'application des modèles génératifs, en particulier les modèles de diffusion, pour l'analyse et la génération de signaux électrocardiographiques (ECG). Les ECG sont des outils diagnostiques essentiels en cardiologie, permettant une évaluation rapide et non invasive de l'activité électrique du cœur. Cependant, leur interprétation est souvent compliquée par la présence de bruit et d'artefacts, ainsi que par la nécessité de reconstruire des signaux complets à partir d'observations partielles.

La recherche présentée ici se concentre sur le développement de méthodes avancées pour surmonter ces défis. Nous introduisons des modèles de diffusion spécifiquement élaborés pour générer avec précision la morphologie des battements cardiaques sinusoïdaux mais également les différentes anomalies de rythmes pouvant exister. Nous proposons également des algorithmes utilisant ces modèles de diffusion comme prior pour solutionner des problèmes de reconstructions d'ECGs à partir d'observations incomplètes et bruitées. Ces avancées ont le potentiel d'améliorer les diagnostics cardiaques et de développer des technologies de surveillance cardiaque plus accessibles et efficaces, avec des implications significatives pour la pratique clinique et la santé publique.

► *Thèse soutenue par* : **Nathanaël BOUTILLON**

► *Sous la direction de* : Raphaël Forien (INRAE PACA), François Hamel (université d'Aix-Marseille), Lionel Roques (INRAE PACA)

---

### **Phénomènes de persistance et de propagation dans des EDP locales et non-locales**

*Soutenue le 11 juin 2025  
Institut de Mathématiques de Marseille*

---

#### **Résumé :**

Le thème principal de cette thèse est le lien entre des valeurs propres principales d'opérateurs elliptiques et le comportement asymptotique de variantes de l'équation de Fisher-KPP.

Dans la première partie, nous nous concentrons sur des problèmes de valeurs propres principales provenant de la dynamique des populations. Dans trois chapitres, nous étudions l'effet d'une séparation d'échelles, du vent et de la diffusion hétérogène sur la capacité de persistance et sur la vitesse

de propagation de la population. Plusieurs preuves centrales de la première partie utilisent des outils probabilistes.

Dans la deuxième partie, nous nous intéressons à un modèle de réaction-diffusion pour une population structurée en phénotype et vivant dans un environnement hétérogène périodique. Nous prouvons un critère (impliquant une valeur propre principale généralisée) pour la persistance de la population. Ensuite, nous étudions des problèmes d'optimisation pour rendre la persistance plus facile ou plus difficile. Nous nous intéressons également à la vitesse de propagation dans différentes limites d'échelle. Enfin, nous prouvons de nouveaux résultats de persistance et de propagation pour une équation plus simple, où l'on considère seulement deux morphes.

Dans la dernière partie, nous nous concentrons sur la perte de diversité génétique pendant une invasion. D'abord, nous montrons qu'un retard logarithmique apparaît dans une équation avec dispersion non-locale. Ensuite, nous nous intéressons à des données expérimentales qui montrent une perte de diversité après qu'une population a passé une barrière ; nous proposons des modèles probabilistes pour comprendre cette perte de diversité.

► *Thèse soutenue par* : **Théo COUSINO**

► *Sous la direction de* : Olivier Gaudoin et Laurent Doyen (Université Grenoble Alpes) et Florent Brissaud (GRTgaz)

---

**Maintenances imparfaites avec actions correctives repoussées :  
modélisation, inférence statistique pour données censurées et  
application industrielle**

*27 mai 2025*

*Laboratoire Jean Kuntzmann, Université Grenoble Alpes*

---

**Résumé :**

Cette thèse propose un nouveau modèle de maintenance pour un système réparable. Si une défaillance survient entre deux inspections successives, une réparation minimale est effectuée. Au moment de l'inspection, deux types de maintenance préventive peuvent être effectués (MP et MPC). La première originalité de la thèse est de considérer que le choix entre ces deux types de maintenance préventive dépend du fait qu'il y a eu ou non une défaillance depuis l'inspection précédente. Les deux types de maintenance

sont supposés imparfaits, du type ARA (réduction arithmétique de l'âge), avec des paramètres d'efficacité différents.

Nous présentons plusieurs méthodes d'inférence statistique pour estimer les paramètres de ce nouveau modèle de maintenance. Le cas classique des données complètes est d'abord étudié. La deuxième originalité de cette thèse réside dans l'estimation des paramètres de ce modèle pour des données censurées par intervalle, censurées à gauche, ainsi que pour des données combinant ces deux types de censure. La troisième originalité porte également sur l'estimation des paramètres de ce modèle, mais appliquée à des données hétérogènes, via des covariables. La qualité des méthodes proposées est évaluée sur des données simulées.

Enfin, des données réelles, à la fois censurées et hétérogènes, provenant de systèmes passifs, sont étudiées à l'aide des méthodes développées.

**Mots-clés :** Données réelles, fiabilité, vieillissement, censure à gauche, censure par intervalle, estimation statistique.

► *Thèse soutenue par :* **Émile DELÉAGE**

► *Sous la direction de :* Thierry Faug (Université Grenoble Alpes) et Charlotte Perrin (Aix-Marseille Université)

---

### **Modélisation et analyse mathématique d'écoulements complexes - Modèles moyennés et milieux granulaires**

*Soutenue le 30 septembre 2025  
Institut Mathématique de Marseille*

---

#### **Résumé :**

Cette thèse est dédiée à la dérivation et à l'analyse mathématique de modèles d'écoulements complexes. La motivation principale de ce travail est la description des phénomènes d'avalanches. Ainsi, on s'intéresse à des modèles moyennés sur la profondeur, et/ou décrivant des écoulements granulaires. Dans une première partie, on étudie la structure des équations avec tenseur de Reynolds modélisant des fluides parfaits. On caractérise tout d'abord la symétrisabilité des équations moyennées de Reynolds. On étudie ensuite l'hyperbolicité de systèmes d'équations décrivant des écoulements diphasiques. On montre que la présence du tenseur de Reynolds permet de régulariser les équations. Dans une seconde partie, on présente un

modèle à trois équations moyennées sur la profondeur décrivant un écoulement granulaire incompressible. En particulier, on obtient le premier modèle moyenné consistant à l'ordre 1 avec la rhéologie  $\mu(I)$ . On examine les prédictions du modèle en étudiant l'instabilité des ondes de surfaces. On donne ensuite une version régularisée de ce modèle, et on montre sa pertinence dans des régimes non stationnaires et non uniformes, grâce à des comparaisons avec des données expérimentales. On propose enfin un modèle consistant avec une généralisation compressible de la rhéologie  $\mu(I)$ , permettant de prendre en compte des effets de dilatance. Dans une troisième partie, on montre la stabilité asymptotique d'une onde progressive partiellement congestionnée pour un modèle jouet de suspension granulaire. Le caractère granulaire du milieu est ici modélisé via une viscosité effective qui diverge lorsque l'écoulement s'approche du régime congestionné.

► *Thèse soutenue par* : **Wissam EL HAJJ**

► *Sous la direction de* : Vitaly Volpert (CNRS, UCBL), Nader El Khatib (Lebanese American University)

---

### **Modélisation mathématique de l'inflammation**

*Soutenue le 18 septembre 2025*

*Institut Camille Jordan, Université Claude Bernard Lyon 1*

---

#### **Résumé :**

L'inflammation est un mécanisme de défense fondamental de l'organisme en réponse à divers stimuli externes. Elle joue un rôle important dans le développement et la progression de nombreuses maladies, notamment les troubles cardiovasculaires et les maladies neurodégénératives. Bien que chaque type d'inflammation soit déclenché par des stimuli spécifiques, le mécanisme de réponse inflammatoire reste globalement générique. Il débute par la reconnaissance des agents nuisibles par les récepteurs situés à la surface des cellules, suivie de l'activation de voies de signalisation inflammatoires. Cela conduit à la libération de médiateurs inflammatoires et au recrutement subséquent de cellules immunitaires dans la région affectée.

Ce travail de thèse porte sur la modélisation mathématique du processus inflammatoire. En particulier, il vise à développer des modèles généralisés capables de décrire les phases clés de l'inflammation, notamment les phases d'initiation, de développement et de résolution, à l'aide

d'un système d'équations de réaction-diffusion et d'équations intégral-différentielles. Nous démontrons également l'applicabilité de cette approche à plusieurs maladies, telles que l'athérosclérose, la maladie d'Alzheimer, les maladies de la peau et les maladies auto-immunes.

► *Thèse soutenue par* : **Louis FOSTIER**

► *Sous la direction de* : Romain Yvinec (université de Tours), Violette Thermes (LPGP, INRAE Rennes) et Frédérique Clément (INRIA Saclay-Île de France)

---

**Analyse et calibration de modèles de dynamiques de populations structurées : applications à des populations cellulaires**

*Soutenue le 10 octobre 2025  
Institut Denis Poisson, Université de Tours*

---

**Résumé :**

Cette thèse est consacrée à la compréhension et à la quantification de la dynamique ovarienne chez les poissons modèles à ovogenèse asynchrone, extensivement utilisé en éco-toxicologie et éco-physiologie, comme le medaka (*Oryzias latipes*) ou le poisson-zèbre (*Danio rerio*). L'objectif est d'améliorer les prédictions de l'impact de perturbations environnementales (e.g. le changement climatique ou l'exposition à des polluants) sur la fonction de reproduction tout au long de la vie des individus. Dès la période péri-natale jusqu'à la fin de la vie reproductive, l'ovaire connaît un remodelage cellulaire intense dont la régulation est essentielle pour la maturation des gamètes femelles (ovocytes) et le succès reproducteur. Une difficulté récurrente pour la compréhension de cette dynamique cellulaire dans l'ovaire est le manque d'observables en temps réel au niveau de la distribution des populations ovocytaires (dénombrement, taille, maturité, etc). Le travail central de la thèse est de construire et calibrer un modèle mathématique intégrant toute la dynamique de maturation des gamètes et ses régulations au cours de la vie du poisson, en exploitant notamment les nouvelles données fournies par les récents progrès de l'imagerie tridimensionnelle acquises au Laboratoire de Physiologie et Génomique des Poissons (LPGP, INRAE Rennes). On s'attachera en particulier à caractériser les principes d'organisation et de fonctionnement de la population des ovocytes, en révélant leurs interactions

directes ou indirectes et en intégrant les rétroactions associées à l'endocrinologie de la reproduction. Pour cela, les défis méthodologiques impliqués seront la modélisation mathématique de dynamiques de populations structurées, et l'inférence de rétroactions non-locales et non-linéaires, qui permettront de prendre en compte et quantifier le caractère multi-échelle de la fonction de reproduction. Cette thèse aboutira à des résultats de recherche novateurs dans le domaine de la physiologie de la reproduction du poisson et permettra de développer des approches génériques pour la modélisation multi-échelle en physiologie de la reproduction.

► *Thèse soutenue par* : **Mohamed GHARAFI**

► *Sous la direction de* : Nikolaus Hansen (École polytechnique, Institut Polytechnique de Paris), Rodolphe Le Riche (CNRS, Mines Saint-Étienne), Dimo Brockhoff (Inria Saclay)

---

### **Stochastic & Surrogate-assisted Multiobjective Optimization with CMA-ES**

*Soutenue le 9 octobre 2025*

*CMAP, Inria, Institut Polytechnique de Paris*

---

#### **Résumé :**

Cette thèse s'intéresse aux problèmes d'optimisation multiobjectif coûteux, en proposant une extension de l'algorithme COMO-CMA-ES par l'intégration de modèles de substitution (surrogates), dans le but de réduire le nombre d'évaluations de fonction onéreuses. COMO-CMA-ES repose sur le cadre méthodologique SOFOMORE (Single-Objective FOR Multi-Objective pRblem), qui reformule un problème multiobjectif en un ensemble de sous-problèmes mono-objectifs, chacun représentant un compromis particulier permettant d'approcher le front de Pareto. Dans le contexte mono-objectif, l'utilisation de modèles de substitution au sein de CMA-ES s'est révélée efficace pour accélérer la convergence, en remplaçant les évaluations coûteuses de la fonction objectif par des modèles prédictifs utilisés comme substituts de classement. En s'appuyant sur ce principe, nous étendons cette stratégie à COMO-CMA-ES, en tirant parti à la fois de l'efficacité de CMA-ES assisté par surrogate et de la structure du cadre SOFOMORE. Il en résulte un algorithme d'optimisation multiobjectif assisté par surrogate, spécifiquement

adapté aux cas où les évaluations sont particulièrement coûteuses. Dans COMO-CMA-ES, les sous-problèmes sont définis à partir d'une fonction de fitness dynamique, fondée sur l'indicateur Uncrowded Hypervolume Improvement (UHVI). Chacun de ces sous-problèmes est optimisé de manière indépendante par une instance de CMA-ES, opérant intégralement dans un cadre mono-objectif. Plutôt que de modéliser séparément chaque fonction objectif d'origine, nous proposons de construire un modèle de substitution directement sur la fonction de fitness composite optimisée par chaque instance. À cette fin, nous adoptons un modèle linéaire-quadratique inspiré de l'algorithme LQ-CMA-ES, capable de capturer implicitement les compromis entre objectifs. Cette approche allège la gestion des modèles tout en réduisant la complexité computationnelle. Les résultats expérimentaux mettent en évidence une réduction pouvant aller jusqu'à un facteur trois du nombre d'évaluations de fonction, notamment sur les problèmes présentant une structure quadratique. En revanche, le nombre d'itérations reste globalement inchangé, ce qui suggère que dans un environnement industriel disposant de ressources de calcul parallèles, les gains en temps de calcul sont modérés. Pour remédier à cette limitation, nous proposons des stratégies d'exploitation du parallélisme, telles que l'utilisation du modèle de substitution pour générer des itérations sans évaluation réelle, permettant ainsi de diviser par deux le nombre d'itérations. Au-delà de la modélisation par surrogate, cette thèse explore plusieurs extensions du cadre CMA-ES, ainsi que d'autres aspects de l'algorithme COMO-CMA-ES et du cadre plus large SOFOMORE. Nous introduisons notamment une variante de CMA-ES assistée par surrogate qui préserve l'invariance vis-à-vis des transformations strictement croissantes de la fonction objectif, renforçant ainsi la robustesse de l'algorithme face à diverses formulations. Enfin, nous étudions la scalabilité des algorithmes SOFOMORE en fonction de la taille souhaitée du front de Pareto. Nous observons une décroissance quadratique du taux de convergence avec l'augmentation de cette taille, et proposons un modèle de simulation idéalisé reproduisant ce comportement en simulant la dynamique de coordination locale propre aux algorithmes SOFOMORE.

► *Thèse soutenue par* : Léa GOHIER

► *Sous la direction de* : Emmanuel Humbert (université de Tours) et Kilian Raschel (CNRS, université d'Angers)

---

**Quantité géométrique de domaines aléatoires sur des variétés compactes  
et marches aléatoires confinées**

*Soutenue le 7 juillet 2025*

*Institut Denis Poisson, Université de Tours*

---

**Résumé :**

Le but de la thèse est d'étendre des résultats de E. Humbert, Y. Privat et E. Trélat sur la constante d'observabilité qui apparaît naturellement lorsqu'on observe une onde sur un domaine plus petit que celui où elle se propage. Cette constante se définit comme le minimum parmi toutes les géodésiques du temps passé dans le domaine d'observation sur un intervalle de temps  $T$  de longueur fixé. Les résultats mentionnés ci-dessus avaient pour but de calculer cette constante lorsque l'onde se propage sur un tore plat et lorsque le domaine d'observation est composé de petits carrés, de taille  $1/n$ , que l'on intègre au domaine d'observation aléatoirement avec une probabilité  $p$ . Le résultat principal est que cette constante converge en probabilités vers  $pT$ . Le but de la thèse est d'étendre ce résultat en dimension supérieure et/ou à des cas où l'onde se propage sur une variété riemannienne compacte quelconque.

► *Thèse soutenue par* : **Samuel GRUFFAZ**

► *Sous la direction de* : Nicolas Vayatis (ENS Paris-Saclay) et Alain Durmus (École Polytechnique)

---

**De la quantification du style moteur dans les séries temporelles aux méthodes Monte Carlo par chaînes de Markov en approximation stochastique**

*Soutenue le 8 septembre 2025*

*Centre Borelli, ENS Paris-Saclay, Université de Paris*

---

**Résumé :**

Cette thèse aborde le problème de l'identification et de la quantification du style individuel dans des séries temporelles physiologiques, avec des applications en neurophysiologie et en médecine personnalisée. Dans une première partie, nous modélisons la variabilité inter- et intra-individuelle

comme des transformations de motifs communs. Deux méthodes non supervisées et interprétables sont développées. Pour les signaux régulièrement échantillonnés, nous utilisons une variante de l'apprentissage de dictionnaires convolutionnels (PerCDL), qui capture la variabilité temporelle par déformation temporelle dans le cadre de l'analyse de la marche. Pour les signaux irrégulièrement échantillonnés, nous adaptons le cadre du Large Deformation Diffeomorphic Metric Mapping (LDDMM), issu de l'analyse de formes, aux séries temporelles, en l'appuyant sur une nouvelle représentation à noyaux dans un espace de Hilbert à noyau reproduisant (RKHS). Ces deux approches fournissent des caractéristiques pertinentes pour la classification et la visualisation dans des jeux de données cliniques et expérimentaux. Le problème d'identification du style fait écho à la modélisation à effets mixtes, qui intègre à la fois des variables latentes individuelles et des paramètres de population. C'est pourquoi la deuxième partie se concentre sur l'estimation des paramètres dans des modèles bayésiens à effets mixtes à l'aide de l'algorithme MCMC-SAEM. Nous abordons les défis computationnels posés par les méthodes de Monte Carlo par chaînes de Markov (MCMC) dans le cadre de l'approximation stochastique. Nous apportons d'abord la première preuve de convergence de l'algorithme No-U-Turn Sampler (NUTS), établissant son ergodicité géométrique. Nous introduisons également le Geodesic Slice Sampling, premier échantillonneur par tranches pratique sur des variétés riemanniennes, et montrons son utilité dans des modèles à variables latentes de nature géométrique. Enfin, nous explorons l'impact de l'utilisation d'échantillonneurs MCMC asymptotiquement biaisés. Nous montrons que l'algorithme de Langevin non ajusté (ULA), bien que biaisé, fonctionne efficacement en pratique et est plus simple à régler que son pendant corrigé par Metropolis. Dans l'ensemble, cette thèse établit un pont entre la modélisation interprétable des séries temporelles et les méthodes avancées de calcul bayésien, en apportant à la fois des contributions théoriques et des outils pratiques pour l'analyse de la variabilité individuelle dans les données physiologiques.

► *Thèse soutenue par* : **Emmanuel KAMMERER**

► *Sous la direction de* : Cyril Marzouk (CMAP, École polytechnique) et Nicolas Curien (Université Paris-Saclay).

---

## Cartes aléatoires $3/2$ -stables

*Soutenue le 30 juin 2025*

*CMAP, Institut polytechnique de Paris*

### Résumé :

Cette thèse se concentre sur l'étude du comportement asymptotique de modèles de graphes aléatoires issus de deux grandes familles : les cartes planaires aléatoires et les arbres aléatoires. Dans une première partie, nous étudions la géométrie de grandes cartes aléatoires avec des sommets de grands degrés, qui correspondent au dual des cartes à grandes faces et sont appelées des cartes stables, avec un intérêt tout particulier pour le cas critique : celui des cartes  $3/2$ -stables. Nous démontrons que ces cartes apparaissent naturellement dans l'étude des cartes aléatoires couplées au modèle de boucles  $O(n)$ , modèle classique de mécanique statistique, dans le cas  $n = 2$ . Nous obtenons le comportement asymptotique des distances entre deux sommets uniformes et démontrons que le diamètre est du même ordre de grandeur. Une conséquence est que les cartes  $3/2$ -stables ne satisfont pas de limite d'échelle aux sens habituels de Gromov-Hausdorff ou de Gromov-Prokhorov. Cependant, en nous concentrant sur les sommets de grands degrés, nous obtenons la limite d'échelle des distances entre les sommets de grands degrés et la racine. Cette limite d'échelle correspond à une distance entre les boucles d'un ensemble conforme de boucles (CLE) et le bord du disque, mesurée à l'aide d'une gravité quantique de Liouville indépendante, qui est la transformée de Lamperti de la distance quantique au bord introduite par Aru, Holden, Powell et Sun. Nous explorons aussi les liens entre cette distance et la distance des boucles du CLE au bord introduite par Werner et Wu. Au passage, nous obtenons une propriété de Markov pour des exploration du CLE sur un 2-disque quantique indépendant en combinant un résultat de Miller, Sheffield et Werner avec un résultat de convergence obtenu par Lehmkuehler. Nous étudions ensuite les géodésiques à la racine pour la distance de percolation de premier passage dans les cartes stables et obtenons notamment que le diamètre des cartes stables dans le cas dense est logarithmique. Nous construisons la limite d'échelle des géodésiques au moyen d'un flot coalescent de diffusions à sauts. Ce dernier nous permet aussi de construire des espaces métriques aléatoires que l'on conjecture être les limites d'échelle des cartes aléatoires à grands degrés.

Dans une seconde partie, nous introduisons une généralisation du modèle des arbres récursifs uniformes en ajoutant un mécanisme de gel. À cer-

taines étapes, un sommet choisi au hasard est gelé et plus aucun nouveau sommet ne peut s'attacher à celui-ci. Les arbres plans uniformes et l'arbre des infections dans un modèle SIR sur le graphe complet rentrent dans le cadre de ce modèle. Selon la répartition des instants de gel, la géométrie de l'arbre est radicalement différente. Nous obtenons les limites locales de ces arbres et les limites d'échelle des distances entre la racine et un sommet typique, de la distance entre deux sommets typiques et de la hauteur totale. Lorsque le nombre de sommets non gelés évolue linéairement, la hauteur totale de l'arbre est logarithmique et il n'y a pas de limite d'échelle aux sens de Gromov-Hausdorff ou de Gromov-Prokhorov. Dans le cas sous-linéaire où le nombre de sommets non gelés évolue comme une puissance donnée du nombre de sommets, nous identifions une transition de phase. Dans le régime critique, nous démontrons que l'arbre satisfait une limite d'échelle vers un arbre réel compact aléatoire relié étroitement à un coalescent de Kingman inhomogène en temps identifié par Aldous. En utilisant des techniques similaires de processus coalescents, nous obtenons enfin la limite d'échelle d'un autre modèle d'arbres aléatoires : des arbres aléatoires uniformes dont on fixe le degré et la hauteur de chaque sommet. Nous montrons, sous des conditions naturelles de convergence du profil, que ces arbres, une fois renormalisés, convergent. En guise d'application, nous construisons des limites d'échelle d'arbres de Bienaymé-Galton-Watson en environnement variable.

► *Thèse soutenue par* : **Yanhao LI**

► *Sous la direction de* : Rafael Grompone Von Gioi (ENS Paris-Saclay), Miguel Colom (ENS Paris-Saclay) et Jean-Michel Morel (City University, Hong-Kong)

---

**Bruit, compression et rééchantillonnage  
dans l'analyse forensique des images et des vidéos**

*Soutenue le 27 juin 2025  
Centre Borelli, ENS Paris-Saclay, Université de Paris*

---

**Résumé :**

L'invention des appareils photo numériques et le développement des logiciels d'édition ont rendu la manipulation des images et des vidéos extrêmement facile. L'émergence des modèles génératifs profonds a encore renforcé

ces manipulations en leur conférant un réalisme accru. Pour contrer les manipulations malveillantes, nous commençons notre étude en analysant les caractéristiques du bruit dans les images et les vidéos, qui servent de signatures passives. Plus précisément, nous étudions l'impact de la compression JPEG sur le bruit prior des images et exploitons la redondance temporelle dans les vidéos pour une estimation précise du bruit.

Cependant, lorsqu'il s'agit de détecter des vidéos falsifiées, la plupart des vidéos manipulées subissent une forte compression qui déforme les caractéristiques du bruit sous-jacent, rendant l'analyse basée sur le bruit plus difficile. Heureusement, la compression vidéo elle-même laisse des traces distinctes, et les vidéos manipulées sont souvent soumises à des compressions multiples. Motivés par cette observation, nous proposons une méthode de détection de la double compression vidéo, nous permettant ainsi de vérifier l'authenticité des vidéos en analysant la cohérence spatiale des traces de compression.

L'année 2022 a marqué un tournant avec l'apparition de Stable Diffusion, permettant de générer des images factices réalistes et rendant la détection d'images synthétiques plus essentielle que jamais. En réponse, nous proposons une méthode de détection d'images synthétiques en révélant des artefacts dans le domaine de Fourier, afin d'obtenir une détection efficace, généralisable et explicable. Comme les images synthétiques sont généralement compressées en JPEG, ce qui dégrade la performance de détection, nous explorons également la possibilité d'améliorer la détection en supprimant les artefacts JPEG avant l'analyse.

Enfin, nous observons que le rééchantillonnage est une opération courante à la fois dans la génération et la manipulation d'images, laissant des artefacts distinctifs pouvant être analysés dans le domaine de Fourier. Nous établissons ainsi une théorie décrivant les corrélations spectrales introduites par le rééchantillonnage et proposons une méthode de détection non supervisée, efficace dans divers scénarios de rééchantillonnage.

À travers cette étude approfondie, nous établissons des liens entre la compression, la modélisation du bruit, l'analyse des artefacts et la détection de falsifications, contribuant ainsi à l'avancement de l'expertise en analyse forensique des images et des vidéos.

- ▶ *Thèse soutenue par* : **Samaël MACKOWIAK**
- ▶ *Sous la direction de* : Anne de Bouard (CNRS, CMAP, École polytechnique)

---

## **Analyse mathématique de l'équation de Gross-Pitaevskii en milieu désordonné**

*Soutenue le 8 juillet 2025*  
*CMAP, Institut polytechnique de Paris*

---

### **Résumé :**

Cette thèse porte sur l'étude de l'équation de Gross-Pitaevskii en présence d'un potentiel bruit blanc en espace. Les travaux de cette thèse comportent trois volets. Dans un premier temps, on construit en dimensions 1 et 2 des opérateurs de type Schrödinger avec à la fois un potentiel confinant et un potentiel irrégulier (i.e. une distribution de régularité négative). En dimension 1, une approche par les formes quadratiques permet de construire ces opérateurs pour de grandes classes de potentiels confinants (couvrant le cas du potentiel harmonique) et de potentiels irréguliers (couvrant entre autre le cas du potentiel bruit blanc). En dimension 2, une procédure de renormalisation est nécessaire pour pouvoir prendre en compte le cas d'un potentiel bruit blanc. Cette procédure de renormalisation est obtenue pour des potentiels confinants généraux, étendant ainsi les méthodes précédemment développées dans le cas du potentiel harmonique. Une fois ces opérateurs construits, on s'intéresse à la résolution des équations de Schrödinger non-linéaires associées. En dimension 1, l'existence locale de solutions est obtenue par une méthode de point fixe usuelle, en utilisant la propriété d'algèbre des espaces de Sobolev. En dimension 2, l'approche directe ne marche plus. On commence alors par construire des solutions régulières par une méthode de compacité. Puis, une approche paracontrôlée de l'opérateur d'Anderson confinant permet d'obtenir des estimations de Strichartz et d'en déduire l'existence locale de solutions en dimension 2. Enfin, on s'intéresse aux ondes stationnaires de ces équations de Schrödinger. L'existence de telles solutions est obtenue en adaptant les méthodes usuelles de minimisation sous contrainte. On montre en outre que les ondes stationnaires ont une régularité locale limitée dans les espaces de Sobolev, en s'appuyant sur la régularité optimale du bruit blanc.

- ▶ *Thèse soutenue par* : **Charles MEYNARD**
- ▶ *Sous la direction de* : Charles Bertucci (CMAP, École polytechnique)

---

**Contribution à l'étude de l'équation maîtresse des jeux à champ moyen**

*Soutenue le 8 juillet 2025  
CMAP, Institut polytechnique de Paris*

---

**Résumé :**

Dans cette thèse, on s'intéresse aux problèmes d'existence et d'unicité de l'équation maîtresse des jeux à champ moyen. La première partie est dédiée à l'étude de cette équation lorsque le jeu sous-jacent est tel que le problème d'optimisation d'un joueur individuel dépend de la réalisation d'un processus stochastique commun à l'ensemble des joueurs. Ce processus peut être autonome, mais aussi dépendre de l'évolution du jeu au travers de la distribution des joueurs. Nous donnons des conditions suffisantes pour avoir l'existence et l'unicité de l'équation maîtresse associée à pareil jeu, d'abord dans le cadre des jeux à champ moyen en espace d'états fini. Puis nous étendons ces résultats pour les équations maîtresses posées sur l'espace des mesures de probabilités sous différentes notions de monotonie. Dans une deuxième partie, nous introduisons la notion de solution monotone pour les jeux à champs moyen dit "déplacement monotone". Cette notion de solution faible à l'équation maîtresse ne requiert aucune hypothèse de différentiabilité de la solution sur l'espace des mesures de probabilités. Sous des hypothèses de monotonie appropriées, nous montrons l'unicité, la stabilité et enfin l'existence de telles solutions.

- ▶ *Thèse soutenue par* : **Lily MONNIER**
- ▶ *Sous la direction de* : Paul-Henry Cournède (CentraleSupélec)

---

**Statistical Learning for Single-Cell Data Analysis in Oncology**

*Soutenue le 5 mars 2025  
CentraleSupélec, Université Paris-Saclay*

---

**Résumé :**

Le séquençage de l'ARN à l'échelle d'une unique cellule (single-cell) permet d'étudier les niveaux d'expression des gènes dans chacune des milliers ou des millions de cellules individuelles. Il joue un rôle clé en oncologie pour étudier l'hétérogénéité des tumeurs et identifier les différents types de cellules, même rares. Cependant, l'analyse de ces données soulève plusieurs questions statistiques d'intérêt, en particulier, la correction de l'effet de batch. Nous proposons de résoudre ce problème en exploitant la puissance des méthodes d'apprentissage profond. En effet, la grande quantité de cellules disponibles permet d'entraîner des architectures complexes et d'apprendre des représentations latentes adaptées aux tâches d'intérêt. Notre méthode sera évaluée sur plusieurs cas tests en oncologie et comparée à l'état de l'art diverses tâches telles que le clustering et la détection de gènes différentiellement exprimés. Pour répondre à cette problématique, nous nous sommes heurtés au fardeau computationnel de combiner et équilibrer plusieurs objectifs de diverses natures. Ainsi, nous avons développé une méthode basée sur de l'apprentissage par renforcement, afin d'adapter automatiquement les poids des différents sous-objectifs dans un objectif global. Nous comparerons notre méthode à l'état de l'art sur plusieurs cas tests, comprenant des jeux de données issus du Multi-Task Learning et de la correction d'effet batch. La haute résolution générée par le séquençage single-cell permet l'étude de trajectoires cellulaires, présentes lors des processus de différenciation des cellules sanguines ou de l'évolution clonale d'une tumeur. Pour cela, nous envisageons de mettre à profit les avantages des Graph Neural Networks (GNNs), afin répondre au problème d'inférence de trajectoires en remplaçant les étapes de réduction de dimension et de clustering par des blocks GNNs. Nous évaluerons notre méthode sur un jeu de données simulé et la comparerons à l'état de l'art.

► *Thèse soutenue par* : **Jules OLAYÉ**

► *Sous la direction de* : Marie Doumic (Inria, CMAP, École polytechnique) et Milica Tomasevic (CNRS, CMAP, École polytechnique)

---

**Approches stochastiques et déterministes pour étudier la dégradation des télomères et autres dynamiques cellulaires**

*Soutenue le 4 juillet 2025*

*CMAP, Institut polytechnique de Paris*

---

**Résumé :**

Les télomères sont des régions non codantes situées aux extrémités des chromosomes des cellules eucaryotes dont les tailles varient au cours des divisions cellulaires par le biais de raccourcissements et/ou rallongements. Le raccourcissement des télomères est l'un des principaux facteurs conduisant à la sénescence répllicative, un état irréversible où les cellules arrêtent de se diviser. L'étude des télomères a gagné en intérêt ces dernières années, notamment à cause de leur lien avec l'apparition de cellules cancéreuses et avec le vieillissement des individus. Ces études ont amené au développement de modèles mathématiques, permettant de décrire les expériences effectuées par les biologistes. L'utilisation de ces modèles repose souvent sur des hypothèses d'existence d'un profil stationnaire de tailles de télomères ou d'approximations de modèle, pour lesquelles des garanties théoriques manquent encore. L'objectif principal de cette thèse est d'apporter de premières justifications à celles-ci, à travers deux axes d'étude. Le premier axe est l'analyse du comportement en temps long de la répartition des tailles de télomères pour un modèle de dégradation de télomères avec rallongement. Les difficultés à traiter pour l'obtenir sont le caractère non-compact de l'opérateur avec lequel nous travaillons, ainsi que l'aspect semi-markovien de notre modèle. Le deuxième axe consiste en l'étude d'un problème inverse dans lequel nous cherchons à estimer une distribution initiale de tailles de télomères à partir de mesures de temps de sénescence. Le principal argument dans la résolution de celui-ci est d'approcher nos modèles par des équations de transport et de transport-diffusion, sur lesquelles des estimateurs se construisent plus facilement. En parallèle de ces travaux liés aux télomères, deux études annexes ont été effectuées dans le cadre de cette thèse, toujours en lien avec des dynamiques cellulaires. La première correspond à un travail de modélisation stochastique du phénomène de neurogenèse, dans laquelle nous proposons un modèle de ce phénomène basé sur des processus de Poisson composé. La seconde correspond à l'étude théorique et numérique d'une méthode d'estimation de la distribution de temps de division de bactéries, développée par un biologiste dans le cadre de sa thèse.

► *Thèse soutenue par* : **Émile PIERRET**

► *Sous la direction de* : Bruno Galerne (université d'Orléans)

---

## Super-résolution stochastique et problèmes inverses : de l'échantillonnage conditionnel gaussien aux modèles de diffusion

*Soutenue le 10 juillet 2025  
Institut Denis Poisson, Université d'Orléans*

---

### Résumé :

Cette thèse étudie la résolution stochastique des problèmes inverses en imagerie, à travers l'échantillonnage conditionnel gaussien et les modèles de diffusion. Elle s'intéresse principalement à la super-résolution, qui consiste à améliorer la résolution d'une image à partir d'une version basse résolution, ainsi qu'au déflouage, qui vise à restaurer la netteté d'une image floue. Contrairement aux approches déterministes classiques, nous adoptons une perspective probabiliste dont le but est de modéliser et d'échantillonner l'ensemble des images plausibles compatibles avec une observation dégradée de l'image. L'objectif est d'étudier ce paradigme dans un cadre mathématique rigoureux et bien fondé. Pour cela, nous étudions les distributions gaussiennes d'images, qui incluent les microtextures gaussiennes associées au modèle Asymptotic Discrete Spot Noise (ADSN). Nous formulons le problème dans un cadre bayésien, en mettant en avant les enjeux liés à l'échantillonnage conditionnel dans le contexte gaussien. Nous discutons ensuite des modèles génératifs récents, et en particulier des modèles de diffusion probabilistes (DDPM), qui consistent à inverser un processus de bruitage progressif à l'aide d'un modèle appris. Plus précisément, dans un premier temps, nous étudions, par un raisonnement de krigeage, l'échantillonnage exact de problèmes inverses pour les microtextures gaussiennes, avec un accent particulier sur la super-résolution. Cela nous a permis de construire un échantillonneur efficace et exact dans ce cadre restreint. Ensuite, nous étudions les modèles de diffusion appliqués aux distributions gaussiennes dans un cadre génératif, afin d'évaluer leur capacité à fournir une distribution a priori sur les images. En exploitant la reformulation des modèles de diffusion comme équations différentielles stochastiques (SDE), nous dérivons les équations en jeu dans le cas linéaire et gaussien, et en étudions les propriétés. Cela nous permet d'établir des résultats explicites sur les erreurs d'échantillonnage, notamment en termes de distances de Wasserstein, et de mieux comprendre la nature des approximations induites par les modèles utilisés. Enfin, nous étudions les algorithmes de résolution des problèmes inverses liés aux modèles de diffusion, dans le cadre du déflouage de micro-

textures gaussiennes. Cela nous permet de mettre en évidence des comportements non souhaités d'un échantillonneur censé approximer la probabilité a posteriori théorique.

- ▶ *Thèse soutenue par* : **Matthias RAKOTOMALALA**
- ▶ *Sous la direction de* : Charles Bertucci (CNRS, CMAP, École polytechnique)

---

### **Sur quelques systèmes d'équations aux dérivées partielles de type champ moyen**

*Soutenue le 3 septembre 2025  
CMAP, Institut polytechnique de Paris*

---

#### **Résumé :**

L'objet principal de cette thèse est l'étude de deux nouveaux modèles de comportements collectifs faisant intervenir une infinité de particules en interaction. Le premier modèle est consacré à l'étude d'un phénomène de chimiotaxie, à savoir la formation de pistes chez les fourmis. Le second modèle que nous étudions aborde les structures d'interactions stratégiques dans la théorie des jeux à champ moyen. Cette thèse adopte une approche de type champ moyen, qui consiste à remplacer la complexité des interactions microscopiques au sein de groupes finis de particules par une interaction moyennée au travers de champs. Conformément à cette approche, la répartition d'un nuage infini de particules est représentée par une densité. La description de certains phénomènes nécessite l'introduction de champs auxiliaires qui, conjointement avec cette densité, obéissent à des lois d'évolution formulées par des équations aux dérivées partielles (EDP).

Les modèles de chimiotaxie visent à étudier le mouvement collectif d'une population nombreuse de particules, d'insectes ou de bactéries, qui utilisent des signaux chimiques pour coordonner leurs déplacements dans l'espace. La densité de cette population est modélisée par une équation de type Fokker-Planck, couplée à une seconde équation qui régit l'évolution de la concentration du chimioattractant.

La théorie des jeux à champ moyen vise à modéliser un équilibre de Nash dans des systèmes comportant un nombre infini de joueurs. Un système de jeu à champ moyen typique est souvent modélisé par un système couplé

comprenant une équation de Fokker-Planck pour décrire l'évolution de la densité des joueurs, et une équation d'Hamilton-Jacobi-Bellman pour représenter la fonction valeur d'un joueur typique. Cette théorie s'est avérée fructueuse pour la modélisation de nombreux phénomènes dans des domaines variés tels que la finance, l'économie ou les dynamiques de foules. Pour chacun des phénomènes étudiés, nous dérivons un nouveau modèle et nous démontrons le caractère bien posé des équations aux dérivées partielles associées. Dans le cas du modèle de chimiotaxie, nous établissons des propriétés qualitatives concernant le comportement en temps long de l'EDP. Enfin, le dernier chapitre de cette thèse présente un résultat d'existence et d'unicité de solutions pour des équations différentielles stochastiques sur les variétés riemanniennes à géométrie bornée.

► *Thèse soutenue par* : **Mathilde ROUSSELOT**

► *Sous la direction de* : Julien Michel (LMA, Poitiers) et Farida Enikeeva (LMA, Poitiers)

---

### **Méthodes spectrales pour la détection d'un signal et de ses ruptures en grande dimension**

*Soutenue le 10 juillet 2025  
LMA, Université de Poitiers*

---

#### **Résumé :**

Cette thèse porte sur l'étude des séries temporelles multivariées en grande dimension, et plus précisément sur les processus autorégressifs multivariés (VAR), qui modélisent les dépendances linéaires entre plusieurs variables observées simultanément dans le temps. Ces modèles sont largement utilisés en macroéconomie ou en neurosciences pour représenter des phénomènes dynamiques.

Le premier axe de recherche concerne la détection de ruptures dans un processus VAR. L'objectif est de fournir un test statistique capable de détecter un changement dans la matrice de transition  $\Theta$  du processus. On suppose que  $\Theta$  est de rang faible pour rendre l'analyse statistique possible. Le test proposé repose sur un estimateur par Matrix Lasso. On calcule alors la vitesse de séparation minimax entre les hypothèses de présence et d'absence d'une rupture et on montre son optimalité au sens minimax par rapport à

la dimension et au nombre d'observations. Enfin, la performance de ce test est vérifiée par des simulations numériques.

Le second axe de cette thèse est l'étude des statistiques de test basés sur le rayon spectral de deux modèles de matrices aléatoires non hermitiennes. On se place dans le cadre où la dimension  $p$  et le nombre d'observations  $T$  tendent vers l'infini avec  $\frac{T}{p} \rightarrow c > 0$ . On s'intéresse d'abord à la matrice d'autocovariance empirique au lag 1 d'une série temporelle centrée de dimension  $p$ . Son rayon spectral peut être utile pour tester l'hypothèse de bruit blanc face à une alternative de type VAR. Dans le cas où il s'agit d'un bruit blanc, on veut montrer que son rayon spectral est presque sûrement borné par  $\sqrt{c(c+1)}$ . Ensuite, on considère le produit de deux matrices rectangulaires dont les coefficients sont i.i.d. et on veut établir une borne analogue sur son rayon spectral. Ces résultats s'appuient sur la méthode des grandes traces, via une analyse combinatoire des moments, utilisant des graphes dont certaines catégories dominent asymptotiquement et auxquelles on s'intéressera en particulier.

**Mots-clés :** Processus VAR, matrice de rang faible, détection de rupture, grande dimension, optimalité minimax, test statistique, matrices aléatoires, rayon spectral.

► *Thèse soutenue par :* **Guillaume SABBAGH**

► *Sous la direction de :* Dominique Pastor (IMT Atlantique, LabSTICC) et Vincent Robin (UTC, LMAC).

---

### **Modélisation de la robustesse d'un système informatique par la théorie des catégories**

*Soutenue le 8 juillet 2025*

*Université Technologique de Compiègne*

---

#### **Résumé :**

Dans le cadre de l'étude des vulnérabilités informatiques, nous introduisons un nouveau système déductif fondé sur la théorie des esquisses. Nous défendons deux thèses principales. Premièrement, la déduction peut être interprétée soit comme un processus d'oubli, soit comme son inverse. Cela se traduit par un système déductif basé sur l'application d'un foncteur de précomposition ou de son inverse. Deuxièmement, l'information est une donnée structurée. Cette perspective nous permet de définir trois préordres afin

de comparer l'information, la structure et la donnée. Notre approche privilégie la simplicité. Nous introduisons ainsi les esquisses d'ordre supérieur, qui ne sont autres que des esquisses enrichies d'objets exponentiels en devenir. Nous démontrons que toute structure algébrique exprimée en logique d'ordre supérieur peut être esquissée par une esquisse d'ordre supérieur. Nous caractérisons les morphismes d'esquisse strictement déductifs, c'est-à-dire ceux dont le foncteur de précomposition associé est inversible et qui permettent donc de faire des déductions. Pour ce faire, nous généralisons aux esquisses d'ordre supérieur un procédé d'Andrée et Charles Ehresmann permettant de réaliser une esquisse, et nous introduisons un nouveau procédé, appelé saturation des esquisses. À partir de ces travaux théoriques, nous avons créé un langage de programmation concret : Poule. Ce langage offre un niveau de sécurité syntaxique extrêmement élevé, au prix d'une plus grande complexité de programmation. Enfin, nous expliquons comment les vulnérabilités informatiques sont esquissables et peuvent être interprétées comme des défauts de structure d'un programme. Nous proposons ainsi un cadre formel de représentation des vulnérabilités et concevons un langage de programmation dans lequel celles-ci sont évitées grâce à une syntaxe particulièrement stricte.

- ▶ *Thèse soutenue par* : **Emmanouil SFENDOURAKIS**
- ▶ *Sous la direction de* : Mathieu Rosenbaum (CMAP, École polytechnique) et Sergio Pulido (ENSIE)

---

### **Modélisation aléatoire pour le processus de formation des carnets d'ordres**

*Soutenue le 12 septembre 2025  
CMAP, Institut polytechnique de Paris*

---

#### **Résumé :**

Cette thèse vise à mieux comprendre les dynamiques des carnets d'ordres et à les relier au comportement rationnel des participants de marché. Dans le premier chapitre, nous examinons comment les stratégies optimales de market-making expliquent le pouvoir prédictif de l'"imbalance" sur les mouvements de prix à haute fréquence. Nous développons un modèle dans lequel une unique market maker connaît un prix efficient guidant la dynamique du prix mid. Elle contrôle les volumes affichés aux meilleurs prix

d'achat et de vente pour maximiser son profit journalier. Sa fonction valeur est la solution d'un système d'EDP couplées. Nous prouvons l'existence et l'unicité de solutions régulières à ce système, et nous exprimons son contrôle sous forme markovienne. Dans le cas d'inventaires continus, nous montrons également l'unicité de son de contrôle optimal. Ce modèle est également utilisé par la plateforme pour choisir une taille de tick optimale afin d'attirer de la liquidité. Dans le deuxième chapitre, nous calculons la forme du carnet d'ordres dans le cadre de Glosten-Milgrom. Ce modèle représente les interactions entre trois types d'agents : un trader informé, un trader de bruit et plusieurs market makers. L'étude se concentre sur le cas où le tick est non nul. Nous parvenons à reproduire des faits stylisés, tels que la dépendance du spread à la taille du tick, ainsi que le pouvoir prédictif de l'imbalance sur les mouvements de prix à court terme. Le modèle permet également de calculer des quantités utiles pour les market makers : le temps d'attente moyen jusqu'à la prochaine transaction et la valeur d'un ordre dans la file d'attente. Dans le dernier chapitre, nous développons des modèles de marché qui reproduisent les corrélations macroscopiques observées entre les prix d'actifs. Nous postulons l'existence d'un prix efficient non observé, de type brownien, possédant la structure de corrélation macroscopique. Notre étude se concentre sur deux sous-modèles : un modèle où les intensités de saut du prix mid dépend du prix efficient et d'un signal observé, et le modèle queue-reactive dépendant du ce prix efficient via les intensités d'arrivée des ordres. Nous montrons qu'à long terme, le prix mid devient indiscernable du prix efficient. Nous développons également une procédure d'estimation par maximum de vraisemblance pour inférer les paramètres du modèle. Nous utilisons notre modèle pour backtester des stratégies dans un contexte de liquidation optimale.

► *Thèse soutenue par* : Aurelio SPADOTTO

► *Sous la direction de* : Simon Mendez et Daniele Di Pietro (université de Montpellier)

---

**Simulation numérique de l'électrodéformation des globules rouges**

*Soutenue le 1er juillet 2025  
IMAG, Université de Montpellier*

---

**Résumé :**

Cette thèse porte sur la simulation numérique de systèmes physiques pouvant être décrits comme des capsules entourées par une membrane élastique. De tels objets constituent un modèle souvent adopté en science des matériaux et en bio-ingénierie pour reproduire les processus impliquant des particules colloïdales et des cellules biologiques. Un exemple important est la modélisation de l'écoulement des globules rouges.

Plus particulièrement, l'accent est mis sur l'effet mécanique d'un champ électrique sur la membrane d'une interface souple entre des phases fluides aux propriétés électriques contrastées. Cette étude trouve des applications dans le contexte des cytomètres basés sur des mesures d'impédance ou pour caractériser la rhéologie des suspensions de capsules.

La modélisation mathématique de ce système physique et l'objectif de réaliser une simulation numérique conduisent à un problème d'intérêt général en analyse numérique : l'approximation d'équations aux dérivées partielles comportant une interface interne à travers laquelle les données sont discontinues. Les problèmes d'interface de ce type sont omniprésents dans les modèles physiques et d'ingénierie. Représenter les conditions de saut et l'évolution des interfaces est une tâche fondamentale pour une vaste catégorie de modèles. Ces problèmes apparaissent notamment dans l'étude des écoulements diphasiques, des transitions de phase et de la propagation des fissures. Un autre domaine où les interfaces jouent un rôle central est la biomécanique, en particulier lorsqu'il s'agit d'étudier la dynamique des membranes biologiques.

Outre leur pertinence pour de nombreux modèles physiques, les problèmes d'interface posent également des défis mathématiques importants. Une interface est souvent la région du domaine physique où l'information la plus précieuse est stockée, mais c'est aussi la région où les erreurs numériques les plus importantes sont introduites. Par conséquent, ces problèmes ont suscité un effort considérable de la part de la communauté d'analyse numérique afin de trouver des stratégies de résolution précises mais pratiques.

Lors de la discrétisation des problèmes d'interface, un choix important est de déterminer si le maillage computationnel doit épouser précisément le profil de l'interface ou non. Les méthodes où le maillage suit le profil de l'interface sont dites ajustées (*fitted*). Ces méthodes ne nécessitent généralement pas de traitement particulier pour les éléments touchant l'interface. En revanche, dans les problèmes instationnaires où le profil de l'interface évolue au cours du temps, un remaillage adaptatif peut s'avérer coûteux.

Pour cette raison, les méthodes non ajustées (*unfitted*) ont suscité un in-

térêt croissant. Ces méthodes permettent l'existence d'éléments traversés par l'interface, réduisant ainsi la complexité de la génération du maillage. Toutefois, cela nécessite la mise en place de traitements spécifiques pour les éléments coupés.

Dans ce travail, nous présentons deux approches alternatives pour l'estimation d'un champ électrique discontinu autour d'une membrane biologique. La première approche appartient à la catégorie des méthodes non ajustées. Elle est développée dans le cadre d'un environnement de calcul destiné à la simulation de la dynamique des érythrocytes, appelé YALES2BIO. Il s'agit d'une plateforme de calcul en volumes finis à grande échelle dédiée à la simulation des écoulements biologiques entièrement résolus. La simulation de l'interaction fluide/membrane repose sur la méthode de la frontière immergée (Immersed Boundary Method), l'une des méthodes non ajustées les plus éprouvées et particulièrement populaire pour la simulation des membranes biologiques. Motivés par la polyvalence de ce solveur, nous proposons une implémentation permettant la représentation d'un champ électrique discontinu basée sur la méthode des fluides fantômes (Ghost Fluid Method).

Bien que l'approche non ajustée soit attrayante pour les raisons mentionnées, un inconvénient majeur est la nécessité de prendre en compte des interfaces qui coupent le maillage de manière défavorable, ce qui peut entraîner un mauvais conditionnement et des instabilités numériques. Pour cette raison, nous proposons également une approche ajustée alternative, basée sur un maillage découpé (cut mesh) constitué d'éléments polygonaux. D'une part, l'utilisation d'éléments polygonaux réduit la complexité de la génération du maillage et permet la représentation d'interfaces courbes. D'autre part, les solveurs conformes les plus répandus sont limités aux éléments triangulaires/tétraédriques. Cela motive l'introduction d'un schéma hybride, tel que la méthode de De Rham discrète (Discrete de Rham Method).

Dans la seconde partie de cette thèse, nous présentons et analysons un schéma de De Rham discret pour le traitement des problèmes elliptiques avec conditions d'interface, garantissant une robustesse vis-à-vis des contrastes de conductivité et une convergence optimale.

- ▶ *Thèse soutenue par* : **Daniil TIAPKIN**
- ▶ *Sous la direction de* : Éric Moulines (CMAP, École polytechnique), Gilles Stoltz (CNRS, Université Paris-Saclay)

---

**Apprentissage par renforcement efficace en taille d'échantillon :  
exploration, imitation et apprentissage séquentiel**

*Soutenue le 16 septembre 2025  
CMAP, Institut polytechnique de Paris*

---

**Résumé :**

L'apprentissage par renforcement (RL) fournit un cadre formel pour la prise de décision séquentielle en environnement inconnu. Un agent apprend une politique afin de maximiser un signal de récompense cumulée en interagissant avec un processus de décision markovien (MDP). Cette thèse étudie trois extensions du cadre standard de l'apprentissage par renforcement, en proposant de nouveaux algorithmes ainsi que leurs analyses théoriques associées. Premièrement, nous étudions le problème de l'exploration en l'absence de signal de récompense. Nous considérons deux formulations distinctes de l'exploration par maximisation d'entropie et proposons des algorithmes computationnellement efficaces. Pour ces algorithmes, nous dérivons des bornes de complexité en tailles d'échantillons, qui améliorent les résultats précédemment connus. Notre analyse établit en outre que l'apprentissage de la politique de maximisation de l'entropie de visite est statistiquement moins exigeant que l'exploration sans récompense dans l'une de ses variantes usuelles, ainsi que l'apprentissage d'une politique optimale dans un PDM standard avec récompenses. Deuxièmement, nous abordons le problème de l'accélération de l'apprentissage par renforcement à l'aide de démonstrations expertes, un cadre motivé par des applications modernes telles que l'apprentissage par renforcement à partir de retours (feedback) humains (RLHF). Nous analysons le cadre de l'apprentissage par renforcement régularisé par des démonstrations, où la fonction objectif de l'agent est augmentée d'une pénalité de Kullback-Leibler pour toute déviation par rapport à une politique de référence apprise à partir de démonstrations. Nous prouvons que cette approche entraîne une réduction linéaire de la complexité en tailles d'échantillon par rapport au nombre de démonstrations. Ce résultat établit comment les données expertes peuvent améliorer l'efficacité de la tâche d'apprentissage par renforcement. Troisièmement, nous étudions le problème de l'apprentissage dans des MDP où les récompenses sont choisies par un adversaire oublieux (oblivious). Nous proposons

un nouvel algorithme qui utilise un oracle boîte noire d'optimisation linéaire séquentielle, le rendant facile à mettre en œuvre. Nous fournissons une analyse de regret montrant que sa borne de performance correspond à la borne inférieure minimax du cas stochastique (non adverse) en termes de dépendance aux nombres d'états, d'actions et d'épisodes. Globalement, les contributions de cette thèse consistent en de nouveaux algorithmes pour divers problèmes en apprentissage par renforcement, accompagnés de preuves de leur performance en termes de complexité en tailles d'échantillons et de bornes de regret.

- ▶ *Thèse soutenue par* : **Antoine VAN BIESBROECK**
- ▶ *Sous la direction de* : Josselin Garnier (CMAP, École polytechnique)

---

**Extended reference prior theory for objective and practical inference, application to robust and auditable seismic fragility curves estimation**

*Soutenue le 1er octobre 2025  
CMAP, Institut polytechnique de Paris*

---

**Résumé :**

Reference prior theory provides a principled framework for objective Bayesian inference, aiming to minimize subjective input and allow data-based information to drive the estimates distribution. For this reason, the application of this theory to the estimation of seismic fragility curves is particularly relevant. Indeed, these curves are essential elements of seismic probabilistic risk assessment studies; they express the probability of failure of a mechanical structure as a function of indicators that define seismic scenarios. Since they inform critical decisions in infrastructure safety, a complete auditability of the pipeline that leads to the estimates of these curves is required. This thesis investigates the interplay between reference prior theory and seismic fragility curves estimation, yielding original contributions in these two domains. First, we complement the theoretical foundations of reference priors by developing novel constructions of them. Our goal is to support their objectivity while improving their practical applicability. Our results take the form of theoretical contributions in this domain that are based on a generalized definition of the mutual information. Our approaches tackle

the principal issues of reference priors, namely their improper characteristic or that of their posterior, and their complex formulation for practical use. Second, we revisit the estimation of seismic fragility curves based on the prominent probit-lognormal model in a context where the data are particularly sparse. Our goal is to conduct a Bayesian estimation of seismic fragility curves that leverages the optimization of every sort of information, including the a priori one, in order to provide estimates that are robust and auditable. Our results highlight the limitations and irregularities of the model and propose methods that provide accurate and efficient estimates of the curves. The evaluations of our approaches are carried out on different case studies taken from the nuclear industry.

This thesis builds a strong link between these two domains. The application to seismic fragility curves not only motivated theoretical developments but also directly benefited them, ultimately producing a more robust, interpretable, and verifiable estimation framework.

► *Thèse soutenue par* : **Gabriel VELHO**

► *Sous la direction de* : Jean Auriol (CNRS, CentraleSupélec, université Paris-Saclay), Riccardo Bonalli (CNRS, université Paris-Saclay) et Islam Bousaada (CentraleSupélec, université Paris-Saclay)

---

### **Stabilisation et contrôle optimal de systèmes stochastiques interconnectés avec des équations aux dérivées partielles**

*Soutenue le 15 octobre 2025  
CentraleSupélec, Université Paris-Saclay*

---

#### **Résumé :**

Cette thèse étudie le contrôle de systèmes dans lesquels une équation aux dérivées partielles (EDP) est interconnectée avec une équation différentielle stochastique (EDS) dans une structure en chaîne. C'est un cadre de modélisation particulièrement adapté aux systèmes en réseau complexes, où le système principal est soumis à de l'incertitude et à une action indirecte, comme c'est le cas des réseaux de chaleur urbains. La commande est appliquée à une frontière de l'EDP, tandis que la frontière opposée est couplée à un système stochastique de dimension finie. En dépit de leur pertinence, ces systèmes interconnectés EDP-EDS ont jusqu'à présent été peu étudiés dans

la littérature. Ce travail constitue une première avancée dans cette direction en développant des méthodes générales et implémentables pour l'analyse de la contrôlabilité, de la stabilisation et du contrôle optimal. Une attention particulière est portée à la conception de commandes robustes au risque, visant à minimiser à la fois le coût moyen et la probabilité d'événements rares mais catastrophiques. Les développements théoriques sont accompagnés de discussions sur leur implémentation et validés par des simulations numériques.

► *Thèse soutenue par* : **Songbo WANG**

► *Sous la direction de* : Zhenjie Ren (Université Évry Paris-Saclay), Nizar Touzi (Tandon School of Engineering, New York University)

---

### **Comportements en temps long des dynamiques avec des interactions de champ moyen**

*Soutenue le 12 juin 2025  
CMAP, Institut Polytechnique de Paris*

---

#### **Résumé :**

Cette thèse est consacrée à l'étude des comportements en temps long des dynamiques avec des interactions de champ moyen et des systèmes de particules associés. Pour la plupart des cas traités dans la thèse, la condition structurelle pour les comportements en temps long est la convexité plate de la fonctionnelle d'énergie de champ moyen, qui est différente de la convexité de déplacement étudiée dans les travaux classiques de transport optimal et de flot de gradient. La thèse est composée de trois parties. Dans la première partie, nous étudions les dynamiques de Langevin de champ moyen suramortie et sousamortie, qui sont des dynamiques de gradient associées à une fonctionnelle d'énergie libre de champ moyen, et nous montrons qu'elles présentent des propriétés de propagation du chaos uniforme en temps en exploitant leurs structures de gradient et une inégalité de Sobolev logarithmique uniforme. Dans la deuxième partie, nous développons d'abord quelques résultats techniques sur les inégalités de Sobolev logarithmiques et nous les appliquons pour obtenir la propagation du chaos uniforme en temps pour de diverses diffusions de McKean-Vlasov. En particulier, pour le modèle de vortex visqueux en 2D, nous développons

des bornes de régularité fortes sur sa limite de champ moyen sur l'espace entier et nous montrons sa propagation du chaos par la méthode de Jabin-Wang ; nous étudions également son problème de taille du chaos en utilisant l'approche entropique de Lacker et nous obtenons des bornes optimales et uniformes en temps dans le régime de haute viscosité. Dans la dernière partie de la thèse, nous explorons d'autres dynamiques de champ moyen qui proviennent de problèmes d'optimisation convexes. Pour l'optimisation régularisée par l'entropie, nous étudions une dynamique d'auto-jeu fictif et une diffusion auto-interagissante et nous montrons leurs convergences en temps long vers la solution du problème d'optimisation. Nous considérons également un semigroupe de Schrödinger non linéaire, qui est un flot de gradient pour le problème d'optimisation régularisé par l'information de Fisher, et nous montrons sa convergence exponentielle sous une condition de trou spectral uniforme.

► *Thèse soutenue par* : **Haocheng YANG**

► *Sous la direction de* : Thomas Alazard (CNRS, École Polytechnique) et Jean-Marc Delort (université Paris-Nord)

---

**Existence, instabilité et répartition de l'énergie pour des équations d'évolution linéaires ou non linéaires issues de la mécanique des fluides**

*Soutenue le 16 juin 2025*

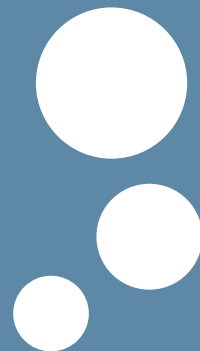
*Centre Borelli, ENS Paris-Saclay, Université de Paris*

---

**Résumé :**

Cette thèse contient trois thèmes : la partition microlocale de l'énergie, le théorème du viriel, et le caractère bien posé des écoulements de jet. Le premier thème concerne la manière dont l'énergie des solutions des équations dispersives est distribuée également à l'intérieur et à l'extérieur du cône de lumière. Ce phénomène a été fréquemment utilisé pour étudier le comportement à long terme des équations d'ondes (non) linéaires. Nous l'étendrons à une grande classe d'équations dispersives linéaires, en remplaçant le cône de lumière par une hypersurface dans l'espace des phases et en caractérisant la partition de l'énergie via des opérateurs pseudo-différentiels. Le deuxième thème examine l'équipartition des énergies cinétique et potentielle pour les

systèmes de vagues d'eau à deux phases. Cette étude conduit à une description quantitative de l'instabilité du système lorsque le fluide supérieur est plus dense que le fluide inférieur, ce qui est connu comme l'instabilité de Rayleigh-Taylor et l'instabilité de Kelvin-Helmoltz. Le troisième thème traite du problème de Cauchy pour l'évolution des fluides cylindriques à frontière libre, à savoir les jets. Nous établissons le caractère localement bien posé pour cette équation d'évolution dans les espaces de Sobolev sans aucune hypothèse de symétrie. Ce résultat constitue une étape fondamentale vers la compréhension du comportement à long terme des écoulements de jets.



par :

*Thomas HABERKORN<sup>1</sup> – Université d'Orléans,  
Responsable de la rubrique « Annonces de colloques »*

## NOVEMBRE 2025

► PGMO DAYS 2025

*les 18 et 19 Novembre 2025, à EDF Lab Paris-Saclay, Palaiseau*

<https://www.fondation-hadamard.fr/fr/programmes/les-programmes-mathematiques/home/pgmo-days/>

## DÉCEMBRE 2025

► COLLOQUE "DES MILIEUX LIBRES AUX MILIEUX POREUX : UN HOMMAGE À PHILIPPE ANGOT"

*les 1 et 2 Décembre 2025, à Marseille (FRUMAM)*

<https://indico.math.cnrs.fr/event/14952/>

---

1. [thomas.haberkorn@univ-orleans.fr](mailto:thomas.haberkorn@univ-orleans.fr)

## JUIN 2026

► 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CURVES AND SURFACES

*du 8 au 12 Juin 2026, à Saint-Malo*

<https://cs2026.sciencesconf.org/>

► INTERNATIONAL ONLINE CONFERENCE ON MATHEMATICS AND APPLICATIONS

*du 10 au 12 Juin 2026, en ligne*

<https://sciforum.net/event/IOCMA2026>

# Correspondantes et correspondants locaux

**Amiens** *Vivien Desveaux*  
LAMFA  
Univ. de Picardie Jules Verne  
33 rue Saint Leu  
80039 Amiens CEDEX 01  
☎ 03 22 82 75 16  
vivien.desveaux@u-picardie.fr

**Angers** *Frédéric Proia*  
LAREMA  
Univ. d'Angers  
2 bd Lavoisier  
49045 Angers CEDEX 01  
☎ 02 41 73 50 28 – 📠 02 41 73 54 54  
frederic.proia@univ-angers.fr

**Antilles-Guyane** *Célia Jean-Alexis*  
Univ. des Antilles et de la Guyane  
Campus de Fouillole - BP 250  
97157 Pointe-à-Pitre Cedex  
☎ (590) 590 48 30 88 📠 (590) 590 48 30 86  
celia.jean-alexis@univ-ag.fr

**Avignon** *Céline Lacaux*  
Dépt de Mathématiques  
Univ. d'Avignon  
33 rue Louis Pasteur  
84000 Avignon

celine.lacaux@univ-avignon.fr

**Belfort** *Michel Lenczner*  
Lab. Mécatronique 3M  
Univ. de Technologie de Belfort-  
Montbelliard  
90010 Belfort CEDEX  
☎ 03 84 58 35 34 – 📠 03 84 58 31 46  
Michel.Lenczner@utbm.fr

**Bordeaux** *Lisl Weynans*  
Institut de Mathématiques  
Univ. Bordeaux I  
351 cours de la Libération - Bât. A33  
33405 Talence CEDEX  
☎ 05 40 00 35 36  
lisl.weynans@math.u-bordeaux1.fr

**Brest** *Piernicola Bettiol*  
Laboratoire de Mathématiques de Bre-  
tagne Atlantique,  
Université Bretagne-Sud,  
6 avenue Le Gorgeu, CS 93837,  
29238 BREST cedex 3  
☎ 02 98 01 73 86 – 📠 02 98 01 61 75  
Piernicola.Bettiol@univ-brest.fr

**Caen** *Leonardo Baffico*  
Groupe de Mécanique, Modélisation  
Mathématique et Numérique  
Lab. Nicolas Oresme  
Univ. de Caen, BP 5186  
14032 Caen CEDEX  
☎ 02 31 56 74 80 – 📠 02 31 56 73 20  
leonardo.baffico@unicaen.fr

**Calais** *Antoine Benoit*  
LMPA  
Centre Universitaire de la Mi-voix  
50 rue F. Buisson, BP 699  
62228 Calais CEDEX.  
☎ 03 21 46 55 83  
Carole.Rosier@lmpa.univ-  
littoral.fr

- Centrale Supélec** *Anna*  
 Rozanova-Pierrat  
 Laboratoire MICCS, Centrale Supélec,  
 Batiment Bouygues,  
 3, rue Joliot Curie,  
 91190 Gif-sur-Yvette  
 anna.rozanova-  
 pierrat@centralesupelec.fr
- Cergy** *Elisabeth Logak*  
 Dép. de Mathématiques,  
 Univ. de Cergy-Pontoise / Saint-Martin  
 2 av. Adolphe Chauvin  
 95302 Cergy-Pontoise CEDEX  
 ☎ 01 34 25 65 41 – 📠 01 34 25 66 45  
 elisabeth.logak@u-cergy.fr
- Chine** *Claude-Michel Brauner*  
 IMB, Université de Bordeaux I  
 351 cours de la Libération  
 Bât. A33  
 33405 Talence CEDEX  
 ☎ 05 40 00 60 50  
 brauner@math.u-bordeaux.fr
- Clermont-Ferrand** *Arnaud Munch*  
 Laboratoire de Math. Blaise Pascal,  
 Université Clermont Auvergne,  
 Campus Universitaire des Cezeaux,  
 3, place Vasarely, 63178 Aubiere Cedex  
 ☎ 04 73 40 79 65 – 📠 04 73 40 70 64  
 Arnaud.Munch@math.univ-bpclermont.fr
- Compiègne** *Antoine Zurek*  
 Laboratoire de Mathématiques  
 Appliquées de Compiègne  
 Univ. de Technologie, BP 20529  
 60205 Compiègne CEDEX  
 antoine.zurek@utc.fr
- Dijon** *Alexandre Cabot*  
 Institut de Mathématiques  
 Univ. de Bourgogne  
 BP 47870  
 21078 Dijon CEDEX  
 alexandre.cabot@u-bourgogne.fr
- École Polytechnique** *Nicole Spillane*  
 CMAP, École Polytechnique  
 91128 Palaiseau  
 nicole.spillane@cmap.polytechnique.fr
- ENS Cachan** *Laure Quivy*  
 CMLA, ENS Cachan  
 61 av. du Président Wilson  
 94235 Cachan CEDEX  
 ☎ 01 47 40 59 12  
 quivy@cmla.ens-cachan.fr
- ENS Paris** *Bertrand Maury*  
 DMA, Ecole Normale Supérieure  
 45 rue d'Ulm,  
 75230 Paris CEDEX  
 📠 01 44 32 20 80  
 bertrand.maury@ens.fr
- EHESS** *Amadine Aftalion*  
 CAMS, EHESS  
 54, bd. Raspail,  
 75270 Paris CEDEX 06  
 ☎ 01 49 54 20 84  
 amandine.aftalion@math.cnrs.fr
- États-Unis** *Rama Cont*  
 IEOR, Columbia University  
 316 S. W. Mudd Building  
 500 W. 120th Street, New York,  
 New York 10027 – Etats-Unis  
 ☎ + 1 212-854-1477  
 Rama.Cont@columbia.edu
- Evry** *Stéphane Menozzi*  
 LPSM, Sorbonne Université  
 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05  
 stephane.menozzi@univ-evry.fr
- Evry Génopole** *Laurent Denis*  
 Dpt de Math.  
 Univ. du Maine  
 72085 Le Mans  
 ☎ 01 64 85 34 98  
 ldenis@univ-lemans.fr
- Franche-Comté** *Nabile Boussaid*  
 Lab. de mathématiques  
 UFR Sciences et Techniques  
 16 route de Gray  
 25030 Besançon CEDEX  
 ☎ 03 81 66 63 37 – 📠 03 81 66 66 23  
 boussaid.nabile@gmail.com

**Grenoble** *Brigitte Bidegaray*  
 Laboratoire Jean Kuntzmann,  
 Université Grenoble Alpes,  
 Bâtiment IMAG, CS 40700,  
 38058 GRENOBLE CEDEX 9  
 ☎ 04 76 57 46 10 – 📠 04 76 63 12 63  
 Brigitte.Bidegaray@univ-grenoble-  
 alpes.fr

**Israël** *Ely Merzbach*  
 Dept of Mathematics and Computer  
 Science  
 Bar Ilan University Ramat Gan.  
 Israel 52900  
 ☎ + 972 3 5318407/8 – 📠 + 972 3 5353325  
 merzbach@macs.biu.ac.il

**La Réunion** *Philippe Charton*  
 Dép. de Mathématiques et Informatique  
 IREMIA  
 Univ. de La Réunion  
 BP 7151  
 97715 Saint-Denis Messag CEDEX 9  
 ☎ 02 62 93 82 81 – 📠 02 62 93 82 60  
 Philippe.Charton@univ-reunion.fr

**Rouen** *Ioana Ciotir*  
 Laboratoire de Mathématiques / LMI  
 INSA Rouen Normandie  
 Avenue de l'Université  
 76801 Saint-Étienne-du-Rouvray  
  
 Ioana.Ciotir@insa-rouen.fr

**Le Havre** *Adnan Yassine*  
 IUT du Havre  
 Place Robert Schuman  
 BP 4006  
 76610 Le Havre.  
 ☎ 02 32 74 46 42 – 📠 02 32 74 46 71  
 adnan.yassine@iut.univ-lehavre.fr

**Le Mans** *Alexandre Popier*  
 Dép. de Mathématiques  
 Univ. du Maine  
 Av. Olivier Messiaen  
 72085 Le Mans CEDEX 9  
 ☎ 02 43 83 37 19 – 📠 02 43 83 35 79  
 Alexandre.Popier@univ-lemans.fr

**Lille** *Caterina Calgaro*  
 Lab. de Mathématiques Appliquées  
 Univ. des Sciences et Technologies de  
 Lille  
 Bat. M2, Cité Scientifique  
 59655 Villeneuve d'Ascq CEDEX  
 ☎ 03 20 43 47 13 – 📠 03 20 43 68 69  
 Caterina.Calgaro@univ-lille1.fr

**Limoges** *Samir Adly*  
 LACO  
 Univ. de Limoges  
 123 av. A. Thomas  
 87060 Limoges CEDEX  
 ☎ 05 55 45 73 33 – 📠 05 55 45 73 22  
 adly@unilim.fr

**Lorraine-Metz** *Jean-Pierre Croisille*  
 Institut Élie Cartan de Lorraine,  
 Université de Lorraine - Metz,  
 3 rue Augustin Fresnel, BP 45112,  
 57073 Metz, Cedex 03  
 ☎ 03 87 31 54 11 – 📠 03 87 31 52 73  
 jean-pierre.croisille@univ-  
 lorraine.fr

**Lorraine-Nancy** *Denis Villemonais*  
 Institut Élie Cartan de Lorraine  
 Université de Lorraine - Nancy,  
 BP 239  
 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy  
 ☎ 03 83 68 45 95 – 📠 03 83 68 45 61  
 denis.villemonais@univ-lorraine.fr

**Lyon** *Benoit Fabrèges*  
 Institut Camille Jordan,  
 Univ. Claude Bernard Lyon 1  
 43 b<sup>d</sup> du 11 novembre 1918  
 69622 Villeurbanne CEDEX  
 fabrèges@math.univ-lyon1.fr

**Marne la Vallée** *Alain Prignet*  
 Univ. de Marne-la-Vallée, Cité Descartes  
 5 b<sup>d</sup> Descartes  
 77454 Marne-la-Vallée CEDEX  
 ☎ 01 60 95 75 34 – 📠 01 60 95 75 45  
 alain.prignet@univ-mlv.fr

**Maroc** *Khalid Najib*  
 École Nationale de l'Industrie Minérale  
 B<sup>d</sup> Haj A. Cherkaoui, Agdal  
 BP 753, Rabat Agdal 01000  
 Rabat  
 Maroc  
 ☎ 00 212 37 77 13 60 – 📠 00 212 37 77 10 55  
 najib@enim.ac.ma

**Marseille** *Loïc Le Treust*  
 LATP  
 Université Paul Cézanne  
 Faculté des Sciences et Techniques de St  
 Jérôme, Case Cour A  
 Av. Escadrille Normandie-Niemen  
 13397 Marseille Cedex 20, France ☎ 04 91  
 28 88 40 – 📠 01 91 28 87 41  
 loic.le-treust@univ-amu.fr

**Montpellier** *Vanessa Lleras*  
 IMAG,  
 Univ. Montpellier  
 Pl. Eugène Bataillon  
 34090 Montpellier  
 ☎ 04 67 14 32 58 – 📠 04 67 14 35 58  
 vanessa.lleras@umontpellier.fr

**Nantes** *Anaïs Crestetto*  
 Université de Nantes  
 2, rue de la Houssinière - BP92208  
 44321 Nantes CEDEX 3  
 ☎ 02 51 12 59 86  
 Anaïs.Crestetto@univ-nantes.fr

**Nice** *Claire Scheid*  
 Lab. Jean-Alexandre Dieudonné  
 Univ. de Nice, Parc Valrose  
 06108 Nice CEDEX 2  
 ☎ 04 92 07 64 95 – 📠 04 93 51 79 74  
 claire.scheid@unice.fr

**Norvège** *Snorre Christiansen*  
 snorrec@math.uio.no

**Orléans** *Bruno Galerne*  
 Institut Denis Poisson  
 Univ. d'Orléans  
 BP 6759  
 45067 Orléans CEDEX 2  
 ☎ 02 38 41 73 16  
 bruno.galerie@univ-orleans.fr

**Paris I** *Philippe Bich*  
 Centre d'Economie de la Sorbonne UMR  
 8174  
 Univ. Paris 1 Pantheon-Sorbonne  
 Maison des Sciences Economiques  
 106 -112 boulevard de l'Hôpital  
 75647 PARIS CEDEX 13  
 ☎ 01 44 07 83 14 – 📠 01 44 07 83 01  
 philippe.bich@univ-paris1.fr

**Paris Dauphine** *Lucas Ertzbischoff*  
 CEREMADE  
 Univ. Paris-Dauphine  
 Pl du M<sup>al</sup> de Lattre de Tassigny  
 75775 Paris CEDEX 16  
 ertzbischoff@ceremade.dauphine.fr

**Paris Descartes** *Ellen Saada*  
 Lab. MAP 5 - UMR CNRS 8145  
 Univ. Paris Descartes  
 45 rue des Saints Pères  
 75270 Paris cedex 06  
 ☎ 01 42 86 21 14 – 📠 01 42 86 41 44  
 ellen.saada@mi.parisdescartes.fr

**Paris Est** *Mickaël Dos Santos*  
 Univ. Paris Est Créteil  
 UPEC  
 61 av. du Général de Gaulle  
 94010 Créteil CEDEX PS  
 ☎ 01 45 17 16 42  
 mickael.dos-santos@u-pec.fr

**Paris Saclay** *Benjamin Graille*  
 Mathématiques, Bât. 425  
 Univ. Paris Saclay  
 91405 Orsay CEDEX  
 ☎ 01 69 15 60 32 – 📠 01 69 14 67 18  
 Benjamin.Graille@math.u-psud.fr

**Paris XIII** *Jean-Stéphane Dhersin*  
 Univ. Paris XIII  
 Département de Mathématiques Insti-  
 tut Galilée  
 99, Avenue Jean-Baptiste Clément  
 93430 Villetaneuse  
 ☎ 01 45 17 16 52  
 dhersin@math.univ-paris13.fr

**Pau** *Charles-Edouard Bréhier*  
 Lab. de Math. Appliquées, IPRA,  
 Univ. de Pau  
 av. de l'Université  
 64000 Pau  
  
 charles-edouard.brehier@univ-  
 pau.fr

**Portugal** *Pedros Freitas*  
  
 freitas@cii.fc.ul.pt

**Perpignan** *Oana Serea*  
 Dépt de Mathématiques  
 Univ. de Perpignan  
 52 avenue de Villeneuve  
 66860 Perpignan CEDEX  
 ☎ 04 68 66 21 48  
 serea@univ-perp.fr

**Poitiers** *Matthieu Brachet*  
 LMA  
 Univ. de Poitiers  
 B<sup>d</sup> Marie et Pierre Curie  
 BP 30179  
 86962 Futuroscope Chasseneuil CEDEX  
 ☎ 05 49 49 68 78  
 matthieu.brachet@math.univ-  
 poitiers.fr

**Reims** *Stéphanie Salmon*  
 Lab. de Mathématiques  
 Univ. Reims  
 Moulin de la Housse – BP 1039  
 51687 Reims CEDEX 2  
 ☎ 03 26 91 85 89 – 📠 03 26 91 83 97  
 stephanie.salmon@univ-reims.fr

**Rennes** *Roger Lewandowski*  
 Univ. Rennes 1  
 IRMAR, Université Rennes1,  
 Campus Beaulieu, 35042 Rennes  
 ☎ 02 23 23 58 64  
 Roger.Lewandowski@univ-rennes1.fr

**Rouen** *Jean-Baptiste Bardet*  
 LMRS  
 Univ. de Rouen  
 av. de l'Université - BP 12  
 76801 Saint-Étienne-du-Rouvray  
 ☎ 02 32 95 52 34 – 📠 02 32 95 52 86  
 Jean-Baptiste.Bardet@univ-rouen.fr

**Savoie** *Stéphane Gerbi*  
 Lab. de Mathématiques  
 Univ. de Savoie  
 73376 Le Bourget du Lac CEDEX  
 ☎ 04 79 75 87 27 – 📠 04 79 75 81 42  
 stephane.gerbi@univ-savoie.fr

**Sorbonne Université** *Kévin Le Balc'h*  
 Lab. Jacques-Louis Lions  
 Boîte courrier 187  
 Sorbonne Université  
 4 place Jussieu  
 75252 Paris CEDEX 05  
  
 kevin.le-balc-h@inria.fr

**Sorbonne Université** *Tam Le*  
 LPSM, Sorbonne Université  
 4 place Jussieu  
 75252 Paris CEDEX 05  
  
 tamle@lpsm.paris

**Strasbourg** *Emmanuel Franck*  
 IRMA  
 Univ. de Strasbourg  
 7 rue René Descartes  
 67084 Strasbourg CEDEX  
 emmanuel.franck@inria.fr

**Toulouse** *Laurent Risser*  
 IMT, Univ. Toulouse 3  
 118 route de Narbonne  
 31077 Toulouse CEDEX 4  
 Laurent.Risser@math.univ-  
 toulouse.fr

**Tours** *Vincent Perrollaz*  
 Institut Denis Poisson  
 Fac. Sciences et Technique de Tours  
 7 parc Grandmont  
 37200 Tours  
 vincent.perrollaz@lmpt.univ-  
 tours.fr

**Troyes** *Florian Blachère*  
Institut Charles Delaunay  
Université de Technologie de Troyes  
12, rue Marie Curie  
CS 42060 - 10004 TROYES CEDEX  
florian.blachere@utt.fr

**Valenciennes** *Juliette Venel*  
LAMAV  
Univ. de Valenciennes  
Le Mont Houy – ISTV2  
59313 Valenciennes CEDEX 9  
☎ 03 27 51 19 23 – 📠 03 27 51 19 00  
juliette.venel@univ-valenciennes.fr

**Versailles** *Pierre Gabriel*  
Université De Versailles St-Quentin-en-  
Yvelines  
Bâtiment Fermat 45 Avenue Des Etats  
Unis  
59313 Valenciennes CEDEX 9  
☎ 01 39 25 30 68 – 📠 01 39 25 46 45  
pierre.gabriel@uvsq.fr



# ANNALES DE LA FACULTÉ DES SCIENCES DE TOULOUSE

FONDÉES EN 1887

# AST



RENSEIGNEMENTS  
& SOUMISSIONS :  
[afst.centre-mersenne.org](http://afst.centre-mersenne.org)

MEMBRE DU  
CENTRE MERSENNE



COMITÉ  
EDITORIAL

- Marie-Claude Arnaud
- Frédéric Bayart
- Karine Beauchard
- Jérémy Blanc
- Jérôme Bolte
- Damien Calaque
- Reda Chhaïbi
- Francesco Costantino
- Jean-François Coulombel
- François Delarue
- Clotilde Fermanian-Kammerer
- Gersende Fort
- Timothy Gowers
- Colin Guillarmou
- Charlotte Hardouin
- Radu Ignat
- Pascal Maillard
- Vincent Pilloni
- Jasmin Raissy
- Samuel Tapie
- Romain Tessera
- Xavier Tolsa
- Alexis Vasseur
- Claire Voisin



REVUE EN  
LIBRE ACCÈS  
IMMÉDIAT

- Tous domaines de mathématiques bienvenus
- Pas de limite de pages

SOUTENUES PAR



UNIVERSITÉ  
TOULOUSE III  
PAUL SABATIER