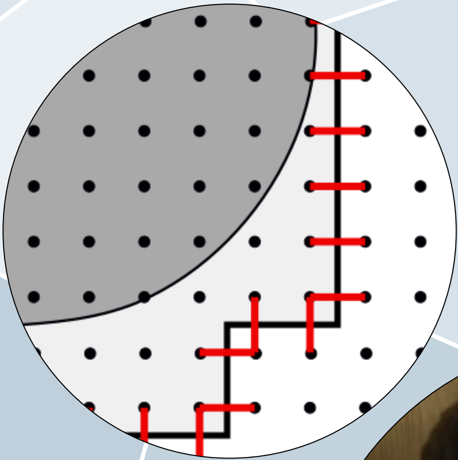
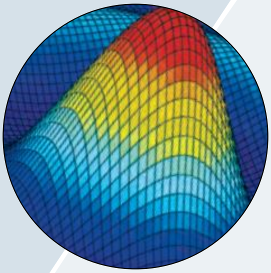
SMAI

MATAPLI





Nº 127 — Mars 2022

Comité de rédaction

Rédacteurs et rédactrices

MATAPLI — Bulletin n° 127 — Mars 2022.
Édité par la Société de Mathématiques Appliquées et Industrielles

Directeur de la publication Olivier Goubet, Président de la SMAI
Composition, mise en page Julien Salomon et Maxime Chupin
Impression Présence Graphique,
2 rue de la Pinsonnière, 37260 Monts

Sommaire

Date limite de soumission des textes pour le Matapli 128 :
15 mai 2022

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 — http://smai.emath.fr

Prix des publicités et encarts dans Matapli pour 2022

- 150 € pour une demi-page intérieure
- 250 € pour une page intérieure
- 400 € pour la 3e de couverture
- 450 € pour la 2e de couverture
- 500 € pour la 4e 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@emath.fr

Site internet de la SMAI :

http://smai.emath.fr/

Édito

par :

Olivier GOUBET[1] — Président de la SMAI

Au moment où j'écris ces lignes, les bruits de bottes s'amplifient aux confins de la Russie et de l'Ukraine. Une ombre de plus sur la tenue du Congrès International des Mathématiciens (ICM 2022) à Saint-Petersbourg cet été. Rappelons aussi que la situation d'Azat Miftakhov ne s'améliore pas. Le bureau de la SMAI est partagé entre la tentation d'un boycott et la réticence à abandonner les collègues russes qui n'y peuvent pas grand'chose. A noter une nouvelle récompense à cet ICM 2022 dans le domaine de la physique mathématique, nommée médaille Olga Ladyzhenskaya en l'honneur de cette mathématicienne d'exception.

Pendant que l'INSMI lance les assises des mathématiques, il est important de noter que les mathématiques appliquées se portent bien dans notre pays. Le point à mettre en exergue est la diversification des domaines d'application. Par exemple les mathématiques appliquées aux sciences du vivant (mathématiques pour la biologie, pour l'écologie, pour la santé) sont en plein essor. Néanmoins cela ne doit pas occulter un certain nombre d'enjeux et de sources d'inquiétude. Revenons une nouvelle fois sur le fait que les enseignements en sciences et en mathématiques dans la dernière réforme du lycée sont réduits à la portion congrue. Le fossé et l'incompréhension entre décideurs, grand public et scientifiques dont les mathématiciens appliqués ne va que s'amplifier. Les mathématiques et les mathématiques appliquées ne sont pas une science morte. Il faut que les décideurs se rendent compte de leur importance pour les défis sociétaux qui nous attendent tous. La gestion (modélisation, aide à la décision, statistiques) de la pandémie qui nous affecte encore en est un bon exemple.

Bien Cordialement

1. olivier.goubet@univ-lille.fr

Comptes rendus du conseil d'administration de la SMAI

par :
Anne-Laure DALIBARD *— Secrétaire générale de la SMAI*

COMPTE RENDU DU CA DE LA SMAI DU 8 OCTOBRE 2021

Présents : S. Adly, F. Barbaresco, G. Chapuisat, C. Choquet, A.-L. Dalibard, J. Delon, Y. Demichel, V. Desveaux, A. Ern, N. Forcadel, O. Goubet, L. Goudenège, B. Liquet, A. Nouy, G. Raoul, C. Rosier, R. Tittarelli, A. Veber, M. Zani.

Excusés : P. Calka (pouvoir Y. Demichel), J. Lacaille, R. Laraki, R. Lewandowski (pouvoir A.-L. Dalibard) , P.-Y. Louis, L. Weynans.

Note : En raison de la situation sanitaire, ce CA a eu lieu par visio-conférence.

1 Principaux points à l'ordre du jour

Renouvellement du bureau

Le CA a procédé à l'élection d'une nouvelle trésorière et d'un nouveau Vice-Président chargé des relations industrielles, ces postes étant restés vacants lors du conseil d'administration de juillet.

Sont élus à l'unanimité pour une durée d'une année au Bureau de la SMAI :

- *Trésorière :* Catherine Choquet
- *Vice-Président chargé des relations industrielles :* Alexandre Ern

Le CA remercie chaleureusement les membres sortants du bureau pour tout le travail accompli lors de leurs mandatures au sein de la SMAI.

Point sur le secrétariat

Les secrétaires de la SMAI ont repris le travail en présentiel, avec un jour de télétravail par semaine. Il y a parfois des demandes ponctuelles de télétravail (par exemple pendant les vacances scolaires), qui sont examinées au cas par cas par le président et/ou par la trésorière.

L'ordinateur fixe utilisé par Huong Fuentes est assez ancien, et très lent même pour des tâches de bureautique classique. Le CA donne son accord pour remplacer cet ordinateur fixe par un modèle plus récent.

Point sur les publications

Amandine Véber fait le point sur les activités éditoriales de la SMAI. Elle est intervenue aux journées du Réseau National des Bibliothèques de Mathématiques (RNBM) qui ont eu lieu le 06 octobre. Le mandat des éditeurs en chef de SMAI-JCM se termine en juin 2022; il faut donc commencer à chercher des successeurs. Une réunion éditoriale a également eu lien avec les éditeurs en chef des différentes revues de la SMAI et EDP sciences, et s'est très bien passée.

Point sur l'enseignement

Yann Demichel fait un point sur les différentes questions à l'ordre du jour concernant l'enseignement.

- Une rencontre avec le jury de l'agrégation externe et les préparateurs, organisée conjointement avec la SMF, a eu lieu à l'IHP le vendredi 24 septembre. La question des reports de stage a été abordée. Les demandes de report de stage pour poursuite d'études doctorales peuvent parfois être initialement refusées mais il est toujours possible de demander le soutien des sociétés savantes pour débloquer la situation. La réforme du baccalauréat et la réforme des MEEF ont cette année fait apparaître le problème "inverse" : des lauréats au concours ayant obtenu un report de stage pour effectuer une thèse mais ayant finalement du y renoncer faute de financement, n'ont pas été réintégrés d'office sur un poste de stagiaire. Une fois le report accordé par le rectorat, celui-ci ne garde plus nécessairement le support d'accueil vacant. Des supports doivent alors être trouvés en urgence dans d'autres académies. La difficulté vient des calendriers asynchrones entre la demande de report de stage et l'obtention définitive du financement de thèse.

- Le premier numéro de la revue « Epidémès », qui traite de didactique des mathématiques dans l'enseignement supérieur, va sortir prochainement. Yann Demichel sollicite l'avis du CA sur l'articulation possible de cette revue avec les sociétés savantes de mathématiques.
- Le Conseil Supérieur des Programmes a invité Aviva Szpirglas à une audition sur les usages du numériques au lycée. Cette invitation a ensuite été transmise aux commissions enseignement de la SMF et de la SMAI. Yann Demichel lance un appel aux bonnes volontés au sein du CA pour aider à préparer cette intervention.
- Sur une suggestion de Yann Demichel, le CA propose Thierry de la Rue comme membre du jury pour les prix Ferrand et d'Alembert.

Point sur les actions grand public

Roberta Tittarelli fait un point sur les actions grand public menées par la SMAI

- Roberta Tittarelli ne pourra malheureusement pas participer à la JAM Santé, et lance un appel urgent aux bonnes volontés au sein du CA pour donner un coup de main lors de cet évènement.
- Le comité pour la création d'une chaîne YouTube de la SMAI s'est réuni une seconde fois, et a commencé à élaborer une charte. La chaîne YouTube fonctionnera comme une revue, et doit donc se doter d'un comité éditorial. Roberta Tittarelli lance un appel aux bonnes volontés pour constituer celui-ci, et en particulier identifier un·e rédacteur·rice en chef .

Nouvelles des groupes thématiques

- **GAMNI** : le comité de liaison doit être renouvelé. Olivier Lafitte, qui est le nouveau responsable du groupe, a transmis au CA une proposition de liste, que le CA a approuvée.
- **SIGMA** : Anthony Nouy présente les activités du groupe. La prochaine conférence "Curves and Surfaces" aura lieu en juin 2022 à Arcachon, et les inscriptions sont ouvertes. Les journées du groupe auront lieu le 19/10 au Laboratoire Jacques-Louis Lions, avec retransmission en visioconférence via zoom. Le bureau se réunira et sera renouvelé à cette occasion. Anthony Nouy appelle à relayer cette information.
- **MAS** : Marguerite Zani présente les activités du groupe. Les journées MAS, qui devaient initialement avoir lieu en 2020, ont finalement eu lieu

fin août 2021, à distance. Un compte rendu sera publié prochainement dans MATAPLI Les prochaines journées auront lieun en 2022 à Rouen. Pierre Calka préside le comité d'organisation et Patricia Reynaud-Bouret le conseil scientifique.

- **MABIOME** : Gaël Raoul présente les activités du groupe. Un trimestre IHP intitulé "Mathematical modeling of organization in living matter" aura lieu de janvier à avril 2022. Par ailleurs le GDR MathSAV est en cours de renouvellement, et un travail est en cours pour rapprocher les activités du groupe MABIOME et celles du GDR.

CANUM 2024

Catherine Choquet présente la candidature du laboratoire MIA, de l'université de la Rochelle, à l'organisation du CANUM 2024. L'université de la Rochelle, créée en 1993, n'a jamais organisé de CANUM ni de Congrès SMAI. Mais le laboratoire MIA dispose de bonnes infrastructures et d'une expérience conséquente dans l'organisation de gros congrès.

Le CA approuve cette candidature.

Congrès des Jeunes Chercheuses et Chercheurs en Mathématiques Appliquées

Le CJC va avoir lieu du 27 au 29 octobre 2021 (https://cjc-ma2021.github.io/). La SMAI est partenaire de cet évènement. Olivier Goubet, après avoir fait un point d'information, soulève la question de l'organisation de ce congrès les années suivantes. Il faut une structure qui accueille suffisamment de doctorant·e·s et de jeunes chercheur·se·s. Amandine Véber rappelle que Catherine Choquet avait proposé de faire appel aux fédérations, qui peuvent avoir la masse critique suffisante pour cela.

Ecole franco-espagnole Jacques-Louis Lions

Cet évènement, qui a lieu tous les deux ans, est organisé par la SEMA, en partenariat avec la SMAI. La SEMA propose d'organiser cet évènement en France en 2025, idéalement dans un lieu proche de la frontière avec l'Espagne.

Le CA lance un appel aux bonnes volontés pour organiser cet évènement.

Organisation du CEMRACS

Le CA remercie chaleureusement les organisateurs du CEMRACS 2021. Les participants étaient très contents de cet évèment, et soulagés qu'il ait pu avoir lieu en présentiel. Les organisateurs ont néanmoins fait remonter quelques difficultés techniques notamment au niveau de la facturation.

Prix Marc Yor

Olivier Goubet va se rapprocher d'Anne de Bouard, présidente du CS, pour la désignation des 3 membres du jury nommés par la SMAI. Le CA sera consulté par voie électronique sur les propositions à venir.

Projets BOUM

La date limite pour candidater est fin octobre. Les projets seront examinés lors du bureau du 14 novembre. Un compte-rendu sera ensuite diffusé au CA avant une discussion et un vote par voie électronique.

Questions diverses

Frédéric Barbaresco propose d'organiser des visites de laboratoires industriels pour élèves et chercheurs.

2 Points d'information

Journées Math-Meca à l'IHP

L'Association Française de Mécanique et la SMAI organisent deux journées portant sur la Réduction de modèles et traitement géométrique des données. Cette manifestation aura lieu les 8 et 9 novembre 2021 à l'IHP (https://gdr-gdm.univ-lr.fr/ihp-maths-meca/).

Forum Emploi Maths

Le Forum Emploi Maths aura lieu le 11 et le 12 octobre, majoritairement à distance. Quelques évènements auront lieu en présence à Grenoble (dont la remise du prix Math-Industrie).

Math C++

Le but de ce projet est de faire découvrir les mathématiques à des élèves de collèges et de lycées. Stéphane Seuret a repris récemment la tête du comité de pilotage.

Journées IAplusK

L'IHP organise les 16 et 17 novembre 2021 deux journées d'exposés, d'échanges et de conversations scientifiques autour de l'intelligence artificielle (https://indico.math.cnrs.fr/event/6681/).

Prochains C.A. de la SMAI

Les prochaines réunions de bureau de la SMAI auront lieu le 19 novembre et le 17 décembre. Le prochain CA aura lieu le 14 janvier à 14h, à l'IHP (la connexion par visio-conférence sera possible). Il sera précédé d'une réunion du bureau le matin à 10h.

Compte rendu du CA de la SMAI du 14 janvier 2022

Présents : S. Adly, F. Barbaresco, P. Calka, G. Chapuisat, C. Choquet, A.-L. Dalibard, J. Delon, Y. Demichel, V. Desveaux, A. Ern, N. Forcadel, O. Goubet, L. Goudenège, R. Lewandowski, C. Marteau, A. Nouy, G. Raoul, C. Rosier, F. Santambrogio, J. Stoehr, A. Véber, L. Weynans, M. Zani.

Excusés : J. Lacaille, R. Laraki, B. Liquet (pouvoir S. Adly), P.-Y. Louis (pouvoir P. Calka), R. Tittarelli.

Note : En raison de la situation sanitaire, ce CA a eu lieu par visio-conférence.

1 Principaux points à l'ordre du jour

Point sur le secrétariat

Compte tenu de la situation sanitaire et des difficultés d'organisation qu'elle engendre, les secrétaires sont autorisées à aménager leur travail avec souplesse, en répartissant les jours de télétravail et de travail en présentiel en fonction de leurs contraintes personnelles et professionnelles. Par ailleurs, le CA est favorable à l'octroi d'une prime annuelle identique à celle de l'année dernière.

Point sur le site web

Ludovic Goudenège fait un point d'information sur le site web. Le serveur a été mis à jour fin décembre, ce qui a occasionné quelques bugs (en particulier des difficultés pour ajouter des documents sur le site), en voie de résolution pour la plupart.

Par ailleurs, la campagne de réadhésions a commencé. Néanmoins, des problèmes de paiement surviennent dans environ 25% des paiements par carte bancaire, en raison d'un changement du système de paiement de la banque avec laquelle travaille la SMAI. La SMAI n'a malheureusement pas la main sur ce problème. Ludovic Goudenège encourage les membres de la SMAI rencontrant des difficultés à écrire au webmestre (Alain Prignet, smai-adhesion@smai.emath.fr), qui pourra ensuite faire remonter les informations à la banque pour lui signaler l'ampleur du problème. Il semble important de régler cette question avant l'ouverture des inscriptions au CANUM.

Point sur les publications

Amandine Véber fait le point sur les publications. Le renouvellement des éditeurs en chef de SMAI-JCM est en cours. Thierry Goudon a accepté de prolonger son mandat de 2 ans et une consultation est en cours quant à la ou au deuxième collègue à inviter à prendre la suite de Doug Arnold. Claire Chainais-Hillairet a accepté d'être Éditrice en chef de la collection Maths et applications, et une consultation a été lancée au sein du conseil d'administration pour recruter un éditeur ou une éditrice en statistique au sein de cette revue. Par ailleurs la SMAI a reçu 116k€ de la DDOR (direction des données ouvertes de la recherche du CNRS) pour aider au passage en Subscribe to Open des revues co-gérées avec EDP Sciences.

Point sur les actions grand public

En l'absence de Roberta Tittarelli, vice-présidente chargée des actions grand public, Olivier Goubet fait le point sur les actions grand public. La Fondation Blaise Pascal va organiser en mars, pour la première fois, une école de médiation scientifique, et demande un soutien financier de 1500€ à la SMAI. Des discussions ont lieu au sein du CA autour du montant du soutien à accorder et de l'utilisation de cette somme. Olivier Goubet propose de demander plus de précisions à Roberta Tittarelli afin de répondre aux questions du CA, et d'organiser ensuite une consultation électronique.

Point sur les relations avec l'industrie

Alexandre Ern fait le point sur les relations avec l'industrie. La journée maths-industries organisée par Frédéric Barbaresco devait initialement avoir lieu au printemps. Un retard est à prévoir compte tenu de la pandémie.

Point sur l'enseignement

Yann Demichel fait le point sur les actualités liées à l'enseignement. Les sociétés savantes de mathématiques ont de nouveau dénoncé les dangers de la réforme du lycée, dont un des aspects est la disparition des mathématiques du tronc commun, et une des conséquences la diminution du nombre total d'heures de mathématiques enseignées au lycée. De surcroît, de plus en plus d'élèves abandonnent la spécialité maths en terminale, et se retrouveront malheureusement fortement pénalisés dans leur poursuite d'études post-bac.

Les épreuves de spécialités risquent d'être repoussées de mars à juin comme l'année dernière.

Le salon Culture et jeux mathématiques, auquel la SMAI est associée tous les ans avec la SMF et la SFdS, aura lieu du 2 au 5 juin 2022 à Paris. Un appel aux bonnes volontés est lancé au sein du CA pour participer au stand commun avec les autres sociétés savantes de mathématiques.

Nouvelles des groupes thématiques

- Clément Marteau fait le point sur les activités du groupe **MAS**. L'appel à candidatures pour le prix de thèse Jacques Neveu a été lancé, et se terminera fin janvier. Par ailleurs, Céline Lacaux, la précédente responsable du groupe, avait commencé la mise en place d'une liste de diffusion, et Clément Marteau interroge le CA sur les outils les plus adaptés pour la gestion de cette liste. Amandine Véber recommande les outils proposés par le CNRS. Pierre Calka, qui fait partie du comité d'organisation des journées MAS 2022, fait le point sur l'organisation de celles-ci. Elles auront lieu du 29 au 31 août 2022 à Rouen, en présentiel *a priori* (mais le comité d'organisation conserve une piste pour le distanciel si nécessaire). Les conférences plénières sont prévues, et le comité d'organisation attend la validation du conseil scientifique pour lancer les invitations dans les sessions parallèles.
- Gaël Raoul fait le point sur les activités du groupe **MABIOME**. La liste de diffusion du groupe a été mise en commun avec celle du GDR MathSAV, afin de mieux fédérer la communauté. La rencontre de décembre avec le GDR MAMOVI a dû avoir lieu en semi-distanciel. Un trimestre IHP se déroule de janvier à avril sur des thématiques voisines de celles du groupe.
- Filippo Santambrogio fait le point sur les activités du groupe **MODE**. Les journée du groupe auront lieu fin mai-début juin à Limoges (plus tard que d'habitude afin de minimiser les risques d'annulation dûs à la pandémie), voir https://indico.math.cnrs.fr/event/6564/. Les conférences plénières sont prévues, et l'appel à communications est lancé. Le comité d'organisation local a avancé dans la recherche de financements. Par ailleurs, la deuxième édition des journées MAS-MODE aura lieu au mois de mars à INRIA Paris.
- Anthony Nouy fait le point sur les activités du groupe **SIGMA**. L'organisation de la conférence Curves and Surfaces, qui aura lieu en juin, avance comme il faut. L'appel à communications sera lancé en février.

Relations avec le CIRM

Des discussions sont en cours avec Pascal Hubert, directeur du CIRM, qui souhaiterait que les relations entre le CIRM et la SMAI soient plus formalisées qu'aujourd'hui, par exemple en mettant en place une convention pour le CEMRACS, ou en précisant la durée du mandat du représentant de la SMAI au sein du CS du CIRM (ce représentant est actuellement Thierry Goudon).

Modification des statuts du COSSAD

Le CA est favorable à la modification des statuts de la COSSAD, qui vise à laisser plus de place aux associations autres que les sociétés savantes.

FEM 2022

Le Forum de l'emploi mathématiques est organisé conjointement par AMIES, la SFdS et la SMAI. Le comité d'organisation pour la version 2022 est piloté par Jérôme Lelong et Gwladys Toulemonde. Les organisateurs souhaiteraient que le FEM 2022 ait lieu en présentiel, à la Villette.

Le CA lance un appel aux bonnes volontés pour aider les organisateurs, notamment sur les liens avec les entreprises.

CJC 2022

Le CA soutient la candidature des doctorantes et doctorants de l'Université du littoral Côte d'Opale pour l'organisation du CJC 2022. Il a bien noté que des jeunes chercheurs et chercheuses de toutes les disciplines mathématiques participeront au congrès, tant du côté des organisateurs que du côté des oratrices, et est tout-à-fait favorable à ce rapprochement. Carole Rosier est volontaire pour conseiller et guider l'équipe organisatrice dans leurs démarches (recherche de financements, mise en place d'un conseil scientifique, interaction avec l'équipe administrative...)

Comité Synthèse nationale des mathématiques

Le comité Synthèse Nationale des Mathématiques (SNM) est chargé de faire une synthèse sur les mathématiques, à partir des évaluations Hcéres et d'une consultation de différentes instances représentatives de la communauté. À ce titre, Grégoire Allaire et Marc Peigné, qui dirigent le comité en question, ont rencontré Olivier Goubet et Amandine Véber, et souhaitent recueillir l'avis du CA de la SMAI sur quelques questions. Ces questions ont été soumises aux membres du CA dans un document partagé en amont de la réunion, afin de permettre la discussion. Olivier Goubet a préparé une synthèse des différentes contributions, et celle-ci est approuvée par le CA.

Tarifs CANUM

Nicolas Forcadel, membre du comité d'organisation du CANUM 2022 (édition de 2020 reportée en raison de la pandémie), propose de reconduire les tarifs à l'identique. Le CA approuve cette proposition.

CEMRACS 2023

L'équipe organisatrice initialement pressentie pour organiser le CEMRACS 2023 ne va malheureusement pas pouvoir donner suite. Le CA lance donc un appel urgent aux candidatures pour l'organisation du CEMRACS 2023. La date limite pour déposer le projet en ligne est le 31 mars 2022, et le conseil scientifique du CIRM se réunira le lundi 16 mai. La SMAI peut fournir une aide au montage du projet.

Commission électorale

Catherine Choquet, Alexandre Ern et Anthony Nouy sont volontaires pour participer à la commission électorale.

Questions diverses

Julie Delon transmet une question de la part de la SMF, qui souhaiterait mettre en place un forum de discussion, par exemple pour faire interagir des membres de la communauté sur des sujets d'actualité la concernant. La SMF demande si la SMAI dispose d'un tel outil ; la réponse est négative. Par ailleurs Anne-Laure Dalibard soulève la difficulté de la modération d'un tel forum.

2 Points d'information

Journée Sciences et médias

La prochaine journée Sciences et médias aura lieu le 25 janvier à la BNF. Le thème sera "Raconter la science en temps de crise". Julie Delon signale que les mesures de CO2 effectuées par la BNF dans la salle indiquent que l'accueil du public est possible. Une retransmission sur YouTube est également prévue. Le programme est disponible sur http://sciencesetmedias.org/index.php.

Prochains C.A. de la SMAI

Les prochaines réunions de bureau de la SMAI auront lieu le 4 février et le 11 mars 2022. Le prochain CA aura lieu le 8 avril à 14h, à l'IHP (la connexion par visio-conférence sera possible). Il sera précédé d'une réunion du bureau le matin à 10h. L'assemblée générale aura lieu le 10 juin 2022.

Du côté du réseau Modélisation, Simulation, Optimisation et entreprises

par :
Michel Mehrenberger — Université d'Aix-Marseille

Naissance d'Eureka 6 décembre 2021 : inauguration d'Eureka et journée IA à Marseille

Le projet Eureka

Eureka est une instance de l'Institut Archimède (un des instituts d'Aix-Marseille Université) qui s'adresse aux entreprises à la recherche d'une expertise en mathématique et informatique. Il est membre du réseau "Modélisation, Simulation et Optimisation" (MSO) animé par l'AMIES.

Mission et stratégie

Eureka a pour mission de faciliter cette recherche d'expertise en orientant les entreprises vers des équipes de l'Institut de Mathématiques de Marseille (I2M) et du Laboratoire d'Informatique et des Systèmes (LIS) ayant l'expertise appropriée pour répondre à leur demande. Au sein d'Eureka, une équipe de 8 personnes (l'*équipe experte*) a été constituée. Celle-ci accompagne l'entreprise dans la mise en relation avec des chercheurs des laboratoires de mathématiques et d'informatique pouvant répondre à sa demande. Concrètement, l'entreprise intéressée formule sa demande, en écrivant un email à l'adresse de contact : institut-archimede-eureka@univ-amu.fr. La première étape est alors d'analyser la demande. Pour cela, il s'agit de voir quelle personne au LIS ou à l'I2M serait capable de répondre à la demande de l'entreprise. Ce travail est fait par un ou deux membres de l'équipe experte. Une réponse est alors apportée à l'entreprise (au plus tard 3 semaines après la demande initiale) avec une possible mise en relation. Afin de faciliter la communication, une page web destinée aux entreprises et hebergée par l'Institut Archimède a été créée et donne les étapes de fonctionnement prévues : https://labex-archimede.univ-amu.fr/fr/pages/eureka.html. Eureka est aussi en lien avec la Cité de l'innovation et des savoirs de Marseille (CISAM), qui a pour mission d'accélérer les échanges entre industriels et laboratoires de recherche de l'université.

La journée à Marseille

Bénéficiant du soutien de l'AMIES et du CNRS pour des journées IA-Entreprises en 2021, nous avons inauguré Eureka le 6 décembre 2021 au Riality Lab, espace dédié à l'intelligence artificielle, au coeur du Palais de la Bourse, à La Canebière https://www.mathconf.org/ciae-marseille2021. Cette journée a rassemblé un public académique et industriel, avec une grande partie étudiante (les M2 Data Science et CEPS de Marseille).

Equipe organisatrice : Michel Mehrenberger (I2M), Jean-Marc Freyermuth (I2M), Cécile Capponi (LIS), Frédéric Richard (I2M).

Eureka et les MSO

Outre la présentation d"Eureka (par son directeur, Frédéric Richard) et d'AMIES (par sa directrice, Véronique Maume Deschamps), nous avons aussi eu la chance d'avoir des présentations (en visio) de membres du réseau MSO : SUMMIT (par son directeur, Stéphane Labbé) et CEMOSIS (par son directeur, Christophe Prud'homme). Ces exposés ont permis de se faire une idée des solutions proposées dans d'autres laboratoires et universités et de voir où Eureka se situe.

Ainsi, on retrouve, même si ce n'est pas à la même échelle, la recherche d'expertise et la communication, via les sites web, plateforme et les liens avec des structures de valorisation. Un autre point fort est l'interdisciplinarité, aussi présente pour Eureka, qui regroupe la communauté mathématique et informatique.

Pour pouvoir mener des projets, des moyens et en particulier des moyens humains sont essentiels. Outre les enseignants chercheurs des laboratoires, Eureka pourra mettre à contribution des étudiants de master en stage ou en alternance, ainsi que des doctorants. Enfin, un dernier aspect à prendre en compte est la mise en place du cadre juridique et financier, suivant le type de collaboration envisagée. Pour cela, Eureka s'appuie sur la SATT Sud Est et Protis Valor.

Conférences sur l'IA

Cette journée a aussi été l'occasion d'exposés sur l'intelligence artificielle (IA), en lien avec les entreprises. A titre d'exemple, nous avons d'ailleurs été contacté pour Eureka, par la start-up meteoptim, dans le domaine de l'IA pour le photovoltaïque.

Tout d'abord, Marianne Clausel (IECL, Université de Lorraine) a donné un exposé le matin intitulé *Interactions Mathématiques Entreprises sur le thème de l'IA, la plus value de l'analyse statistique*, avec en particulier une application à la prédiction de l'énergie éolienne dans un parc éolien.

Après un très bon buffet (heureusement autorisé, malgré les conditions sanitaires), l'après-midi a été dédiée à des présentations d'entreprises : Saint Gobain Recherche Provence (minimiser les défauts dans la fabrication de pièces, par Jean-Michel Drouin et Yassir Elhousni) S4M (optimisation pour la publicité, par Vincent Archer), Résurgences (recherche en sciences sociales, par Samuel Tronçon), Euranova (IA en Région PACA, par Antoine Bonnefoy, Guillaume Stempfel et Juliette Spinatto).

À propos du conseil scientifique de l'Insmi

par :
Rémi Carles

1 Rôle et fonctionnement du CSI

Le but de ce texte est de présenter le rôle et le fonctionnement du conseil scientifique de l'Insmi, et de mettre en avant quelques uns de ses travaux.

Le comité national de la recherche scientifique (CoNRS) est surtout connu au sein de la communauté pour la section 41 (anciennement numérotée 01, jusqu'en 2012) et pour la commission interdisciplinaire (CID) 51 (interactions avec la biologie), qui s'occupent notamment du recrutement des chercheurs CNRS en tant que jury d'admissibilté, et plus généralement de l'évaluation scientifique pour les mathématiques au CNRS. Il existe deux autres entités au sein du CoNRS : le conseil scientifique du CNRS, et les dix conseils scientifiques d'institut (CSI, un par institut du CNRS). L'existence de ces conseils scientifiques d'institut est relativement récente, évidemment liée à la création d'instituts au sein du CNRS, il y a un peu plus de dix ans.

Comme son nom l'indique, le rôle du CSI de l'Insmi est de conseiller : ses prises de position n'engagent ni l'Insmi, ni le CNRS. Les deux moyens de communication officiels du CSI sont les recommandations qu'il rédige et vote, et le rapport de prospective qu'il remet en fin de mandat. Le CSI peut être invité par la direction de l'institut à analyser des questions précises, et se saisit par ailleurs des questions de son choix.

Le CSI se réunit au moins deux fois par an pour des raisons statutaires :

- vers la fin du mois de septembre, pour évaluer d'éventuelles divergences entre section(s) du CoNRS et institut concernant la création ou la suppression d'unités ;
- vers la fin du mois de janvier, pour se prononcer sur une partie (membres nommés par l'institut) de la composition du jury d'admission CR de l'Insmi.

Le CSI actuel choisit de se réunir une troisième fois dans l'année vers la fin du mois de juin. Généralement, les matinées sont consacrées à des discussions entre la direction de l'Insmi et le CSI, et les après-midi sont réservées à l'accueil d'intervenants extérieurs sur des thèmes décidés en bureau du CSI un mois avant la réunion.

Le CSI a mis en place une page web recensant les documents disponibles le concernant, regroupant les recommandations, les ordres du jour des réunions avec les documents de présentation des intervenants, et les rapports de prospective des mandatures précédentes :

`https://csi.math.cnrs.fr/`

Pour informer la communauté mathématique, le CSI utilise plusieurs canaux :

- envoi de textes via la liste de diffusion mathdir : le directeur de l'Insmi transmet un message aux directions des unités (DU) Insmi, en général pour diffusion au sein des laboratoires ;
- une lettre d'information du CSI, également transmise par le directeur de l'Insmi sur la liste mathdir pour diffusion au sein des laboratoires, et conservée sur le site du CSI (rubrique « Lettre »), dont nous reprenons ici une partie du texte (une seule lettre a pour le moment été envoyée, en mars 2021) ;
- les nouvelles recommandations sont systématiquement annoncées dans la lettre de l'Insmi.

La mandature actuelle (2019-2023) a voté des recommandations sur les sujets suivants :

- Soutien au projet de création d'un *Institut Mathématiques de la Planète Terre* (5 juin 2019).
- Impact environnemental de l'activité des laboratoires (9 octobre 2019).
- Mise en disponibilité des doctorants et post-doctorants agrégés de mathématiques (4 février 2020).
- Dispositions de la LPPR (17 juin 2020).
- Code de bonne pratique dans la communauté mathématique (7 octobre 2020).
- Affichage par ordre de mérite des candidats admissibles sur le site des concours CNRS (16 mars 2021).
- Prise en compte de la médiation scientifique dans les évaluations (5 juillet 2021).

- Environnement (1er février 2022).

Depuis la rentrée 2021, le CSI a lancé plusieurs sondages concernant les carrières (EC-C, IT, doctorants, post-doctorants), dont les réponses seront analysées dans le rapport de prospective.

Nous détaillons ci-dessous le code de bonne pratique, une étude sur l'évolution des postes, et un sondage spécifique aux chercheurs CNRS.

2 Code de bonne pratique

Nous rappelons la recommandation votée par le conseil, concernant un Code de bonne pratique dans la communauté mathématique, inspiré du texte correspondant de l'EMS (European Mathematical Society), qui a vocation à prévenir les situations conflictuelles et, en cas de problème avéré, à servir de support pour saisir l'un des deux référents du CNRS – déontologie et intégrité scientifique. Leurs coordonnées sont rappelées à la suite du Code de bonne conduite. Le texte intégral est disponible sur le site du CSI, et en appendice du présent texte.

3 Évolution des postes EC en maths

Entre 2011 et 2020, le nombre de postes d'EC ouverts aux concours de recrutement a été divisé par deux, aussi bien en MCF qu'en PR, en section 25 qu'en section 26, comme on peut le voir sur le site Opération Postes par exemple,

`http://postes.smai.emath.fr/2021/OUTILS/bilans.php`

Soulignons toutefois que la baisse du nombre de postes aux concours n'est pas propre aux mathématiques, la plupart des sections CNU ont subi des pertes d'effectifs sur la même période. Malgré tout, la proportion d'EC dans les sections CNU 25 et 26, parmi le groupe 25-26-27, est passée de 62% en 1993, à 48% en 2018 ; sur l'ensemble des sections CNU, la proportion est passée de 7,7% en 1993 à 6,4% en 2018 (chiffres MESRI).

Nous avons préparé une carte[1] pour présenter de façon synthétique une partie des résultats d'une enquête faite par le CSI auprès des DU à propos de l'évolution des postes d'enseignants-chercheurs (uniquement EC) entre 2011 et 2020. Il est en fait difficile d'avoir des chiffres précis, pour différentes raisons (les postes

1. Lien court : `https://miniurl.be/r-413a`

gelés reviendront-ils ? Parfois on sait que non, parfois on n'est pas sûr), donc il faut considérer que la carte donne avant tout un ordre de grandeur.

https://framacarte.org/fr/map/evolution-des-postes-en-maths-sur-10-ans_93553

En survolant les sites, on a des chiffres bruts, qui sont détaillés par un clic. Nous avons mis la taille du laboratoire avec le nombre total EC+chercheurs. Si les chiffres doivent être corrigés, merci de nous envoyer les données.

Le code couleur :

- vert foncé : gain de postes,
- vert clair : maintien,
- jaune : perte $< 5\%$ du nombre de permanents,
- orange : $5\% \leq$ perte $< 10\%$,
- rouge : perte $\geq 10\%$.

Cette carte fait suite à une enquête lors de laquelle le CSI voulait essayer de comprendre si la culture de la mobilité (au moment des recrutements notamment) pénalisait la communauté mathématique : il ressort des chiffres collectés qu'en effet certains laboratoires sont pénalisés par cette pratique. Plus précisément, dans la majorité des laboratoires, la republication ou non d'un support semble indépendante de la raison associée à la vacance du poste (promotion, mutation, retraite, autre) : c'est souvent tout ou rien, selon vraisemblablement la santé financière des établissements concernés, et éventuellement leur politique scientifique (le seul critère de la pression en enseignements est parfois mis en avant pour justifier la non-republication d'un poste en mathématiques).

4 Les CR ne deviennent (pratiquement) plus PR

Il y a une vingtaine d'années, une large majorité des CR CNRS en mathématiques quittaient le CNRS pour devenir professeurs d'université en France. La situation a considérablement évolué, et très peu de CR deviennent désormais PR. Plusieurs explications peuvent être mises en avant (notamment la baisse du nombre de postes PR évoquée précédemment), et pour éviter des spéculations hasardeuses, le CSI a sondé directement les récents lauréats des concours DR en section 41, et en mathématiques pour la CID 51. Nous avons choisi les concours de la période 2015-2021, ce qui correspond à un peu moins de cinquante collègues. Les réponses des actuels CR seraient très intéressantes, mais évidemment souvent plus délicates à solliciter. Les questions étaient les suivantes (les numéros ci-dessous sont là pour faciliter la lecture de la figure 2, et n'étaient pas affichés sur le questionnaire) :

- Avez-vous postulé sur un ou des concours PR ?
- Si oui, combien de fois ?
- Pourquoi être passé DR plutôt que PR ? Plusieurs réponses possibles.
    1. Concours PR n'ayant pas abouti.
    2. Pas de poste PR là où vous pourriez postuler pour des raisons thématiques.
    3. Pas de poste PR là où vous auriez souhaité aller. (La question peut porter sur un ensemble différent de la question précédente...)
    4. J'aurais candidaté PR au bout de quelques années si je n'avais pas été pris DR, mais j'ai été recruté DR suffisamment rapidement.
    5. Je n'aurais jamais candidaté PR, quitte à rester CR toute ma vie.
    6. Un poste au CNRS n'a pas les mêmes contraintes d'emploi du temps, et permet d'assister très facilement à des conférences ou semestres thématiques.
    7. Un poste au CNRS permet de choisir son affectation, et changer facilement d'affectation si besoin.
    8. Le volume d'enseignement en tant que PR est rédhibitoire.
    9. Dégradation des conditions d'enseignement.
    10. Les responsabilités liées au poste de PR (autres que la recherche, la préparation des cours et l'enseignement à proprement parler) sont trop nombreuses.
    11. Autre, merci de préciser :

Nous avons recueilli 38 réponses, parmi lesquelles 9 mentionnaient une ou plusieurs candidatures PR (de 1 à 5 candidatures), voir figure 1. La répartition des réponses, parmi les 11 possibles, à la question « Pourquoi être passé DR plutôt que PR ? » apparaît en figure 2. Le choix de l'affectation recueille le plus grand nombre de suffrages, suivi par la plus grande flexibilité d'emploi du temps (la notion de liberté est souvent mentionnée autour de ces deux points). La possibilité de choisir (essentiellement) son affectation ressort également dans les commentaires, en raison des contraintes familiales (emploi du conjoint, notamment). La politique de non-recrutement local pèse dans certains choix (un poste DR permet de revenir sur place après quelques années, ce qui est délicat en PR). L'aspect de l'interdisciplinarité est également mis en avant : il y a très peu de

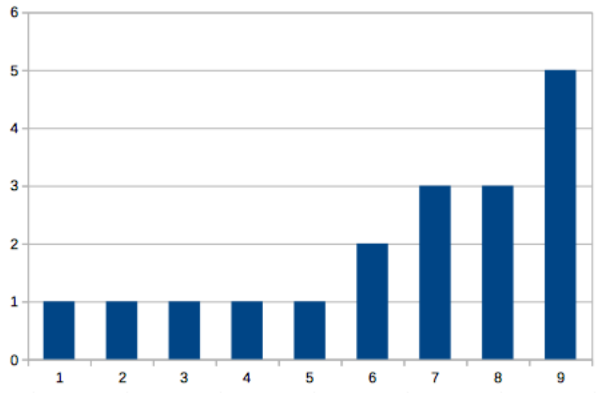


FIGURE 1 — *Nombre de candidatures PR.*

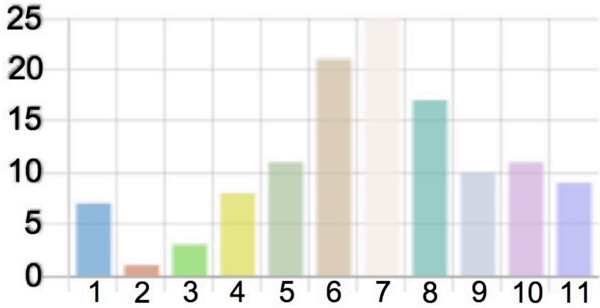


FIGURE 2 — *Passer DR plutôt que PR.*

postes PR affichant un profil recherche à l'interdisciplinarité, alors que la CID est faite pour cela côté CNRS.

Le volume d'enseignement en tant que PR apparait comme la troisième raison. Le fait d'enseigner un peu (64h ETD) ne semble pas poser de problème, mais 192h représente un volume trop important pour ceux qui évoquent cet aspect. Les commentaires font apparaitre que la dégradation des conditions de travail du côté de l'université a un rôle dissuasif important (aspects administratifs, responsabilités de filières), singulièrement pour les femmes. Il n'y a pas de réticences à prendre des responsabilités en termes d'animation de la recherche (ne consistant pas seulement à encadrer des doctorants ou post-doctorants), point auquel la section (jury d'admissibilité) et la direction de l'Insmi (au moment de l'admission) veillent depuis plusieurs années lors du passage DR.

Soulignons que dans le cas de deux réponses, les collègues ont postulé PR et ont répondu « non » à toutes les questions sauf la question numérotée 1.

COMITE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Conseil scientifique de l'Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions (INSMI)

Code de bonne pratique
dans la communauté mathématique

Selon la loi 83-634 du 13 juillet 1983 portant droits et obligations des fonctionnaires, toute personne relevant de la fonction publique doit respecter les règles de déontologie prévues par le chapitre IV de cette loi. L'article 28bis (du 20 avril 2016) de cette même loi instaure le droit de consulter un référent déontologue. Le décret du Conseil d'Etat 2017-519 (du 10 avril 2017) détermine les modalités de désignation des référents déontologues au sein de chaque établissement public. Depuis le 1er septembre 2018, Joël Moret-Bailly est le référent déontologue désigné par le CNRS. Le CNRS a également créé la fonction de référent intégrité scientifique, Rémy Mosseri occupe cette fonction depuis le 1er août 2018.

Le code suivant explicite les règles déontologiques recommandées par le Conseil Scientifique de l'INSMI pour la communauté mathématique.
Ce code reprend les dispositions du "Code of Practice" de la Société Européenne de Mathématiques qui souhaite le voir adopter par tous les mathématiciens et mathématiciennes, et éditeurs et éditrices de mathématiques. Les points I à IV en sont repris pour l'essentiel. Le point V a été ajouté par le Conseil Scientifique de l'INSMI. Par ailleurs, nous rappelons qu'en ce qui concerne le bon déroulement d'un doctorat, chaque université a une charte déontologique.
Les coordonnées des deux référents du CNRS sont données à la fin de ce code, ainsi qu'un lien décrivant leurs missions et leurs modalités d'actions. Nous donnons également le lien de la liste des signataires des chartes et des référents intégrité scientifique affichée par le Hcéres.

I - Responsabilités des auteurs et autrices

1 - Les auteurs et autrices doivent maintenir un haut niveau de comportement éthique, particulièrement en matière de publication et de diffusion de leur recherche. Dans leurs publications, l'attribution précise de chaque résultat utilisé ou cité et son référencement correct constituent des éléments de bonne conduite importants.

Il n'est pas contraire à l'éthique de se tromper dans l'attribution d'un résultat ou de la méconnaître, à condition que les auteurs et autrices se soient rigoureusement interrogés sur la nouveauté de leurs résultats et corrigent rapidement leurs erreurs d'attribution quand elles leurs sont signalées.
La publication de résultats de mathématiques comme étant les siens, alors qu'on a eu connaissance de ces résultats par d'autres personnes (à l'occasion d'une conversation, d'un exposé, de la lecture d'un écrit non formellement publié...) s'appelle du plagiat : cela constitue un grave manquement éthique et une forme de vol.

2 - Chaque cosignataire doit avoir contribué significativement au travail présenté dans une publication commune, et chaque personne ayant contribué significativement à ce travail doit être cosignataire. De plus, tous les cosignataires doivent accepter la responsabilité conjointe du manuscrit soumis et de sa publication finale. Soumettre et publier sans le consentement de l'ensemble de ses cosignataires constitue un manquement éthique.

3 - Les résultats de mathématiques sont pour la plupart publiés après un processus de soumission à des journaux ou des compte-rendus de conférences ou bien inclus dans la rédaction d'un livre. La responsabilité du contenu de la publication revient aux auteurs et autrices qui doivent s'assurer de la justesse de leurs travaux et de l'attribution correcte des résultats. Cette responsabilité implique l'obligation dans le temps de répondre avec diligence à des demandes fondées de précisions supplémentaires.

4 - En mathématique, soumettre simultanément à différentes revues ou publications un manuscrit présentant un même résultat nouveau constitue un manquement éthique. Publier un même résultat dans différentes revues ou publications sans en faire mention par des citations explicites constitue également un manquement. Les sites de dépôt de manuscrits tels que Arxiv ou Hal ne sont pas des publications.

5 - La traduction d'un travail publié ou non doit toujours citer clairement sa source.

6 - Les mathématiciens et mathématiciennes ne doivent pas faire l'annonce publique de nouveaux théorèmes ou de la résolution de problèmes de mathématiques sans être capables d'en fournir les preuves détaillées en un laps de temps court.

II - Responsabilités des éditeurs et éditrices et des revues

1 - Il est recommandé aux journaux publiant des mathématiques d'établir et de présenter clairement leur règles éthiques en précisant leurs responsabilités et le processus adopté en cas de suspicion ou de plainte pour manquement éthique.

Les journaux doivent alors répondre aux auteurs et autrices avec respect et diligence.

2 - Pour parvenir à prendre des décisions responsables et objectives, les éditeurs et éditrices doivent adopter un haut niveau éthique. Cela implique de se retirer en cas de conflit d'intérêts personnel, professionnel ou commercial, d'éviter d'abuser de leur position privilégiée pour infuencer le traitement de leurs propres articles ou ceux d'autres personnes, de ne pas exploiter des informations confidentielles.

3 - Le processus de soumission et de traitement des articles doit être affiché par chaque journal. Un article soumis doit recevoir un accusé de réception. Les éditeurs et éditrices doivent assurer le suivi du traitement d'une soumission, éviter tout retard excessif dans le processus d'évaluation et la prise de décision de publication, recueillir le consentement pour publication de la totalité des signataires d'un article ou d'une seule personne signataire agissant au nom de toutes les autres. Les dates de soumission et de tout changement notable doivent apparaitre sur la publication, ceci est utile en cas de problème de priorité.

4 - Les journaux ont l'obligation de publier sous un format clair et précis et doivent notamment s'assurer que les symboles, mots et phrases mathématiques utilisés sont clairs et ne représentent pas un obstacle à la compréhension. Publier des travaux mal rédigés sans demande d'amélioration à l'auteur constitue un manquement éthique.

5 - Les éditeurs et éditrices doivent considérer avec soin et objectivité toute soumission. Normalement cela doit être fait sur la base d'évaluations par des rapporteurs et rapporteures appropriés, mais si le travail soumis est en-dehors du périmètre de la revue ou est manifestement en-dessous du niveau exigé par la revue, les éditeurs et éditrices peuvent se passer de ces évaluations et en décider le rejet. Les auteurs et autrices doivent alors être informés, rapidement et courtoisement, du rejet motivé.

6 - Les éditeurs et éditrices doivent informer les auteurs et autrices des décisions prises toujours de façon courtoise, diligente et constructive en s'appuyant sur les informations fournies par les évaluations. Il n'est pas nécessaire de communiquer l'intégralité de ces informations.

7 - En cas d'erreur importante constatée par un auteur ou une autrice dans un travail publié, les éditeurs et éditrices doivent lui permettre de publier une correction ou une rétractation.

8 - En cas d'erreur importante constatée par un lecteur ou une lectrice, les éditeurs et éditrices doivent réagir de façon réfléchie et demander au signataire du papier en cas de confirmation de l'erreur de publier une correction ou une

rétractation.

9 - Les éditeurs et éditrices constatant un cas de plagiat dans un travail publié par leur journal, doivent demander aux signataires de soumettre pour publication une rétractation subtancielle. A défaut, les éditeurs et éditrices doivent publier au nom de la revue une information décrivant le plagiat.

10 - La version en ligne d'un article problématique doit être maintenue s'il peut en paraître ultérieurement une version corrigée. Sinon la version problématique peut être suprimée en ligne à la demande des signataires de l'article ou sur décision des éditeurs, avec en remplacement l'information du retrait.

11 - Une personne ne peut être présentée comme membre du comité éditorial d'une revue sans son consentement. Si une personne démissionne d'un comité éditorial, son nom doit être rapidement supprimé de la liste affichée par la revue.

12 - Toute personne membre d'un comité éditorial est censée connaître l'éthique de son journal et y adhérer, et éventuellement réagir en cas de constatation de manquement par une autre personne de l'équipe éditoriale.

III - Responsabilités des rapporteurs et rapporteures sollicités par un comité éditorial

1 - Pour parvenir à formuler des recommandations responsables et objectives, les rapporteurs et rapporteures doivent adopter un haut niveau éthique. Leur mission est de chercher à évaluer la justesse, la nouveauté, la clarté et l'importance du manuscrit soumis. Néanmoins, le travail publié est de la responsabilité des signataires.

2 - Avant d'accepter un travail d'évaluation, les rapporteurs et rapporteures doivent s'interroger sur de potentiels conflits d'intérêts. En situation de conflit d'intérêts, les rapporteurs et rapporteures doivent en avertir leur contact au comité éditorial et ne peuvent poursuivre leur tâche sans son accord.

3 - Une fois la tâche acceptée, les rapporteurs et rapporteures doivent l'exécuter en un temps raisonnable.

4 - Les rapporteurs et rapporteures ne doivent pas utiliser les informations privilégiées contenues dans l'article à évaluer.

5 - Les rapporteurs et rapporteures qui suspectent des éléments de plagiat dans le manuscrit à évaluer ou tout autre manquement éthique doivent en avertir rapidement leur contact au sein du comité éditorial.

IV - Responsabilités des utilisateurs et utilisatrices de données bibliométriques

1 - Quel qu'en soit le but (une dotation, un prix, une promotion...), il est irresponsable de la part d'une institution ou d'un comité d'évaluer la qualité de recherches en mathématiques d'une équipe ou d'un individu sur la base exclusive de données bibliométriques.

2 - Citer des références inutiles en vue d'augmenter leurs indices de citation est un manquement éthique.

3 - Si un journal modifie des données bibliométriques à son avantage, il déroge à l'éthique.

V - Responsabilité individuelle et rôle des directeurs et directrices d'unité, d'équipe, des organisateurs et organisatrices de groupes de travail, de colloques ou de tout événement

Dans une unité de recherche ou le temps d'un événement, il revient à toute personne participant à la vie d'un groupe de mathématiciens et mathématiciennes, et particulièrement à leurs responsables, de s'efforcer de contrôler les dérives de comportement nuisibles à l'épanouissement, l'échange et la créativité, telles que :

- dénigrer ou remettre en question les compétences en mathématiques d'une personne,
- colporter une rumeur,
- laisser agir des préjugés de tous ordres (de genre, de réseau, d'affinité, etc.),
- se croire propriétaire d'un problème de mathématique,

cette liste n'étant pas exhaustive.
Que ce soit pour un événement ou dans les différentes structures, il convient de s'assurer dans la mesure du possible que la communauté mathématique soit bien représentée dans sa diversité.

Éthique, déontologie et intégrité scientifique au CNRS

http://www.cnrs.fr/fr/ethique-deontologie-integrite-scientifique-et-lancement-dalerte

Référent déontologie au CNRS : Joël Moret-Bailly - joel.moret-bailly@cnrs.fr

Référent intégrité scientifique au CNRS : Rémy Mosseri - remy.mosseri@cnrs.fr

Référents scientifiques dans les établissements d'enseignement supérieur

https://www.hceres.fr/fr/liste-des-signataires-des-chartes-et-des-referents-integrite-scientifique

Les écoles d'ingénieurs à composante mathématiques importante : épisode 3

par :

Olivier Lafitte *– Responsable de la rubrique « Du côté des écoles d'ingénieurs »*

Introduction

Voici la suite de notre série de textes sur les écoles d'ingénieurs ayant une composante mathématique importante dans leurs cursus ou leurs débouchés, qui pourraient nous donner une idée de la diversité des méthodes employées par les écoles pour promouvoir (par exemple) une formation par la recherche, surtout en mathématiques appliquées. Ici, c'est au tour de l'ENSTA Paris.

La place importante des mathématiques appliquées à l'ENSTA Paris

par :

Sonia Fliss[1] — *ENSTA-UMA*
Frédéric Jean[2] — *ENSTA-UMA*

La recherche et développement : un des débouchés les plus importants de l'école

Marie T. effectue un post-doctorat sur la modélisation des méta-matériaux à l'université de Manchester, Hugo G. est ingénieur RetD dans le nucléaire chez Framatome, Pierre B. est ingénieur dans les systèmes de navigation des lanceurs pour Ariane Group, Nastassia P. est Chargée de Recherche Inria, tout comme Benoit B. qui l'est au CNRS. Damien M. est ingénieur R et D et analyste de données chez Naval Group, Hadrien G. est ingénieur en optimisation chez Artelys, Ismail L. fait de l'analyse de risques chez Zeliade et Anthony L. de l'analyse en solutions d'investissement dans la Banque Lombard Odier. Morgane S., Alexandre G., Mathieu B., Pierre A., Armand T. et Siwar B. font tous des thèses de mathématiques appliquées dans des laboratoires de l'Inria, de l'Ecole des Ponts, de l'Ecole des Mines, de l'Université de Paris ou d'ENSTA Paris. Tous sont d'anciens étudiants ENSTA Paris diplômés depuis moins de 5 ans qui occupent des postes liés aux mathématiques dans le milieu académique ou le secteur privé.

Au total c'est presque 30% de chaque promotion qui choisit un cursus spécialisé en mathématiques appliquées. En outre la plupart d'entre eux complètent cette formation par une thèse. En effet sur les plus de 25% d'élèves ingénieurs ENSTA Paris qui poursuivent en doctorat (un pourcentage élevé pour une école d'ingénieurs), la grande majorité vient des cursus de mathématiques appliquées.

1. sonia.fliss@ensta-paris.fr
2. frederic.jean@ensta-paris.fr

Les mathématiques dans le cursus ENSTA Paris : une histoire en mouvement

Pourquoi les mathématiques tiennent une place aussi singulière dans la formation d'ENSTA Paris ? Remontons à la fin du siècle dernier (ce n'est pas si loin !). Pendant les années 90, alors que la mode était au conseil et au management, ENSTA Paris fait le choix d'afficher une formation scientifique et technique forte. L'organisation de l'école en unités intégrant enseignement et recherche, là où d'autres séparent laboratoires et départements, doit permettre de garantir le niveau de cette formation. De façon concomitante, Marc Lenoir, DR CNRS, crée en 1998 l'Unité de Mathématiques Appliquées (UMA) en agglomérant autour du Laboratoire de Simulation et Modélisation des phénomènes de Propagation (unité associée à la section 9 du CNRS), les mathématiciens éparpillés ici et là à ENSTA Paris, l'unité se développant ensuite sous la direction d'éric Lunéville. L'implication de l'UMA, conjuguée à la volonté de l'école d'avoir une formation scientifique de haut niveau, va conduire à restructurer l'enseignement des mathématiques et à lui donner une part de plus en plus grande. Dès 1998, le nombre d'heures de cours de maths en 1ère année est multiplié par trois puis, en 2001, l'école ouvre la possibilité de commencer à se spécialiser en ingénierie mathématique à partir de la 2ème année du cycle ingénieur, des accords étant passés avec des masters (DEA à l'époque) d'universités parisiennes pour la 3ème année. Le déménagement d'ENSTA Paris sur le plateau de Saclay en 2012 marque un tournant important par les possibilités de coopérations qu'il ouvre. Grâce à la collaboration avec les mathématiciens d'Orsay, la voie de spécialisation de 2ème année en ingénierie mathématique est considérablement renforcée et devient en 2014 un M1 Mathématiques Appliquées coopéré par l'université Paris Sud et ENSTA Paris. Dans le même temps l'implication de l'école dans la naissante Université Paris Saclay (UPSay) permet de construire à partir de 2015 des parcours de 3ème année étroitement associés aux M2 de mathématiques appliquées du plateau. Cette structuration, à la fois en M1 et en M2, a un peu évolué dans son contenu mais est toujours celle d'aujourd'hui.

Revenons justement à la situation d'aujourd'hui et à la place qu'occupent les mathématiques à ENSTA Paris avec une description de l'offre de cours dans le cycle ingénieur (nous nous limiterons à ce cycle même si d'autres programmes existent, comme la formation par apprentissage ou les mastères spécialisés).

La première année de l'école (niveau Bac+3) est constituée, pour les enseignements scientifiques, d'un tronc commun d'environ 450h, dont 170h de cours de mathématiques. Ces cours ont deux objectifs. Le premier est de donner les outils mathématiques utiles à tout ingénieur, les bases de la modélisation et les principales théories et méthodes de résolution. Le deuxième est de délivrer toutes les connaissances qui permettent aux étudiants qui le souhaitent de suivre ultérieurement l'équivalent d'un master de mathématiques appliquées, nous y reviendrons. En attendant, à la fin de la première année, tous les étudiants ont des notions d'analyse des EDPs et de leur discrétisation, de probabilités et de statistiques, mais aussi de systèmes dynamiques, d'analyse complexe et d'optimisation. Insistons sur le fait que ce sont là des cours introductifs qui sont assez brefs (de 20h à 40h suivant les thématiques), au moins de notre point de vue... (certains étudiants les trouvent sûrement beaucoup trop longs !). Au second semestre de cette première année, ENSTA Paris propose, et c'est une spécificité de l'école il nous semble, des enseignements thématiques, au choix, qui permettent de compléter le tronc commun par une formation approfondie sur des sujets scientifiques très pointus. En particulier, pour les étudiants que les mathématiques intéressent, un enseignement regroupe sur plus de 50h de cours à la fois de la théorie de la mesure et de la géométrie différentielle.

En deuxième année, les étudiants doivent choisir une majeure parmi trois, les STIC, les Mathématiques appliquées et la Mécanique. Comme évoqué plus haut, un tiers de la promotion choisit la majeure de maths. Dans chaque majeure, des mineures encore au choix sont proposées et permettent d'approfondir une spécialisation ou d'apporter une double compétence. Un étudiant ayant choisi la majeure Maths complétée par la mineure Maths n'aura ainsi suivi que des enseignements liés aux mathématiques pendant sa 2ème année (≃ 340h), ce qui lui permet de valider le parcours de M1 de Mathématiques appliquées coopéré par l'Institut Polytechnique de Paris (IP Paris) et l'Université Paris Saclay. En effet cette combinaison majeure/mineure maths forme l'ensemble des cours de ce M1, qui sont délivrés conjointement par des enseignants d'ENSTA Paris et de la Faculté d'Orsay et sont donc suivis à la fois par des élèves-ingénieurs ENSTA Paris et des étudiants de l'université. La caractéristique principale de ce M1 est son large spectre puisqu'il allie déterministe et aléatoire, discret et continu, dimension finie et dimension infinie, théorie et applications. Une deuxième caractéristique, plus classique en mathématiques appliquées, est la part importante du numérique, que ce soit sur la conception de méthodes ou sur leur implémentation, avec de nombreux projets durant l'année. Sans rentrer dans les détails et être trop exhaustif, mentionnons parmi les sujets abordés dans ces cours l'analyse numérique et l'analyse fonctionnelle, la théorie du contrôle, l'optimisation et la recherche opérationnelle, les processus aléatoires et les statistiques, les sciences des données.

Cette 2ème année se termine par un stage d'initiation à la recherche d'environ 3 mois en moyenne (2 mois au minimum), qui doit obligatoirement avoir lieu dans un laboratoire de recherche, très souvent à l'étranger (du moins quand aucun virus ne vient perturber les déplacements...). De plus en plus d'étudiants effectuent ensuite une césure d'un an, souvent en tant qu'ingénieur de recherche dans un laboratoire académique, quelques-uns mettant à profit cette interruption d'études pour suivre une préparation à l'agrégation de mathématiques.

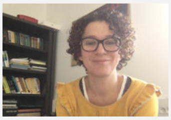
En 3ème année, les étudiants se spécialisent... "enfin!" diraient-ils. En mathématiques appliquées nous leur proposons des parcours de spécialisation qui sont étroitement associés à des M2 IPParis, souvent eux-mêmes cohabilités avec d'autres établissements (UPSay surtout mais aussi CNAM, Ecole des Ponts, Université Paris 1, ...). En pratique cela signifie que la plupart des élèves suivent durant leur 3ème année un double cursus ENSTA / M2. Il y a quatre parcours :

- *Finance Quantitative* (avec ENSAE Paris), où prédominent analyse stochastique et méthodes statistiques et économétriques ;
- *Modélisation et Simulation*, avec de l'analyse des EDPs, du calcul scientifique et de la simulation numérique ;
- *Sciences de l'Optimisation et des Données*, sur les domaines en vogue de l'apprentissage et des sciences des données mais adossés à une compétence forte en optimisation, discrète ou continue ;
- *Mathématiques pour la Santé et l'Environnement*, formation transverse en mathématiques sur la modélisation des problèmes liés aux enjeux actuels d'environnement et de santé.

Conclusion

Ainsi ENSTA Paris forme, en mathématiques appliquées, à la fois des ingénieurs et des chercheurs, contribuant dans ce domaine au lien entre entreprises et recherche académique. Elle s'appuie pour cela sur l'expertise et le temps de ses enseignants-chercheurs mais aussi sur celle des nombreux chercheurs CNRS et Inria de l'UMA, très investis dans la formation, tous contribuant ainsi à maintenir la qualité scientifique des enseignements. Nous bénéficions également de l'environnement mathématique riche et foisonnant que propose le plateau de Saclay, avec l'Institut Polytechnique de Paris d'une part et l'Université Paris Saclay d'autre part, une communauté mathématique unie grâce au cadre commun que donnent la fondation Hadamard (FMJH) et l'école doctorale du même nom, l'EDMH, institutions qui permettent de faire le pont entre les mathématiciens de chaque côté de la N118.

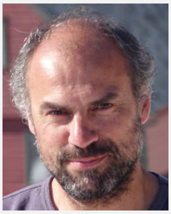
Sonia Fliss



Docteur en mathématiques appliquées depuis mai 2009, elle est actuellement professeure associée à l'ENSTA Paris, membre de l'Unité de Mathématiques appliquées et plus précisément du laboratoire POems (UMR 7231 CNRS-INRIA-ENSTA). Ses activités de recherche s'inscrivent dans l'analyse mathématique et numérique de phénomènes de propagation d'ondes, notamment en présence de milieux complexes.

Email : sonia.fliss@ensta-paris.fr
Site web : https://perso.ensta-paris.fr/~fliss/

Frédéric Jean



Depuis son doctorat de Mathématiques à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), en 1998, il est professeur dans le groupe Optimisation et Commande de l'Unité de Mathématiques Appliquées (UMA) de l'ENSTA Paris. Frédéric Jean est actuellement directeur de l'UMA. Ses activités de recherche s'inscrivent dans le contexte de la théorie du contrôle non-linéaire, et plus précisément du contrôle géométrique.

Email : frederic.jean@ensta-paris.fr
Site web : https://uma.ensta-paris.fr/~fjean

Roland GLOWINSKI : 1938-2022

par :

Philippe Ciarlet — Professeur à City University of Hong Kong et Professeur émérite à Sorbonne Université

William Fitzgibbon — Professeur à Houston University, Texas

Olivier Pironneau — Professeur émérite à Sorbonne Université

Roland Glowinski, Professeur émérite à l'Université Pierre et Marie Curie et "Cullen Professor" à l'Université de Houston, Texas, est décédé subitement le 26 janvier 2022, à l'age de 84 ans.

Mathématicien appliqué mondialement connu pour ses travaux, Roland était membre de l'Académie des Sciences, de l'Académie des Technologies, de l'Academia Europea, SIAM Fellow, AMS Fellow, Chevalier de la Légion d'honneur, Officier de l'Ordre des palmes académiques, et Officier de l'Ordre du Mérite National. Au cours de sa carrière, Roland a reçu de nombreuses récompenses prestigieuses dont : la Médaille d'Argent de la Ville de Paris, le Prix Seymour Cray, le Grand Prix Marcel Dassault, le Prix SIAM Theodore Von Kármán, le Computational Fluid Dynamics Award de l'American Association for Computational Mechanics, et tout dernièrement, le prix W.T. and Idalia Reid de SIAM. Il avait été également nommé Professeur Honoraire à l'Université de Jyväskylä.

Le thème central de son activité mathématique était l'approche variationnelle pour la résolution de problèmes modélisés par des équations et inéquations aux dérivées partielles, ces problèmes étant liés à des applications issues de la mécanique, de la physique, des sciences de l'ingénieur, et des sciences du vivant. Roland associait une curiosité sans limites et une patience et une volonté d'écoute remarquables à une capacité naturelle d'adaptation à un vaste éventail de disciplines scientifiques et d'ingénierie. Au cours de sa carrière, il a écrit 10 livres et plus de 450 articles scientifiques, et a siégé dans de nombreux comités de rédaction. Il aimait aussi beaucoup son rôle de directeur scientifique auprès de ses nombreux étudiants et post doctorants, prenant grand plaisir à suivre ensuite l'évolution de leur carrière.

Roland était un homme très attachant, généreux, aimant la vie, très à l'écoute des autres, très perspicace et très optimiste, même s'il s'inquiétait souvent de la résurgence de l'antisémitisme. Sa personnalité, très bien résumée par l'expression anglaise : "a charming man", lui a permis de se constituer un impressionnant réseau de collègues et amis.

Roland est né à Paris en mars 1937, fils d'immigrés d'Europe de l'Est. Comme on sait, les années difficiles de la Seconde Guerre Mondiale ont été tragiques pour les juifs. Heureusement, Roland et son frère Albert ont fait partie des légions d'enfants d'origine juive protégés par des Français. C'est ainsi que Roland et Albert ont vécu chez la famille Botineau à Sargé-sur-Braye dans le Loir et Cher jusqu'en 1944, où la libération de la France par les forces alliées a permis leur retour à Paris. Cette période a profondément influencé Roland et est en partie responsable du sens de l'humanité qu'il a conservé toute sa vie. À son retour à Paris, Roland s'est inscrit à l'école primaire où il démontre un talent précoce dans divers domaines, notamment les mathématiques, les sciences en général, l'histoire, la géographie, et l'éducation civique. Roland réussit ensuite le concours d'entrée au Lycée Charlemagne en 1948, puis celui de l'École Polytechnique en 1958, après quoi il choisit de se spécialiser dans les télécommunications. Après avoir obtenu son diplôme de l'Ecole Polytechnique, Roland a servi comme officier français pendant la guerre d'Algérie.

À la fin de son service militaire, Roland obtient un poste à l'Office de Radio et Télévision Française (ORTF) de 1963 à 1968, mais rapidement les mathématiques lui manquent. En conséquence, il s'inscrit à un cours par correspondance menant à une maîtrise en mathématiques pures et appliquées. Roland s'inscrit ensuite au Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) d'Analyse Numérique sous la direction de Jacques-Louis Lions et René de Possel. Étant donné la qualité de ses travaux de DEA, Jacques-Louis Lions lui a fait intégrer l'Institut de Recherche en Informatique et Automatique (IRIA ,aujourd'hui INRIA) en tant qu'Ingénieur de Recherche. En 1970, Roland a soutenu sa thèse d'État à l'Université Pierre et Marie Curie sous la direction de J-L. Lions. Sa thèse traitait de la résolution d'équations intégrales non linéaires pour filtrer la transmission de la télévision en couleur. Après l'obtention de son diplôme, Roland enseigne à l'Université Paris VI et devient Directeur Scientifique à l'IRIA.

Roland avait un don rare pour savoir comment interagir avec les industriels. Dès cette époque, il conseillait Dassault Aviation, la SAGEM, IFP, Shell, EDF, la compagnie de téléphone CNET, etc. En 1985, Roland accepte la prestigieuse ”Cullen Chair” de Professeur à l'Université de Houston, tout en restant en détachement de l'Université Pierre et Marie Curie jusqu'en 2000. Il a été professeur invité, professeur auxiliaire, ou conseiller, dans de nombreuses institutions à travers le monde, notamment l'Université Fudan, le California Institute of Technology, l'Université Rice, l'Université Ben Gourion à Beer Sheva, l'Université de Jyväskylä, l'École Polytechnique, l'Université du Tennessee à Knoxville, l'Université des Sciences et Technologies de Hong Kong, et l'Université Baptiste de Hong Kong. Au cours de la période 1992-1994, Roland a été Directeur du Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS) à Toulouse.

Les travaux scientifiques de Roland Glowinski peuvent être classés en trois grandes catégories :

- La résolution numérique d'équations aux dérivées partielles issues de la mécanique, de la physique, et des sciences de l'ingénieur ;
- conception et le contrôle optimal de systèmes régis par des systèmes d'équations aux dérivées partielles, ou bien issus de méthodes de moindres carrés pour des équations aux dérivées partielles non-linéaires ;
- Les méthode de décomposition de domaines et de domaines fictifs.

Plus précisément et chronologiquement, les recherches de Roland ont d'abord porté sur plusieurs méthodes itératives pour les fluides viscoélastiques. Ce travail est basé sur une formulation par inéquations variationnelles et sur une résolution par la méthode du lagrangien augmenté, permettant ainsi de traiter des frontières libres sans s'y référer explicitement. C'est le sujet de son premier livre, comme co-auteur, surnommé le ”GLT”, pour ”Glowinksi-Lions-Trémolières”. Il écrira huit ans plus tard un livre avec Patrick LeTallec sur ces mêmes techniques adaptées à la méthode des pas fractionnaires. Roland a ensuite apporté des contributions majeures sur les thèmes suivants :

- Une méthode rapide pour le problème biharmonique. Roland Glowinski a été le premier à donner une formulation mixte utilisable avec des éléments finis de faibles degrés, qui étaient à l'époque les méthodes les plus rapides pour le calcul des écoulements visqueux. Ces méthodes ont été mises en œuvre chez Dassault Aviation pour une formulation en vorticité fonction de courant des écoulements de l'aérodynamique.
- Une méthode numérique stable pour la condition d'entropie des fluides compressibles potentiels résolue par moindres carrés variationnels. Tou-

jours dans le cadre de la coopération scientifique entre l'IRIA et Dassault en 1980 figure une première mondiale : la simulation d'écoulement potentiel compressible pour un avion entier par la méthode des éléments finis.

- Plusieurs préconditionneurs robustes pour les équations de Navier-Stokes discrétisées par la méthode des éléments finis. Dans son livre « Méthodes Numériques pour les Problèmes Variationnels Non Linéaires », Roland Glowinski a proposé des algorithmes itératifs (gradients conjugués) avec préconditionnement pour le problème de Stokes généralisé, ouvrant ainsi la voie au calcul intensif moderne tel qu'il est pratiqué actuellement pour ces mêmes équations.
- Les principaux algorithmes de décomposition de domaine actuellement utilisés. Il est le premier à avoir compris le lien entre les algorithmes de Schwarz, les multiplicateurs de Lagrange, et les méthodes sans recouvrement de domaine. Il est aussi le premier à avoir utilisé le formalisme des formulations mixtes pour ces problèmes. À cette époque, il a créé la célèbre conférence annuelle "DDM" (Domain Decomposition Methods).
- Des algorithmes pour les méthodes de domaines fictifs en formulation lagrangienne. Avec le même succès, Roland a repris les idées développées en URSS sur les domaines fictifs et les a analysées dans un cadre fonctionnel approprié. Il a ensuite proposé des méthodes de discrétisation par éléments finis afin de résoudre efficacement des problèmes avec des géométries dépendantes du temps sur un seul maillage fixe.
- Une caractérisation de la contrôlabilité approchée pour les problèmes hyperboliques. Roland Glowinski a proposé plusieurs implémentations de la célèbre méthode HUM (Hilbert Uniqueness Method) de J.-L. Lions, notamment pour le calcul des solutions périodiques des équations de Maxwell en formulation fréquentielle.
- Une formulation mixte pour les problèmes de fluide-structure. Travaillant sur le problème de la réduction de viscosité pour les oléoducs, Roland Glowinski et son équipe ont résolu le problème très difficile de la simulation d'écoulements stabilisés par plusieurs milliers de billes solides en suspension dans un liquide en dimension trois, par des méthodes de maillage non structuré.

Roland Glowinski était encore en pleine activité scientifique au moment de sa disparition, et ses articles les plus récents montrent comment étendre les méthodes stables utilisées sur les équations de Navier-Stokes aux fluides de Oldroyd et au problème de Monge-Ampère.

Il laisse dans le deuil son épouse Angela, qui fut un soutien et un conseil de tous les instants pendant leurs 58 ans de mariage, ainsi que son frère Albert, ses filles Anne et Tania , ses petits-enfants Jacques, Théo et Sammy Fehr, Joshua et Eliora Glowinski Gonzalez, ses gendres Jim Fehr et Juan Gonzalez et ses neveux Julien et François Glowinski, et bien sûr aussi, tous ses amis, anciens étudiants, anciens collègues et collaborateurs scientifiques.

Dominique Lépingle : 1943-2021

par :

Aline Bonami
Emmanuel Cépa
Anne Estrade
Sandrine Lagaize
Christine Marois
Monique Pontier
Marguerite Zani

Dominique Lépingle est mort le 24 décembre, à quelques jours de son soixante-dix-huitième anniversaire. Il était professeur émérite à l'université d'Orléans, où il avait effectué toute sa carrière. Nous souhaitons lui rendre hommage dans ces quelques lignes, où des témoignages succéderont à quelques éléments biographiques et une brève description de ses travaux.

Quelques éléments biographiques

Né dans une famille orléanaise, Dominique ne s'est éloigné d'Orléans que quelques années, d'abord pour aller en classes préparatoires au lycée Louis-Le-Grand, puis pour passer 4 ans à l'école normale supérieure. Il revint à Orléans comme assistant puis maître assistant à la rentrée de 1966. L'université venait tout juste d'y être créée, succédant à un Collège Scientifique Universitaire qui dépendait de la faculté des lettres de Paris. Il y avait effectivement tout à créer dans cette université nouvelle, où les professeurs d'alors se succédaient rapidement. On comprend facilement qu'y faire de la recherche était difficile. Dominique, qui, comme normalien, avait hésité entre physique et maths, fréquentait comme beaucoup les séminaires parisiens, et trouva bientôt sa voie en calcul des probabilités. Celui-ci ne faisait pas partie du cursus classique d'alors à Paris, mais il fut intégré très tôt dans le cursus d'Orléans, et Dominique a joué, pendant toute sa carrière, un rôle central dans le développement des probabilités à l'université d'Orléans, autant en enseignement qu'en recherche.

Dominique a soutenu sa thèse d'état en 1978 à Orléans et est rapidement passé dans le corps des maîtres de conférences d'alors (correspondant aux professeurs de deuxième classe actuels). Il y avait dans ces années-là un séminaire hebdomadaire de probabilités dont il fut l'organisateur en même temps qu'un conférencier fréquent. Peu à peu la recherche prit de l'importance au sein du département de mathématiques dont il fut directeur à un moment clé, à la fin des années quatre-vingt. L'image du département de mathématiques au sein de l'université s'améliorait progressivement, ce dont il fut un des acteurs centraux. Elle mena à l'association au CNRS en 1994, qui ancra définitivement les mathématiques parmi les disciplines qui comptent au sein de l'université. Cette forte implication locale ne l'empêcha pas de continuer à participer régulièrement aux séminaires de probabilités parisiens et y développer des collaborations.

Il est impossible de ne pas parler des problèmes de santé de Dominique, qui l'ont préoccupé depuis son enfance, puisqu'enfant il avait subi une opération du cœur. Il en eut une autre à la fin des années quatre-vingt, suivie d'un long congé et de complications dans les années suivantes.

Dominique a œuvré constamment, et avec succès, pour que l'équipe de probabilités se renforce. Il a pris sa retraite en 2008. Une journée en son honneur a été organisée alors. Il a continué à venir régulièrement comme professeur émérite au département de mathématiques.

Dominique Lépingle et les probabilités

Ses premiers travaux portent sur les intégrales stochastiques à valeurs hilbertiennes, probablement sous l'influence du séminaire Maurey-Schwartz. Mais à partir de 1975 et pendant plus de 10 ans, c'est une série remarquable d'articles sur les inégalités de martingales qu'il produit. Ceux-ci sont publiés dans d'excellents journaux variés, mais aussi dans le Séminaire de probabilités de Strasbourg, où on trouve plus d'une dizaine de ses contributions durant cette période. Si son travail porte originellement sur l'adaptation aux martingales des inégalités obtenues en analyse réelle, et donc pour les martingales dyadiques, son intérêt dépasse largement ce cadre et s'ancre dans la théorie générale des processus et toutes ses subtilités. Pour ne citer qu'un exemple, et le plus cité, il faut parler de l'inégalité connue comme l'inégalité de Lépingle, qui porte sur les p-variations des martingales. Elle a été étendue par Pisier et Xu. Bourgain en a donné en 1989 une autre démonstration et s'en est servi pour démontrer des théorèmes ergodiques.

Les derniers travaux de cette période, obtenus en collaboration avec Paul-André Meyer et Marc Yor, portent sur les filtrations associées aux martingales. A partir des années 80, la curiosité de Dominique le porte à s'intéresser à des domaines très variés, dans lesquels il entraîne ses étudiant.e.s. S'il ne touche pas vraiment aux mathématiques financières, son article sur l'intégrabilité uniforme des martingales exponentielles y est largement cité. Il s'intéresse à la géométrie stochastique, ainsi qu'aux équations différentielles stochastiques réfléchies pour lesquelles il développe des méthodes numériques. Il écrit, en collaboration avec Nicolas Bouleau, un livre sur les méthodes numériques pour les processus stochastiques, comblant à cette époque un vide dans la littérature. Il se consacre ensuite à l'étude d'équations différentielles stochastiques non linéaires. En commun avec Emmanuel Cépa, il étudie en particulier des systèmes de particules en interaction. Ses derniers travaux, en partie communs avec Nizar Demni, permettent de faire le lien avec la théorie de Dunkl.

Au fil de ces quelques lignes, on voit comment la grande curiosité de Dominique a fait de lui un voyageur infatigable au travers des probabilités, et parfois un précurseur. Probabiliste, il l'était à sa manière, pleine de discrétion et de modestie. Il n'hésitait pas à accepter de travailler dans l'ombre. Un chiffre en témoigne, stupéfiant : il a fait 492 recensions pour les Mathematical Reviews !

Témoignages

Pour conclure cette note, voici le témoignage d'une collègue en poste à Orléans suivi des témoignages d'autres collègues dont il a été le « directeur » de thèse (et plus encore, les vocables de « guide », de « soutien », conviennent bien à ce qu'a été Dominique).

M.Z « A Orléans, il y a Dominique Lépingle ». Cette phrase, je l'ai entendue à près de 15 ans d'intervalle. La première fois, en 2000, par mon directeur de thèse et ami Alain Rouault. Jeune docteure, je postulais en tant que Maîtresse de conférences au MAPMO. Je ne fus pas retenue. En 2014, j'y étais recrutée en tant que Professeure et c'est alors mon collègue de Toulon et ami Nizar Demni qui prononça cette phrase, en y ajoutant « tu le salueras de ma part ». Ils venaient d'écrire un article sur la formule de Tanaka, les groupes de réflexion et la projection du mouvement Brownien sur une chambre de Weyl. Voilà, lorsque l'on travaillait sur les processus de Bessel, fonctionnelles exponentielles du mouvement Brownien, martingales, ou Brownien réfléchi, à Orléans il y avait un interlocuteur naturel : Dominique Lépingle. Ses travaux sur les équations différentielles stochastiques, les martingales, etc., sont connus et font référence. Quand je suis arrivée au laboratoire, Dominique était déjà professeur émérite depuis plusieurs années, mais nous le croisions régulièrement dans son bureau. Il ne manquait aucun séminaire de probabilités et restait curieux et intéressé. Toujours disponible pour discuter avec ses collègues, d'Orléans comme de Tours. Kilian Raschel se souvient d'ailleurs de discussions fournies et enrichissantes sur le mouvement Brownien avec réflexion électrostatique. Dominique les avait accueillis lui et Sandro Franceschi avec la gentillesse que nous lui connaissions. Sa bonne humeur, sa présence et son rire léger, si particulier, vont nous manquer...

E.C. Dominique a été tellement plus qu'un directeur de thèse tant il m'a influencé et apporté aussi bien scientifiquement qu'humainement. C'était un homme brillant et humaniste, de ceux dont la fréquentation vous grandit car il savait toujours encourager, s'étonner pour nous donner l'impression de briller un peu aussi car sa lumière à lui n'était jamais écrasante, au contraire, elle lui permettait d'exceller aussi dans l'altérité et l'empathie car il se souvenait qu'il avait un jour été novice et, surtout, il éprouvait un bonheur sincère à nous voir progresser. Dans les colloques, il était apprécié de tous, aussi bien des chercheurs réputés, que des jeunes chercheurs avec qui il aimait plaisanter et échanger au contraire de certains de ses collègues beaucoup plus élitistes qui se tenaient avec des collègues de leur rang. Je suis issu d'un milieu très modeste : la rencontre avec Dominique à partir de la maîtrise (master 1 actuel) a été décisive car il a représenté pour moi une figure tutélaire, un père spirituel qui a cru en moi, que je n'ai plus quitté pendant plusieurs années consécutives jusqu'à se voir presque tous les jours, parfois le week-end et devenir de plus en plus complices. Une connivence aussi bien mathématique que quotidienne : de belles réussites ensemble dans le domaine de la recherche où on a fini par atteindre le sommet que lui seul envisageait depuis le tout début et tellement de bons moments, de fous rires, surtout dans les colloques dont les souvenirs viennent encore parfois éblouir mes pensées. Il fait partie de ces rares personnes qui, à une période de ma vie, ont été tout pour moi : un phare. Je lui dois tant, l'homme est aussi brillant que le mathématicien : subtil et généreux. Je remercie le hasard d'avoir permis à nos trajectoires de se croiser.

A.E. En quelques mots, je dirais que Dominique alliait la rigueur mathématique à la chaleur humaine, la générosité et la modestie. Au début de ma thèse, il m'avait dit « Viens me voir quand tu as une question » (c'était avant l'ère numérique). Combien de fois suis-je venue toquer à sa porte de bureau, à l'improviste, pour des questions souvent banales ou infondées ? Jamais il n'a manifesté le moindre agacement, la moindre impatience. Quel plaisir il prenait à revenir à la base d'un raisonnement et à décortiquer chaque étape ! Je le revois presque sautillant devant le tableau noir de son bureau, traçant des schémas éclairants et des inégalités d'une écriture fine. Toujours encourageant, toujours positif, le directeur de thèse rêvé..., du modèle de ceux que l'on essaie de suivre, avec difficulté, une fois passé de l'autre côté. Dominique savait tellement bien donner confiance que, longtemps encore après ma thèse, il me suffisait d'imaginer ce qu'il aurait fait ou dit dans telle ou telle situation pour savoir le chemin que je devais suivre.

S.L. Encore aujourd'hui, je me dis souvent que j'ai eu beaucoup de chance que Dominique Lépingle accepte de diriger ma thèse. J'avais - et j'ai toujours eu - pour lui une admiration sans bornes ! Ses cours étaient vivants, précis et rigoureux. Ils m'ont donné le goût des probabilités et l'envie de travailler dans ce domaine. Les premiers moments de travail en tête à tête étaient intimidants. Mais par sa grande gentillesse et son humour, Dominique faisait en sorte que l'étudiante peu sûre d'elle que j'étais se sente peu à peu plus confiante. Je me souviens que le jour de ma soutenance de mémoire de DEA, une de ses collègues, que j'admirais aussi, avait fait une remarque sur la complexité du sujet. Et il avait renchéri de bon coeur avec l'élégance et la bienveillance qui le caractérisent. Dominique était un directeur de thèse très attentionné et très disponible. Jamais, il ne m'a dit »je n'ai pas le temps en ce moment ». Je me souviens notamment de périodes estivales pendant lesquelles nous nous retrouvions tous les trois jours ; c'était stimulant et fructueux. Il relisait attentivement toute amorce de résultat, toute ébauche de rédaction. Il manifestait son enthousiasme pour chaque petite « découverte » et savait être encourageant dans les moments de doute. Et c'est avec beaucoup de délicatesse qu'il me signalait parfois une faille dans une démonstration. Au sein du groupe de travail, Dominique insufflait une ambiance à la fois studieuse et conviviale où chaque participant, quelle que soit son expérience, trouvait sa place sereinement. En toute occasion (déplacements, colloques, pauses café, moments conviviaux...), avec chaleur et bonne humeur, Dominique s'intéressait vraiment à chacun, à son histoire, à ses projets... Je pense à Dominique chaque fois que je traverse le Jardin des Plantes, où nous nous arrêtions le temps d'un sandwich avant le séminaire de Jussieu. Je pense à Dominique chaque fois que je réalise à quel point j'aime mon métier. Je penserai encore longtemps à lui.

C.M. J'ai eu la chance d'avoir Dominique Lépingle comme enseignant en cours de DEA l'année universitaire 1983/1984 où je reprenais des études après l'agrégation obtenue en 1978. Au bout de cinq minutes, il enlevait son pull et « c'était parti » pour un rythme tonique et dynamique. Il vivait à fond ses démonstrations et était passionné. Il a accepté de diriger mon mémoire puis m'a proposé en septembre de diriger ma thèse. C'était risqué de sa part car devenue PRAG, maman de deux petites de 15 mois et 2 mois je n'étais pas la thésarde idéale ! Il a toujours été compréhensif vis-à-vis de mes contraintes familiales et je lui en suis reconnaissante. Nous avions un rendez-vous hebdomadaire pour l'avancement de ma thèse et il a toujours écouté mes questions avec patience et indulgence. Quelques jours après ma soutenance début juillet 1988, Dominique a été hospitalisé à l'hôpital Lariboisière à Paris. Avec mon époux nous lui avons rendu visite et avons alors découvert qu'il vivait avec de graves problèmes cardiaques depuis l'enfance et nous avons été très impressionnés par son moral.

Le sujet de ma thèse était novateur tout comme la finance stochastique ; je lui suis aussi reconnaissante pour cela car recrutée dans une faculté de sciences économiques j'étais ainsi plus à même d'enseigner les mathématiques pour la finance.

M.P. Le plus ancien souvenir de toi, Dominique, doit dater de 78-79 : ma troisième fille venait d'entrer à la maternelle et je me remettais à la recherche, en équipe avec une jeune collègue, assistante. Et rappelle-toi cette commission de spécialistes au vote calamiteux qui a écarté la candidature de ma partenaire en recherche au profit d'un homme car, argument suprême, « son mari gagnait bien assez pour deux » et le collègue mâle « avait plus besoin du poste de maître assistant que la jeune femme ». A la sortie, nous étions tous les deux catastrophés.... Et j'ai essayé d'autres voies, mais pas vraiment concluantes. Je me suis ressaisie et alors tu m'as fait tout un programme de rendez-vous avec qui tu pensais je pouvais faire de la recherche, jusqu'à mon arrivée au « groupe de Nicole ». C'est alors que, poussée par toi, j'ai entamé une thèse d'Etat dont tu acceptais d'être le directeur. Tu m'as toujours soutenue, encouragée. Et souvent, souvent, je venais avec mes questions que tu examinais toujours avec bienveillance et souvent, souvent, tu me donnais la solution. Ton épouse Anne me raconte : « en vacances je vois Dominique griffonner des maths. -Que fais-tu donc ? -Je fais un truc pour Monique. » J'ai toujours sur mon bureau le fameux Lépingle et Mémin « sur l'intégrabilité uniforme des martingales exponentielles ». Ah... J'ai encore une question : sous quelles hypothèses une diffusion vectorielle admet-elle une densité strictement positive ? C'était en novembre. Je ne te savais pas à l'hôpital. Mais tu m'aurais sûrement une fois de plus bien aidée. Alors, cher, très cher Dominique, merci ! merci ! pour ta gentillesse, ta disponibilité, ta grande culture... merci ! merci ! Je t'embrasse de tout mon cœur.

Remembering Andreas Griewank : 1950-2021

par :

Tsou Sheung Tsun — ex-chair of the Committee for Developing Countries

La SMAI tient à remercier le Professeur Fernando Manuel Pestana da Costa, responsable del'EMS Magazine pour avoir autorisé la reproduction de cette notice écrite par Tsou Sheung Tsun, professeur à l'université de Oxford.

La communauté gardera d'Andreas le souvenir d'un homme de coeur, de grande rigueur intellectuelle et reconnu pour son grand professionnalisme. Nous adressons nos condoléances sincères et attristées à son épouse Elizabeth et à sa famille.

The Committee for Developing Countries was very sad to learn of the untimely and sudden death of long-term member Andreas Griewank. A lot of regrets were poured through the CDC network on learning the news.

- *Andreas has been an active member of this Committee for many years, his enthusiasm was contagious and his activities widely spread in the world. He will be missed by many.*
- *I have such good memories of Andreas, his energy and enthusiasm, and his hospitality in Berlin for CDC.*

- *Many people among the actual and past CDC members know him well and testified his worldwide actions, his enthusiasm, the nice person he was. He will be missed by the mathematical community.*
- *I feel very sad to learn that Andreas is no more. He was a very friendly and active member of our committee for many years. I liked his sense of humour. He was very efficient when he organized a meeting of CDC in Berlin in 2014. I miss him.*

And even some future plans:

- *...we were even talking about visiting the Ecuadorian university some time ago.*

So we connected Andreas with good humour, activities all over the world, enthusiasm, and we miss him a lot !

First let us give voice to the long-term member CDC who is closest to him in research, Michel Théra, professor emeritus University of Limoges and Adjunct professor, Federation University Australia.

> *Andreas obtained his Phd "Analysis and Modification of Newton's Method at Singularities" from the Australian University, Canberra under the direction of R. P. Brent and M. R. Osborne in 1980. Then, he was one year post doc at the University of Cambridge and became Assistant professor at Southern Methodist University, Dallas until 1987. Then he moved as a Senior Scientist at Argonne National Laboratory and joined as Professor, the Technische Universität Dresden before moving to Humboldt University of Berlin. When he retired in 2015, he became Dean of the School of Mathematical Sciences and Information Technology at Universidad de Investigación de Tecnologia Experimental Yachay in Quito.*
>
> *During his academic career, Andreas research focused on algorithmic differentiation and iterative methods for nonlinear optimization for which he was awarded in 2017 Fellow of the Society for Industrial and Applied Mathematics.*
>
> *For non specialists, let us briefly describe the main research interest of Andreas. Many derivatives arrays such as gradients, Jacobians, Hessians are essential tools for computational purposes in various areas. This is the case for instance in numerical optimization when using a gradient descent method or a Newton's method. When computing derivatives by hand or by using computer algebra systems one may observe that the formula for the derivative grows very rapidly in a combinatorial way. Andreas was one of the leaders of the so-called automatic differentiation (AD), which is a technique that allows the computation of derivatives of any order for a function specified by a computer program. By avoiding the manipulation of complex function formulas with exponential*

growth, AD is vey useful in various areas of applied mathematics, including numerical optimization and also computational fluid dynamics, atmospheric sciences, and engineering design optimization or more generally when working on computational simulation models.

He spent a sabbatical year as researcher at INRIA Sophia Antipolis, Antibes, France 1988-1989.

Among other honours, he won the Max-Planck Research Prize for International Collaboration in 2001.

In 2006, being a member of the jury of the habilitation thesis of Darinka Dentcheva, Andreas welcomed me very warmly to his home in Berlin. I remember often this stay with pleasure. (Michel Théra)

For those of us whose mathematical interests are far removed from optimization, this gives us a more rounded picture of our friend and colleague. Thank you, Michel T. !

Prof. Andrea Walther, Department of Mathematics, Humboldt-Universität zu Berlin, kindly sent us the official obituary, of which the following excerpts give some more details and further insight into his mathematics and achievements.

Andreas was born in Kassel on 26 January 1950. He passed away suddenly On 16 September 2021, and unexpectedly at the age of 71.

In addition to his contributions to AD, Andreas continuously made important contributions to the design and analysis of nonlinear optimization algorithms. Of the many accomplishments with regard to very different aspects of nonlinear optimization, just a few are mentioned here. First, the idea of partial separability was developed by Andreas jointly with Prof. Philippe Toint. This structural property is ubiquitous in optimization problems, and can be exploited to improve greatly the efficiency of algorithms. A second example is given by his contribution to the convergence theory of Newton and quasi-Newton methods in different settings, including the infinite dimensional setting and the degenerate setting, in which the Hessian is singular the optimum. These topics were the subject of a series of papers that are still frequently cited, and are the basis of ongoing research. Third, the "Griewank function" serves as an academic test function in global optimization. This function continues to be used widely in the global optimization community, and is the subject of renewed interest because of the need for non-convex optimization to minimize objectives in data analysis applications, including deep learning. Andreas' scientific work was always marked by an abundance of ideas and infectious enthusiasm.

Andreas made also significant service contributions to several different communities. He has organized numerous conferences and workshops worldwide.

Often, the aim of these meetings was also to connect academic researchers with practitioners in the areas of AD and nonlinear optimization.

Promoting young researchers was always close to Andreas' heart. He supervised 23 doctoral students and numerous master students from all over the world. He had a special interest in promoting and supporting the mathematical education in developing countries. (Andrea Walther)

At some point we found out that Andreas was very good at organizing roundtables, and he was thus roped in to organize a couple during the EMS annual meetings in Amsterdam and in Krakow, and also during our own CDC meetings. We found that his secret was meticulous preparation beforehand; and he also got his then graduate student Levis Eneya (from Malawi) to help him with much of the correspondence, chasing-up of invitees and so on. He must have been pleased to see Levis elected president of SAMSA in 2012.

For those of us who attended the CDC annual meeting 2014, organized and invited by Andreas, it was a most pleasant time and everything was well organized. We had a roundtable discussion in the headquarters of the IMU, and we were invited by him and his wife to a nice visit to his family home (with excellent food of course).

In meetings Andreas was quite the "trouble-maker", since he questioned many proposals and quite often disagreed with the others. But he always had a good reason for doing so, and he was of course a great respecter of democracy, for after a heated discussion, he usually ended up by saying that "if you all agree, of course I'll go along". He said also: "So I'll step down from my nitpicking Oberlehrer soap box," in one email after some exchanges of opinion. Another exchange of emails was for the written report of a conference (not an EMS one): "Just a private word to say how I liked your report (candid and all!)" to which he replied "I have a hard time orienting myself in a world of superficial politeness. I hope you got the full report ...."

One heroic thing he did for CDC was to collect and distribute some free mathematical books. It was at the EMS conference in Krakow 2012, and as usual there were booksellers exhibiting their books, and very often their representatives are more than willing to give away the unsold books after the conference. So Andreas collected 100 books, took them back to Berlin because he came with some others in a car. With the help of his secretary Jutta Kerger these books were catalogued, and he used his ingenuity (writing to embassies etc.) to distribute them to various developing countries, sometimes by taking them in his luggage and delivering them by hand. It was really a success, so much so that he did it again after another big international conference (on applied mathematics).

Of course his activities were not confined to those of CDC. For a number of years he was the German representative with CIMPA (Centre international de mathématiques pures et appliqueés). After he went to Ecuador he organized, with Marc Lassonde, in 2017 a CIMPA School at Vachay Tech. Didier Aussel, also a CDC member, was the CIMPA representative responsible for the school. His comment was "we had good time together during this school. Andreas was so enthousiastic !!" At some time Andreas was also involved in the work of AIMS, particularly with their new centre in Senegal. And being German he was also active in the work of DAAD. He was one of the few colleagues who had visited several times Cuba, and heard *viva voce* Castro's well known marathon speeches!

We shall end with a warm and moving account from his Ecuadorian colleague Juan Carlos De los Reyes, Professor and Director, Centro de Modelización Matemática (MODEMAT), Escuela Politécnica Nacional de Ecuador.

> *Andreas landed in Ecuador in 2015 to take part of a new university oriented mainly towards scientific research: Yachay Tech. Apart from his academic interests, Andreas was motivated to support a socially oriented left-wing government, very close to his personal convictions. In fact, from the beginning, Andreas dedicated a significant part of his salary to support low-income students through scholarships.*
>
> *Andreas' personality was felt from day one. He was fully involved in the university development as Dean of the Faculty of Mathematical and Computational Sciences. During this period, the Mathematics curriculum, with a strong computational component, was established, as well as the Computer Science curriculum, oriented to modern topics in machine learning and artificial intelligence. Andreas also made a significant effort to establish doctoral programs in the institution, a project which unfortunately he did not succeed to realize.*
>
> *Giving direction to a brand new university is not easy, and even less so in a country with several political turbulences. Andreas faced opposition from various sectors and had to fight quite a few battles for what he believed to be the best for the future of Yachay Tech.*
>
> *His period in Ecuador left undoubtedly a footprint on several of his students, who turned to mathematics with the passion that only Andreas knew how to sow. His time in South America was also productive in terms of research, leaving as legacy his rigorous work on optimality conditions and automatic differentiation for optimization problems with piecewise smooth functions.*
>
> (Juan Carlos De los Reyes)

What a moving portrait of the Andreas we knew and now miss !

The author wants to thanks Juan Carlos De los Reyes, Michel Théra and Andrea Walther.

Un mathématicien russe : Azat MIFTAKHOV

par :
Violaine ROUSSIER-MICHON[1] — Chargée de mission
Droits Humains à la SMAI

Cet article a été écrit début février 2022, avant l'invasion de l'Ukraine et l'annulation de ICM 2022 en Russie.

Originaire du Tatarstan en Fédération de Russie, Azat MIFTAKHOV est un mathématicien de 29 ans, étudiant en thèse à l'Université d'état de Moscou, sous la direction du professeur Vladimir Bogachev.

Chronique judiciaire

Début février 2019, alors qu'il rentre d'un congrès à Nijni Novgorod, Azat MIFTAKHOV est arrêté et accusé de fabrication d'explosifs. Pendant sa détention, il affirme avoir été torturé, allégations confirmées par un membre de la

1. roussier@insa-toulouse.fr

”commission indépendante pour la surveillance des prisons”, un organisme indépendant. Ces traitements inhumains ne font pourtant l'objet d'aucune enquête à ce jour.

Par deux fois, la cour demande sa remise en liberté pour insuffisances de preuves. Ce n'est que le 7 février 2019 qu'Azat MIFTAKHOV est libéré, mais pour être immédiatement ré-arrêté. Il est alors accusé d'avoir pris part à une attaque contre un bureau du parti politique au pouvoir ”Russie Unie” le 31 janvier 2018, soit plus d'un an auparavant.

Azat MIFTAKHOV a toujours clamé son innocence. Accusé avec deux autres personnes d'un bris de vitre et jet d'une bombe fumigène, Azat MIFTAKHOV nie avoir participé à cette attaque, ce que confirment ses co-accusés, qui ont reconnus les faits dont ils sont accusés.

Le 18 janvier 2021, après deux années de détention préventive, le tribunal du district de Golovinsky à Moscou a reconnu Azat MIFTAKHOV coupable de ”hooliganisme” et l'a condamné à six ans de prison dans une colonie pénitentiaire du régime général, tandis que ses co-accusés ont écopé de peines avec sursis.

Malgré les appels de la communauté internationale en faveur d'Azat MIFTAKHOV, ce jugement a été confirmé en appel le 9 juin 2021 par la cour d'appel de Moscou. Les éléments à charge présentés par la justice russe, sont deux témoins ”secrets”, c'est-à-dire dont l'identité n'est pas connue de la défense. L'un de ces deux témoins est mort avant même le premier procès, le second a témoigné en visio-conférence, tenant des propos contradictoires selon l'avocat d'un des co-accusés.

Ces recours aux ”témoins secrets” sont des méthodes contraires au droit international et la justice russe a été condamnée dans une autre affaire à ce sujet par la cour européenne de justice. Le motif de ”hooliganisme” a été réfuté par Azat MIFTAKHOV qui a toujours nié les faits qui lui sont reprochés, malgré les pressions exercées sur sa famille.

Pour le Centre ”Memorial”, principale association de défense des droits humains en Russie (récemment dissoute par Moscou) et pour l'ONG ”Human Rights Watch”, ce jugement est injuste et inique. Ils demandent la libération immédiate et inconditionnelle d'Azat MIFTAKHOV, considéré comme un prisonnier politique, emprisonné pour avoir exprimé des opinions différentes de celles du pouvoir en place. Azat MIFTAKHOV se définit lui-même comme un activiste politique, impliqué dans le mouvement anarchiste.

Actions de la communauté internationale

Dès sa première arrestation, les collègues d'Azat MIFTAKHOV à Moscou se sont organisés pour obtenir sa libération. Cette mobilisation a ensuite été relayée par la communauté mathématique internationale et un comité de soutien a vu le jour.

Des actions diverses de visibilité et d'appel à une remise en liberté ont été menées. Citons par exemple la tenue du "Azat MIFTAKHOV day" le 16 juin 2021 avec des exposés mathématiques, une pétition signée par plus de 3400 mathématiciens, une lettre de cinquante académiciens russes, un appel de mathématiciens aux organisateurs du Congrès International des Mathématiciens 2022, des soutiens de plusieurs sociétés savantes à travers le monde (américaine, italienne, brésilienne, et bien sûr françaises SMF et SMAI).

Le 23 février 2021, Azat MIFTAKHOV a également été lauréat du programme "visibilité scientifique junior" de la fondation mathématique Jacques Hadamard qui lui offrait un financement pour un séjour de recherche de longue durée au laboratoire de mathématique d'Orsay. Le 4 mars 2021, Azat MIFTAKHOV a été nommé étudiant d'honneur de l'école doctorale EDMH de l'Université Paris-Saclay.

Aujourd'hui, Azat MIFTAKHOV est incarcéré dans la colonie pénitentiaire numéro 17 dans la province de Kirov, à mille kilomètres au nord-est de Moscou. Il travaille dans une scierie. Ses conditions de travail sont difficiles : manipulant des grumes de gros diamètres par −25 degrés, il a été victime d'un accident du travail à l'automne 2021. Figurant sur une liste de prisonniers "à risque", il est en permanence surveillé en cellule.

La répression continue autour de son action. A Kansk, un jeune de 15 ans a ainsi été condamné début février 2022 à cinq ans d'emprisonnement pour avoir affiché un tract en faveur d'Azat MIFTAKHOV sur un mur du FSB local.

Malgré ses conditions de détention, la censure de son courrier et de certains ouvrages mathématiques, Azat MIFTAKHOV continue la recherche. Il a ainsi soumis deux pré-publications depuis le début de sa détention, disponibles sur Arxiv.

La tenue du prochain Congrès International des Mathématiciens à Saint Pétersbourg en juillet 2022 est l'occasion de rappeler à la Russie ses obligations en terme de droit international. Saisissons cette opportunité pour porter haut et fort le nom de notre collègue injustement emprisonné et soutenons nos collègues russes qui se battent chaque jour avec courage et détermination.

Bibliographie

- Le comité de soutien : https://caseazatmiftakhov.org/ (faits détaillés, webinaire du Azat Miftakhov day en replay, lien vers la pétition, ...)
- International Memorial : https://www.memo.ru/en-us/
- Human Rights Watch : https://www.hrw.org/news/2021/01/18/another-political-activist-jailed-russia
- Scholars at Risk : https://www.scholarsatrisk.org/report/2020-03-21-moscow-state-university/
- American Mathematical Society : http://www.ams.org/about-us/governance/committees/humanrights
- Société Mathématique de France : https://smf.emath.fr/smf-dossiers-et-ressources/dossier-azat-miftakhov
- Société mathématique appliquée et industrielle : http://smai.emath.fr/spip.php?article752&lang=fr
- Un billet de Michel Broué : https://blogs.mediapart.fr/michel-broue/blog/180121/la-sentence-pour-azat-miftakhov-6-ans-de-prison

Compte-rendu des conférences IbOMaN, 22-23 Juin 2020 & 25-27 Octobre 2021

par :

Julie Dardare
Ulysse Herbach
Emma Leschiera
Hugo Martin
Angélique Perrillat-Mercerot
Alexandre Poulain
Andréa Witz

Présentation générale et genèse du projet

Alors que les mathématiques et la physique ont une longue histoire en matière d'interaction, le dialogue des mathématiques avec la biologie et la médecine n'est devenu un enjeu majeur qu'au cours des dernières décennies. Pour favoriser ces interactions, nous avons proposé aux jeunes chercheurs et chercheuses de se rencontrer lors d'une conférence mettant en avant l'interaction entre l'oncologie, les mathématiques et le numérique. Ainsi, les deux éditions de la conférence IbOMaN ont été l'occasion de donner la parole aux jeunes impliqué·e·s dans des projets interdisciplinaires liés à la recherche sur le cancer, qu'ils soient fondamentaux ou appliqués.

L'idée de l'organisation de ces conférences nous est venue à partir de deux constats. D'abord, travailler à l'interface de ces disciplines peut poser problème aux jeunes chercheurs à cause des différences de vocabulaire, de méthodes ou d'objectifs entre les diverses spécialités, qui peuvent sembler de prime abord ne pas s'accorder. Ainsi, il nous apparaissait pertinent d'encourager le dialogue entre ces jeunes chercheurs le plus tôt possible dans leur carrière. Ensuite, il nous semblait que le cadre d'une conférence classique pouvait décourager les jeunes d'aborder les chercheurs et chercheuses plus expérimentés de leur domaine. Notre second objectif était donc de permettre aux jeunes en début de carrière de rencontrer certains chercheurs et chercheuses reconnus de leur domaine, en prévoyant des créneaux d'échanges informels.

Premier opus

La première édition a été organisée par Alexandre Poulain comme porteur de projet, secondé par Emma Leschiera, Hugo Martin et Angélique Perrillat-Mercerot. Très tôt au cours des discussions initiales de ce projet, il est apparu que nous souhaitions entendre bien plus de personnes que de créneaux disponibles pour une conférence se tenant sur deux jours. Ainsi, nous avons assez rapidement décidé de scinder l'évènement en deux itérations : la première se limitant aux aspects précédents la clinique, et la seconde ayant pour thématique des sujets liés aux traitements.

Prévue pour fin juin 2020, la première édition s'est finalement déroulée en ligne les 22 et 23 juin, *via* Big Blue Button sur un serveur fourni par le Laboratoire Jacques-Louis Lions. Comme bien d'autres évènements se tenant à cette période, nous avons dû nous adapter aux contraintes d'une visioconférence. Ainsi, nous avons ainsi décidé de réduire les temps d'échanges informels, que nous avions jugés propices à la perte de participant·e·s. Dans le même ordre d'idées, nous avons estimé que les pauses médianes seraient un moment critique de perte d'audience, et souhaité que ces coupures soient animées. Le premier jour s'est tenu une intervention de Nathan Uyttendaele, auteur de la chaîne YouTube Le chat sceptique, intitulée *How much do you really know about the p-value ?* et à mi-chemin entre l'exposé et le quizz. La programmation scientifique complète est disponible sur le site dédié. Nous avons eu le plaisir d'assister à 14 présentations au total. 10 présentations ont été réalisé par des jeunes chercheurs et chercheuses. Nos parrains, Francis Levi (University of Warwick, Paris-Saclay University, Public Hospitals of Paris) et Jacques Demongeot (Université Joseph Fourier, Grenoble), ont proposé deux présentations. Un exposé plus pédagogique fut réalisé par Luc Pellerin (CHU de Poitiers, Université de Poitiers).

À l'issue de ces deux jours, nous avons fait parvenir un questionnaire aux participant·e·s en vue d'améliorer la formule pour l'itération suivante. Il en est ressorti que les mathématicien·ne·s avaient globalement trouvé le ratio entre exposés de mathématiques et biologie/oncologie correct, tandis que les non mathématicien·ne·s s'étaient senti·e·s noyé·e·s sous les exposés de mathématiques. Nous avons donc décidé pour remédier à cela de recruter des jeunes expérimentateurs ou expérimentatrices dans le prochain comité d'organisation.

Second opus

Le besoin de recrutement précédent s'est traduit par l'addition d'Ulysse Herbach, orateur lors de la première édition, ainsi que Julie Dardare et Andréa Witz, doctorantes en biologie et oncologie à Nancy. Ce comité d'organisation plus diversifié nous a permis de nous rapprocher beaucoup plus de notre objectif d'interdisciplinarité. Par ailleurs, le projet a été cette fois-ci porté par Hugo Martin.

Initialement prévu pour juin 2021, le deuxième volet de la conférence a été reporté aux 25, 26 et 27 octobre 2021 afin que celle-ci puisse se tenir en présentiel. Centrée sur le thème des traitements, cette édition a vu se tenir des sessions liées à l'identification de nouvelles cibles thérapeutiques ou à la prédiction de l'effet d'un traitement. Celle-ci s'est tenue au sein de l'Institut Curie, dans l'amphithéâtre Constant Burg pour les présentations orales et dans le couloir le contournant pour la session posters. Nous avons reçu 45 participants en présentiel et dans le respect de normes sanitaires strictes qui nous ont été imposées par l'institut Curie. Pour cette édition, nous avons bénéficié du soutien financier de la SMAI, de la fondation Arc, de l'Inria *via* les équipes MAMBA et BIGS ainsi que du GDR MAMOVI (CNRS).

Nous avons eu le plaisir d'écouter des présentations de 18 chercheurs et chercheuses à l'interface de l'oncologie, des mathématiques et du numérique. Pour certaines présentations, nous avons proposé un format original en deux volets : deux orateurs ou oratrices travaillant ensembles présentaient les deux faces de leurs travaux interdisciplinaire en biologiques et mathématiques/numériques. Trois de ces "exposés duo" se sont ainsi tenus durant cette édition. De plus, une présentation d'Adèle L'Hostis, de l'entreprise Novadiscovery basée à Lyon, nous a donné un aperçu de la recherche dans le secteur privé. Comme mentionné plus haut, nous avons souhaité proposer une petite proportion d'exposés faits par des chercheurs et chercheuses plus confirmé·e·s. Cela s'est traduit par une *masterclass* dispensée par Alexandre Harlé (Université de Lorraine, Nancy), deux présentations plénières par Hugues de Thé (Collège de France, Paris) et Victor Pérez-Garcia (Université de Castilla-La Mancha, Espagne), ainsi qu'une conférence « pas de côté » assurée par la philosophe de la biologie et du cancer Lucie Laplane (Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne) sur la définition de ”clone” afin de stimuler des discussions plus générales autour de la science. Comme précédemment, la programmation scientifique complète est disponible sur le site dédié.

Bien que les mesures sanitaires mises en place pour protéger les participants furent contraignantes, nous avons pu organiser deux événements de partage durant notre conférence. En effet, une session poster à la fin de la journée du 26 octobre nous a permis d’échanger ensemble et de découvrir les recherches à l’interface réalisées par des jeunes chercheurs. Le second événement fut un repas de clôture durant lequel nous avons pu à nouveau nous réunir, cette fois dans une ambiance plus décontractée.

À l’issue de ces trois jours, nous avons comme précédemment proposé un questionnaire. Il en est ressorti que l’interdisciplinarité était bien plus au cœur du projet et a beaucoup plu à l’auditoire.

Bilan

Après une première édition en demi-teinte sur le plan de l’interdisciplinarité et des échanges entre les participant·e·s, nous pensons avoir réussi notre pari sur cet aspect lors de l’édition suivante. En particulier, les exposés en duo, auxquels nous avions pensé dès la première édition, nous ont totalement convaincus. Cependant, nous avons encore une marge de progression, notamment sur la parité des intervenant·e·s. Ce point sera souligné à une éventuelle future équipe d’organisation. En effet, nous souhaiterions voir ce format de conférence se pérenniser en passant le flambeau à une nouvelle équipe, qui pourrait être plus internationale. En effet, plusieurs participant·e·s ont manifesté un intérêt pour reprendre l’organisation, en particulier parmi le groupe de Victor Pérez-Garcia à Ciudad Real.

Équipe organisatrice

- Julie Dardare, doctorante, Institut de Cancérologie de Lorraine (Nancy).
- Ulysse Herbach, Chargé de recherche, Inria Nancy - Grand Est.
- Emma Leschiera, doctorante, Laboratoire Jacques-Louis Lions, Sorbonne Université (Paris).

- Hugo Martin, chercheur postdoctorant, Inserm, Institut Curie (Paris & Saint-Cloud).
- Angélique Perrillat-Mercerot, chargé de recherche à Novadiscovery (Lyon).
- Alexandre Poulain, chercheur postdoctoral, Simula research laboratory (Oslo, Norway).
- Andréa Witz, doctorante, Institut de Cancérologie de Lorraine (Nancy)

Rencontre Jeunes Chercheuses Jeunes Chercheurs (JCJC) autour du développement d'outils logiciels pour la recherche

par :

Marcella Bonazzoli[1] *— Inria, ENSTA Paris*
Jérémy Heleine[2] *— Inria, ENSTA Paris*

L'utilisation de l'informatique comme outil assistant la recherche est aujourd'hui largement répandue, et ce dans tous les domaines. Les mathématiques ne sont pas en reste, bien loin de là. La puissance, toujours accrue, des ordinateurs nous permet notamment de résoudre des problèmes qu'un être humain mettrait souvent plusieurs milliers d'années à résoudre (au moins !). Qu'il s'agisse de la résolution d'un grand système linéaire, d'une analyse statistique ou encore d'un calcul formel pour ne citer que quelques exemples : le champs des possibles est toujours plus vaste. Si on profite aujourd'hui d'une certaine diversité dans le paysage des outils logiciels mis à notre disposition, il restera toujours des besoins : la recherche évolue sans cesse, nos outils doivent donc s'adapter en conséquence.

La rencontre organisée dans le cadre de ce projet BOUM visait à réunir des jeunes chercheuses et jeunes chercheurs venant de différents horizons des mathématiques, mais avec un intérêt commun : celui pour le développement de ces outils devenus si importants. Le but était, dans un premier temps, de proposer aux développeurs de parler de cet aspect de leur travail, souvent laissé de côté dans les séminaires et conférences « classiques » où l'accent est mis sur la recherche elle-même. Dans un second temps, il s'agissait également d'ouvrir des discussions sur les technologies utilisées, sur les approches algorithmiques, ou même sur des idées nouvelles : de quoi améliorer des projets parfois embryonnaires.

Nous avons réuni plus de vingt personnes pendant deux jours (lundi 29 et mardi 30 novembre 2021). Le public a pu apprécier les présentations de sept oratrices et orateurs francophones. Jean Feydy (Imperial College London), Jérémy

1. marcella.bonazzoli@inria.fr
2. jeremy.heleine@ensta-paris.fr

Heleine (Inria, équipe-projet IDEFIX), Pierre Marchand (Inria, équipe-projet POEMS), Anthony Royer (Université de Liège) et Margot Sirdey (Inria, équipe-projet MAKUTU / ONERA) ont présenté des outils qu'ils ont eux-même développé ou pour lesquels ils ont participé au développement. Thomas Denecker (Institut Français de Bioinformatique) et Aldjia Mazari (CMAP) ont quant à eux proposé des exposés plus génériques, sur des thématiques transversales. Les supports des interventions sont disponibles sur la page web de la rencontre : https://jcjcdeveloppement.pages.math.cnrs.fr/2021.

La rencontre a eu lieu au centre de recherche Inria Saclay Île-de-France. Nous avons fixé la durée de chaque exposé à 45 minutes, et nous avons fait le choix de faire une pause d'une demi-heure sur chaque demi-journée afin de laisser aux participantes et participants le temps de discuter. Le lundi soir, nous nous sommes réunis au cours d'un dîner au restaurant, toujours dans l'optique de discuter et d'apprendre à mieux se connaître dans un cadre purement informel.

Nous tenions à remercier les oratrices et orateurs qui ont joué le jeu en proposant des exposés adaptés à cette rencontre, ce qui représente un exercice assez inhabituel. C'est grâce à leurs efforts que les discussions qui ont suivi chaque exposé ont été aussi riches. Cette rencontre était une première, sur un format largement inspiré par celui des rencontres Jeunes Chercheuses Jeunes Chercheurs sur le thème des ondes qui ont eu lieu en 2017 et 2020. Les retours positifs que nous avons pu avoir nous laissent espérer que cet événement sera, lui aussi, reconduit dans le futur, avec un nouveau comité d'organisation. Nous remercions sincèrement les participantes et participants pour cette rencontre pleine de bonne humeur. Nous remercions également la Fondation Mathématique Jacques Hadamard (Labex Mathématiques Hadamard, Programme Visibilité Scientifique Junior), la Mission Jeunes Chercheurs Inria, la SMAI (projet BOUM pour les jeunes de la SMAI), ainsi que notre équipe, pour nous avoir accordé leur soutien à l'organisation de cette rencontre. Nous remercions tout spécialement Marie Énée qui s'est chargée de l'aspect administratif.

Prix Neveu 2020

Le groupe MAS de la SMAI a institué depuis 2008 un prix de thèse en l'honneur de Jacques Neveu, fondateur du groupe. Ce prix récompense des travaux de thèse soutenue en France en probabilités ou statistique. Une attention particulière est portée aux thèses ayant des liens importants avec d'autres domaines (science du vivant, science de la matière, science de l'ingénieur, sciences physiques, ...) ou une forte implication dans la diffusion des connaissances vers le milieu industriel. Pour l'édition 2020, deux lauréats dont les travaux ont retenu l'attention du jury ont été distingués : Barbara Dembin et Jaouad Mourtada. Pendant ses travaux de thèse, ce dernier a proposé des contributions autour des questions d'apprentissage (forêts aléatoires et apprentissage séquentiel en particulier). De son côté, Barbara Dembin travaille sur des problématiques de percolation et percolation de premier passage.

TABLE DES MATIÈRES

Apprentissage statistique, estimation de densité et prédiction linéaire

par :

Jaouad Mourtada[1] *— ENSAE/CREST*

1 Introduction

Dans ce texte, nous considérons des problèmes de prévision statistique (on parle aussi d'apprentissage supervisé). L'objectif consiste à prédire une certaine quantité d'intérêt appelée *réponse*, à partir de *variables* connues. Il y a bien sûr plusieurs façons d'appréhender ce problème, en fonction de la nature des variables et de la réponse, ainsi que du mécanisme qui les lie et des informations disponibles a priori. Par exemple, lorsque la réponse dépend des variables par un mécanisme connu, comme dans le cas de phénomènes naturels décrits par des lois précises, il est possible d'effectuer des prédictions à partir de règles définies a priori. En statistiques, la construction de bonnes règles de prédiction se fonde sur l'exploitation de jeux de données contenant de nombreux exemples, c'est-à-dire des observations de variables et de réponses associées. Il s'agit alors d'identifier des corrélations entre les variables et les réponses au sein des observations disponibles, afin d'effectuer de bonnes prédictions sur de nouvelles données.

Le problème de la prévision est intimement lié à celui de l'estimation (qui consiste à approcher des quantités moyennes ou globales associées à une population, à partir de l'observation d'échantillons issus de cette population), qui est au cœur de la théorie statistique. L'apprentissage statistique a en particulier émergé comme un sujet d'étude à part entière avec les travaux fondateurs de Vapnik et Chervonenkis [48] sur la classification au début des années 1970. Dans ce texte, nous aborderons certaines variantes de ce problème, en mettant l'accent sur les classes linéaires de prédicteurs, ainsi que sur le problème de l'estimation de densité.

1. jaouad.mourtada@ensae.fr

En Section 2, nous introduisons le problème de l'apprentissage statistique, en discutant quelques notions générales illustrées dans les sections suivantes. Le cas de la régression linéaire est examiné en détail en Section 3. Nous verrons en particulier que la difficulté du problème est caractérisée par une certaine quantité, le levier statistique, qui quantifie la sensibilité des prédictions. Cela permettra de mettre en évidence une propriété d'extrémalité asymptotique de la loi normale en grande dimension. Nous discuterons également l'obtention de bornes supérieures, qui se ramène à l'étude de la queue inférieure et des moments inférieurs de matrices aléatoires. Enfin, la Section 4 est consacrée à un autre problème d'apprentissage statistique, à savoir l'estimation de densité conditionnelle. Après avoir relevé des faiblesses de l'estimation par maximum de vraisemblance dans le cas où la loi des données s'écarte du modèle, nous décrivons un estimateur alternatif, qui corrige les prédictions de l'estimateur de vraisemblance en fonction d'une forme de levier à partir d'échantillons « fictifs ». Nous appliquons cet estimateur au modèle linéaire gaussien puis au modèle logistique, pour lesquels l'estimateur admet de meilleures garanties théoriques que l'estimateur du maximum de vraisemblance, tout en restant explicitement calculable par optimisation convexe.

2 Apprentissage statistique et risque minimax

En apprentissage statistique supervisé, l'objectif est de trouver une bonne façon de prédire une réponse $y \in \mathcal{Y}$ à partir d'une variable $x \in \mathcal{X}$. Ainsi, soient $\mathcal{X}, \mathcal{Y}$ et $\widehat{\mathcal{Y}}$ des espaces mesurables, correspondant respectivement à l'espace des variables, des réponses et des prédictions[2]. Afin de quantifier la qualité d'une prédiction en fonction de la valeur de la réponse, on se donne une *fonction de perte* $\ell : \widehat{\mathcal{Y}} \times \mathcal{Y} \longrightarrow \mathbf{R}$; ainsi, $\ell(\hat{y}, y)$ mesure l'« erreur » de la prédiction $\hat{y} \in \widehat{\mathcal{Y}}$ lorsque la réponse est $y \in \mathcal{Y}$. Un *prédicteur* (ou : *fonction de prédiction*) est simplement une fonction (mesurable) $f : \mathcal{X} \longrightarrow \widehat{\mathcal{Y}}$ associant une prédiction $f(x)$ à chaque réalisation de la variable $x \in \mathcal{X}$.

Afin de donner un sens au problème, il reste à spécifier la relation entre la variable x et la réponse y. Dans le cadre statistique, on suppose que le couple variable-réponse est la réalisation d'une variable aléatoire (X, Y) de loi jointe P sur $\mathcal{X} \times \mathcal{Y}$. On mesure alors la qualité d'un prédicteur $f : \mathcal{X} \longrightarrow \widehat{\mathcal{Y}}$ par son *risque*

2. On a souvent $\widehat{\mathcal{Y}} = \mathcal{Y}$, comme dans le cas de la régression traité en Section 3, mais pour l'estimation de densité en Section 4, $\widehat{\mathcal{Y}}$ sera distinct de $\mathcal{Y}$.

(perte moyenne)

$$L(f) = L_P(f) = \mathbb{E}\ell(f(X), Y) = \int_{\mathcal{X}\times\mathcal{Y}} \ell(f(x), y) P(\mathrm{d}\, x, \mathrm{d}\, y)\,. \tag{1}$$

Le prédicteur ayant le plus faible risque, appelé *prédicteur de Bayes*, est caractérisé par la loi conditionnelle $P_{Y|X}$: presque sûrement,

$$f_{\mathrm{Bayes}}(X) = \operatorname*{arg\,min}_{\hat{y}\in\widehat{\mathcal{Y}}} \mathbb{E}[\ell(\hat{y}, Y)|X] = \operatorname*{arg\,min}_{\hat{y}\in\widehat{\mathcal{Y}}} \int_{\mathcal{Y}} \ell(\hat{y}, y) P(\mathrm{d}\, y|X)\,. \tag{2}$$

Dans le problème d'apprentissage, la loi P des données, et donc le risque L et le prédicteur de Bayes, sont inconnus. On dispose en revanche d'un échantillon i.i.d. de loi P, soit $D_n = ((X_1, Y_1), \dots, (X_n, Y_n))$. L'objectif consiste alors, étant donné D_n, à choisir un bon prédicteur $\hat{f}_n = f_n(D_n)$, où f_n est une fonction de l'ensemble $(\mathcal{X} \times \mathcal{Y})^n$ de jeux de données de taille n vers l'ensemble $\mathcal{F}(\mathcal{X}, \widehat{\mathcal{Y}}) = \widehat{\mathcal{Y}}^{\mathcal{X}}$ des prédicteurs. Notons que le prédicteur $\hat{f}_n$, et donc son risque $L(\hat{f}_n)$, est aléatoire, car dépendant de l'échantillon D_n. Nous considérerons ici surtout l'espérance $\mathbb{E}[L(\hat{f}_n)]$ du risque, mais il est aussi important de contrôler les queues de $L(\hat{f}_n)$, c'est-à-dire d'obtenir des bornes de risque en forte probabilité.

Une façon classique [47, 16, 10] d'évaluer la performance d'une procédure de prédiction $\hat{f}_n$ consiste à comparer son risque à celui du meilleur prédicteur au sein d'une classe de référence $\mathcal{F} \subset \mathcal{F}(\mathcal{X}, \widehat{\mathcal{Y}})$, uniformément sur une famille $\mathcal{P}$ de lois de probabilités P possibles. Formellement, on définit l'*excès de risque* du prédicteur $\hat{f}_n$ par rapport à la classe $\mathcal{F}$ sous la loi P par :

$$\mathcal{E}_P(\hat{f}_n; \mathcal{F}) = \mathbb{E}_P\big[L_P(\hat{f}_n)\big] - \inf_{f\in\mathcal{F}} L_P(f)\,. \tag{3}$$

L'excès de risque maximal d'une règle $\hat{f}_n$ par rapport à la classe $\mathcal{F}$ sur la famille de lois $\mathcal{P}$ est donc $\mathcal{E}(\hat{f}_n; \mathcal{F}, \mathcal{P}) = \sup_{P\in\mathcal{P}} \mathcal{E}_P(\hat{f}_n; \mathcal{F})$. Enfin, étant données une fonction de perte $\ell : \widehat{\mathcal{Y}} \times \mathcal{Y} \longrightarrow \mathbf{R}$, une classe $\mathcal{F}$ de prédicteurs $\mathcal{X} \longrightarrow \widehat{\mathcal{Y}}$, une famille $\mathcal{P}$ de lois sur $\mathcal{X} \times \mathcal{Y}$, et une taille d'échantillon n, la difficulté du problème de prédiction/d'apprentissage défini par $(\ell, \mathcal{F}, \mathcal{P}, n)$ peut être mesurée par l'*(excès de) risque minimax*, c'est-à-dire l'excès de risque maximal de la meilleure procédure $\hat{f}_n$ possible :

$$\mathcal{E}_n^*(\ell, \mathcal{F}, \mathcal{P}) = \inf_{\hat{f}_n} \sup_{P\in\mathcal{P}} \mathcal{E}_P(\hat{f}_n; \mathcal{F})\,. \tag{4}$$

Cette définition appelle quelques commentaires. L'approche minimax est bien établie en statistiques au sein de la théorie de la décision. Il est important de noter que le risque minimax conduit à considérer des garanties uniformes (sur une classe $\mathcal{P}$ de lois de probabilités), à un nombre d'échantillons n fixé. Ceci contraste avec une approche ponctuelle et asymptotique, faisant tendre n vers l'infini tout en fixant la loi P. L'avantage de l'approche minimax est son uniformité (qui assure un risque contrôlé dans le pire des cas), mais aussi le fait qu'elle fournit une notion d'optimalité et de « meilleure garantie possible », et permet de quantifier celle-ci en fonction des paramètres du problème (soit $n, \mathcal{P}$ et $\mathcal{F}$). L'inconvénient de cette approche est son caractère pessimiste (qui conduit à considérer la pire loi $P \in \mathcal{P}$), mais cette limitation peut être partiellement levée en considérant la question de l'*adaptation*, c'est-à-dire en envisageant simultanément plusieurs classes $\mathcal{P}$ plus ou moins complexes. Pour plus de détails sur cette approche, en particulier dans le cadre de l'estimation non paramétrique, nous renvoyons à l'ouvrage [45].

À ce stade, il peut être tentant de prendre pour $\mathcal{P}$ l'ensemble $\mathcal{P}(\mathcal{X} \times \mathcal{Y})$ de toutes les lois de probabilités sur $\mathcal{X} \times \mathcal{Y}$ (ou un sous-ensemble très riche et peu restrictif), et pour $\mathcal{F}$ l'ensemble $\mathcal{F}(\mathcal{X}, \mathcal{Y})$ de tous les prédicteurs $\mathcal{X} \longrightarrow \mathcal{Y}$. Malheureusement, si $\mathcal{X}$ est infini (par exemple $\mathcal{X} = [0, 1]$), il n'est pas possible d'obtenir des garanties non triviales avec ce choix : l'excès de risque minimax (4) est alors minoré par une constante indépendante de n (voir par exemple [16, Chapitre 7]). Cela tient au fait que, sans hypothèse additionnelle, la meilleure fonction $f^* : \mathcal{X} \longrightarrow \mathcal{Y}$ peut être arbitrairement complexe, de sorte qu'un échantillon de taille n ne contient que peu d'information sur les valeurs de f^* sur l'entièreté du domaine $\mathcal{X}$.

De cette obstruction, il découle qu'afin d'obtenir des garanties informatives, il est nécessaire de restreindre soit la classe $\mathcal{P}$ des lois de probabilités considérées, soit la classe $\mathcal{F}$ de prédicteurs de comparaison. Le premier choix correspond à une approche de modélisation statistique, qui consiste à supposer que la loi P appartient à un ensemble de lois restreint ou structuré (par exemple, dépendant d'un nombre de paramètres petit devant le nombre d'échantillons n). Cette approche est classique et utile, mais elle ne donne des garanties que lorsque les hypothèses sont satisfaites. Une autre approche, adoptée notamment par Vapnik et Chervonenkis [48], consiste à faire peu d'hypothèses contraignantes sur la loi P des données, mais à restreindre la classe de référence $\mathcal{F}$. Cette approche est plus générale et moins restrictive que la première, et peut-être aussi plus facile à justifier : en effet, le statisticien ne contrôle pas la vraie loi P des données, mais il peut choisir la classe $\mathcal{F}$ de référence. Ces deux approches ne sont toutefois pas incompatibles, et il est courant de restreindre à la fois $\mathcal{F}$ et $\mathcal{P}$ à des degrés divers. De plus, nous verrons dans les sections suivantes que la difficulté du problème dépend souvent peu de l'approche choisie. En revanche, le cas de l'estimation de densité en Section 4 illustrera le fait qu'il est parfois nécessaire de considérer des procédures différentes dans le cadre de la seconde approche afin d'obtenir des garanties optimales.

3 Régression linéaire et queue inférieure de matrices aléatoires

Dans cette section, nous considérons un cas particulier du problème de prédiction défini en Section 2, à savoir la régression linéaire avec design aléatoire. Cela conduit à étudier certaines propriétés de matrices aléatoires. Sauf mention explicite du contraire, les résultats de cette section sont issus de l'article [39].

Nous considérons ici le cas de la *perte carrée* : $\widehat{\mathcal{Y}} = \mathcal{Y} = \mathbf{R}$, et $\ell_{\mathrm{sq}} : \mathbf{R} \times \mathbf{R} \longrightarrow \mathbf{R}$ est définie par $\ell_{\mathrm{sq}}(\hat{y}, y) = (\hat{y} - y)^2$. En outre, la classe de référence $\mathcal{F}$ est supposée être un espace vectoriel de fonctions $\mathcal{X} \longrightarrow \mathbf{R}$ de dimension $d \geq 1$. Quitte à effectuer un changement de variables, on peut supposer que $\mathcal{X} = \mathbf{R}^d$ et que $\mathcal{F}$ est la classe $\mathcal{F}_{\mathrm{lin}} = \{f_\theta : \theta \in \mathbf{R}^d\}$ des fonctions linéaires $f_\theta(x) = \langle \theta, x \rangle$ (où $\langle \cdot, \cdot \rangle$ désigne le produit scalaire usuel sur $\mathbf{R}^d$). On suppose que $\mathbb{E} Y^2 < +\infty$ et $\mathbb{E}\|X\|^2 < +\infty$, auquel cas pour tout $\theta \in \mathbf{R}^d$, le risque

$$L(f_\theta) = \mathbb{E}(\langle \theta, X \rangle - Y)^2$$

est fini. De plus, soit $\Sigma = \mathbb{E} X X^\top$ la matrice de covariance de X. Quitte à se restreindre à un sous-espace de $\mathbf{R}^d$, on peut supposer que Σ est inversible, auquel cas il existe un unique paramètre $\theta^* \in \mathbf{R}^d$ minimisant le risque $L(f_\theta)$, donné par $\theta^* = \Sigma^{-1} \mathbb{E}[Y X]$. On définit l'*erreur* $\varepsilon = Y - \langle \theta^*, X \rangle$, de sorte que $\mathbb{E} \varepsilon X = 0$. Enfin, pour tout $\theta \in \mathbf{R}^d$,

$$L(f_\theta) - \inf_{f \in \mathcal{F}_{\mathrm{lin}}} L(f) = \|\Sigma^{1/2}(\theta - \theta^*)\|^2 = \|\theta - \theta^*\|_\Sigma^2 .$$

Si la régression linéaire est un problème classique, des progrès récents en concentration de la mesure et en analyse non-asymptotique de matrices aléatoires [43, 32, 1, 44, 33, 41] permettent un traitement non-asymptotique fin [23, 46, 4, 7, 27, 41, 34, 8, 39].

Risque minimax, loi des leviers et bornes inférieures. Nous considérons ici le risque minimax pour la régression linéaire, en s'intéressant en particulier à sa dépendance en la loi P_X de la variable X dans $\mathbf{R}^d$. Afin de simplifier les énoncés et d'obtenir des résultats plus précis, nous considérons le cas *bien spécifié*. On pose alors, pour toute loi P_X sur $\mathbf{R}^d$ telle que $\Sigma = \mathbb{E} X X^\top$ existe et est inversible et tout $\sigma > 0$,

$$\mathcal{P}(P_X, \sigma^2) = \left\{ P_{(X,Y)} \, : \, Y = \langle \theta^*, X \rangle + \varepsilon, \ \theta^* \in \mathbf{R}^d, \ \mathbb{E}[\varepsilon | X] = 0, \ \mathbb{E}[\varepsilon^2 | X] \leq \sigma^2 \right\}.$$

Le terme *bien spécifié* renvoie ici au fait que, sous $\mathcal{P}(P_X, \sigma^2)$, la meilleure fonction de prédiction $f_{\mathrm{Bayes}}(x) = \mathbb{E}[Y|X = x]$ (cas particulier de (2)) est linéaire.

Un estimateur classique est celui des *moindres carrés*, qui minimise l'erreur sur le jeu de données D_n : en notant

$$\widehat{\Sigma}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i X_i^\top \tag{5}$$

la *matrice de covariance empirique*, et en supposant cette matrice inversible, on a

$$\widehat{\theta}_n^{\mathrm{mc}} = \operatorname*{arg\,min}_{\theta \in \mathbf{R}^d} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \langle \theta, X_i \rangle)^2 = \widehat{\Sigma}_n^{-1} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i X_i \,. \tag{6}$$

Définition 1

La loi P_X sur $\mathbf{R}^d$ est dite *non dégénérée* si, pour tout hyperplan $H \subset \mathbf{R}^d$, on a $P_X(H) = \mathbb{P}(X \in H) = 0$. Pour tout $n \geq d$, cela revient à dire que $\widehat{\Sigma}_n$ est inversible p.s., c'est-à-dire que l'estimateur des moindres carrés $\widehat{\theta}_n^{\mathrm{mc}}$ est bien défini p.s.

Proposition 1. *Si $n < d$ ou si P_X est dégénérée, alors l'excès de risque minimax $\mathcal{E}_n^*(\ell_{\mathrm{sq}}, \mathcal{F}_{\mathrm{lin}}, \mathcal{P}(P_X, \sigma^2))$ est infini. Sinon, le risque minimax vaut :*

$$\mathcal{E}_n^*(P_X, \sigma^2) = \mathcal{E}_n^*(\ell_{\mathrm{sq}}, \mathcal{F}_{\mathrm{lin}}, \mathcal{P}(P_X, \sigma^2)) = \frac{\sigma^2 \cdot \mathbb{E} \operatorname{Tr}(\Sigma^{1/2} \widehat{\Sigma}_n^{-1} \Sigma^{1/2})}{n} \,. \tag{7}$$

De plus, le risque minimax est atteint par l'estimateur des moindres carrés $\widehat{\theta}_n^{\mathrm{mc}}$.

La Proposition 1 se démontre par des techniques classiques (minoration du risque minimax par le risque bayésien et convergence dominée). Tout d'abord, notons que le risque minimax (7) est invariant par transformation linéaire de X (ce qui est attendu par invariance du problème), nous supposons donc à partir de maintenant que X est isotrope : $\Sigma = \mathbb{E} X X^\top = I_d$. Le fait que le risque minimax soit infini lorsque X est non dégénéré ou $n < d$ provient d'une obstruction élémentaire : sous ces conditions, avec probabilité positive, les observations $X_1, \dots, X_n$ n'engendrent pas tout l'espace $\mathbf{R}^d$. Dans ce cas, il est impossible d'estimer la composante du paramètre orthogonale à l'espace engendrée par les X_i ; en revanche, cette composante peut-être arbitrairement grande, de sorte que l'on commet ainsi une erreur qui peut être arbitrairement élevée[3]. Notons enfin que, même lorsque l'excès de risque minimax (sur la classe linéaire) est infini, en particulier lorsque $n < d$, il est possible d'obtenir un faible risque minimax sur des sous-ensembles de $\mathbf{R}^d$ comme les boules ℓ^p, sous certaines conditions.

Le risque minimax pouvant être infini pour certaines lois P_X, il est naturel de se demander à quel point il peut être faible, et pour quelles lois P_X. La Proposition 1 donne une première borne inférieure qualitative : le risque minimax est infini si $n < d$. Par ailleurs, il est possible d'obtenir une borne inférieure quantitative pour $n \geq d$, valable pour toute loi de X, à partir de (7) : par convexité de l'application $A \mapsto \mathrm{Tr}(A^{-1})$ sur le cône des matrices positives, et comme $\mathbb{E}[\widehat{\Sigma}_n] = I_d$,

$$\mathcal{E}_n^*(P_X, \sigma^2) = \frac{\sigma^2 \cdot \mathbb{E}\,\mathrm{Tr}(\widehat{\Sigma}_n^{-1})}{n} \geq \frac{\sigma^2 \cdot \mathrm{Tr}(\mathbb{E}[\widehat{\Sigma}_n]^{-1})}{n} = \frac{\sigma^2 d}{n}.$$

On peut comparer cette borne inférieure au risque minimax pour la loi gaussienne $P_X = \mathcal{N}(0, I_d)$; dans ce cas, la matrice $\widehat{\Sigma}_n^{-1}$ suit une loi de Wishart inverse, dont l'espérance est connue. On a alors (par exemple, [5]) :

$$\mathcal{E}_n^*(\mathcal{N}(0, I_d), \sigma^2) = \frac{\sigma^2 d}{n - d - 1}. \tag{8}$$

Ainsi, la borne inférieure de $\sigma^2 d/n$ est dans ce cas du bon ordre de grandeur lorsque $n \gtrsim d$, et même équivalente au risque minimax lorsque $d/n \longrightarrow 0$. En revanche, lorsque $d, n \longrightarrow \infty$ avec $d/n \longrightarrow \gamma \in (0,1)$ (on parle parfois de régime asymptotique de grande dimension, voir par exemple [18]), les deux valeurs limites ne coïncident pas. Il est en fait possible de raffiner la borne inférieure précédente, en utilisant le fait que $\widehat{\Sigma}_n$ est une somme de matrices i.i.d. de rang 1.

Afin d'énoncer le résultat, nous avons besoin d'une définition supplémentaire. Étant donnés $X_1, \dots, X_n$ (tels que $\widehat{\Sigma}_n$ est inversible) et $x \in \mathbf{R}^d$, on note

$$h_n(x) = \left\langle \Big(\sum_{i=1}^n X_i X_i^\top + x x^\top \Big)^{-1} x, x \right\rangle \in [0,1) \tag{9}$$

le *levier* de x au sein du jeu de données $X_1, \dots, X_n, x$. Le levier de x quantifie l'influence de la réponse y associée à x sur la prédiction de l'estimateur des moindres carrés : plus précisément, en notant $\hat{\theta}_n^{\mathrm{mc}}(x,y)$ l'estimateur des moindres carrés sur le jeu de données $D_n \cup \{(x,y)\}$, la prédiction $\langle \hat{\theta}_n^{\mathrm{mc}}(x,y), x \rangle$ en x est une fonction affine de y dont la pente vaut $h_n(x)$. Enfin, on note $h_{n+1} = h_n(X_{n+1})$ où X_{n+1} est un échantillon indépendant de loi P_X.

3. Cette intuition ne suffit pas tout à fait à conclure rigoureusement, car l'espace engendré par les X_i, à l'inverse de θ^*, est aléatoire.

Proposition 2. *Si $n \geq d$, alors pour toute loi P_X non dégénérée, on a :*

$$\mathcal{E}_n^*(P_X, \sigma^2) = \mathbb{E}\Big[\frac{h_{n+1}}{1 - h_{n+1}}\Big] \geq \frac{\sigma^2 d}{n - d + 1} \,. \tag{10}$$

La Proposition 2 indique que le risque minimax est déterminé par la loi des leviers h_{n+1} (dans un échantillon de taille $n+1$ tiré selon P_X). Intuitivement, plus les leviers sont « dispersés » ou inhomogènes, plus le risque minimax est élevé (par convexité de la fonction $x \mapsto x/(1-x)$). Cela correspond au fait que la difficulté de prédire en un point x est caractérisée par le levier $h_n(x)$, la présence de points ayant un fort levier implique donc que le problème est intrinsèquement plus difficile.

La borne inférieure (10), valable pour toute loi P_X, est proche du risque (8) obtenu dans le cas gaussien. En particulier, dans le régime $n, d \longrightarrow \infty$ avec $d/n \longrightarrow \gamma \in (0,1)$, les deux quantités convergent vers le même nombre $\sigma^2\gamma/(1-\gamma)$. Ainsi, la loi gaussienne est asymptotiquement la loi la plus favorable de X en grande dimension. De plus, la caractérisation de la Proposition 2 permet d'expliquer cela : si pour une suite de lois $(P_X^{(n)})$ sur $\mathbf{R}^{d_n}$ avec $d_n \longrightarrow \gamma$, le risque minimax converge la valeur minimale $\sigma^2\gamma/(1-\gamma)$, alors la loi du levier h_{n+1} d'un échantillon converge vers une constante (égale à γ). C'est donc le cas de la loi gaussienne, pour laquelle tous les points ont asymptotiquement le même levier γ.

Il serait intéressant de déterminer la loi extrémale P_X minimisant le risque minimax $\mathcal{E}_n^*(P_X, \sigma^2)$, de manière non-asymptotique avec $n \geq d \geq 1$ fixés. Il n'est pas difficile de montrer, à partir de la formule (7) et de la convexité de $A \mapsto \mathrm{Tr}(A^{-1})$, que la loi uniforme sur la sphère $\sqrt{d}S^{d-1}$ (où S^{d-1} est la sphère de $\mathbf{R}^d$ pour la norme ℓ^2) minimise $\mathcal{E}_n^*(P_X, \sigma^2)$ au sein des lois invariantes par rotation (qui contient la loi gaussienne). Cependant, il n'est pas trivial de démontrer qu'une loi P_X extrémale est invariante par rotation ; il suffirait pour cela (par un argument d'invariance) de montrer que la fonction $P_X \mapsto \mathcal{E}_n^*(P_X, \sigma^2)$ est convexe, mais cela conduit à vérifier des inégalités matricielles non triviales.

Notons pour finir qu'une version plus générale de la borne inférieure (10) est disponible [38, Chapitre 8]. Celle-ci affirme que, pour tout vecteur aléatoire X isotrope ($\mathbb{E}XX^\top = I_d$), tous $n \geq d$ et $\lambda > 0$, on a :

$$\frac{1}{d}\,\mathbb{E}\,\mathrm{Tr}\left\{(\widehat{\Sigma}_n + \lambda I_d)^{-1}\right\} \geq \frac{-(1 - d + \lambda n) + \sqrt{(1 - d + \lambda n)^2 + 4\lambda d n}}{2\lambda d} \,. \tag{11}$$

De plus, cette inégalité est asymptotiquement fine : si $d, n \longrightarrow \infty$ avec $d/n \longrightarrow \gamma \in (0,1)$, alors les deux termes de l'inégalité (11) convergent vers la même fonction de λ, γ. Il s'agit d'une conséquence de la loi de Marchenko-Pastur [36] décrivant le spectre asymptotique de matrices de covariances de vecteurs gaussiens.

La borne inférieure (11) affirme que la loi de Marchenko-Pastur, bien que non valide pour des vecteurs aléatoires X isotropes quelconques, fournit une borne inférieure dans le cas général. Notons enfin que le membre de gauche de (11) est aussi relié à une quantité statistique pour la régression linéaire, à savoir le risque optimal (bayésien) lorsque le paramètre θ^* est aléatoire et tiré selon la loi $\mathcal{N}(0, (\lambda n)^{-1} I_d)$.

Queue inférieure de matrices aléatoires et bornes de risque. L'expression (7) indique la dépendance du risque minimax en la loi de X, à travers la quantité $\mathbb{E}\,\mathrm{Tr}(\widehat{\Sigma}_n^{-1})$. En particulier, majorer le risque minimax revient à majorer $\mathbb{E}\,\mathrm{Tr}(\widehat{\Sigma}_n^{-1})$, donc à contrôler la queue *inférieure* de $\widehat{\Sigma}_n$. Il est important de relever qu'il n'est pas nécessaire de contrôler la queue supérieure de $\widehat{\Sigma}_n$, par exemple en majorant la norme d'opérateur $\|\widehat{\Sigma}_n - I_d\|_{\mathrm{op}}$ ou la plus grande valeur propre $\lambda_{\max}(\widehat{\Sigma}_n)$, mais seulement la trace $\mathrm{Tr}(\widehat{\Sigma}_n^{-1})$ et la plus petite valeur propre $\lambda_{\min}(\widehat{\Sigma}_n)$. Cette distinction est importante, car il est possible de contrôler la queue inférieure d'une matrice aléatoire sous des hypothèses bien plus faibles que la queue supérieure. Ce fait, établi dans une suite de travaux récents [44, 41, 33], tient au fait que la matrice $XX^\top$ est toujours positive, donc bornée à gauche, bien que des idées techniques supplémentaires soient nécessaires pour exploiter cette intuition.

Le résultat suivant, dû à Oliveira [41], permet d'illustrer ce fait. Soit X une variable aléatoire avec $\mathbb{E}XX^\top = I_d$, c'est-à-dire que $\mathbb{E}\langle\theta, X\rangle^2 = \|\theta\|^2$ pour tout $\theta \in \mathbf{R}^d$. On suppose que $\mathbb{E}\|X\|^4 < +\infty$, et l'on pose

$$\kappa_* = \sup\left\{\mathbb{E}\langle\theta, X\rangle^4 \,:\, \theta \in \mathbf{R}^d, \|\theta\| \leq 1\right\}, \tag{12}$$

de sorte que $\|\langle\theta, X\rangle\|_{L^4} \leq \kappa_*^{1/4}\|\langle\theta, X\rangle\|_{L^2}$ pour tout $\theta \in \mathbf{R}^d$. Par exemple, si $X \sim \mathcal{N}(0, I_d)$, on a $\kappa_* = 3$.

Théorème 1 : Oliveira [41]

Sous les hypothèses précédentes, on a pour tout $\delta > 0$:

$$\mathbb{P}\left(\lambda_{\min}(\widehat{\Sigma}_n) \leq 1 - 9\kappa_*^{1/2}\sqrt{\frac{d + 2\log(2/\delta)}{n}}\right) \leq \delta. \tag{13}$$

Il découle de résultats classiques sur les matrices aléatoires que cette borne est optimale (aux constantes près) dans le cas gaussien, pour $\delta \in (0, e^{-cn})$. En revanche, elle est valable sans hypothèses de moments fortes (seulement 4 moments), et donc aussi pour des variables à queues lourdes. Sous ces hypothèses, on ne peut pas espérer un contrôle similaire de la queue supérieure de $\widehat{\Sigma}_n$, puisqu'il existe une loi telle que $\kappa_* \leq c$ et $\mathbb{E}\|\widehat{\Sigma}_n - I_d\|_{\mathrm{op}} \gtrsim c^{-1} d/\sqrt{n}$ (prendre $X = UZ$ avec $Z \sim \mathcal{N}(0, I_d)$ et U scalaire indépendante de Z avec $\mathbb{E}U^2 = 1$ mais à queue lourde sous contrainte de moment d'ordre 4, et minorer $\mathbb{E}\|\widehat{\Sigma}_n - I_d\|_{\mathrm{op}} \geq \mathbb{E}\|\widehat{\Sigma}_n\|_{\mathrm{op}} - 1 \geq \mathbb{E}\max_{i \leq n} \|X_i\|^2 - 1$).

Le risque minimax (7) fait intervenir $\mathbb{E}\,\mathrm{Tr}(\widehat{\Sigma}_n^{-1}) \geq \mathbb{E}\lambda_{\min}(\widehat{\Sigma}_n)^{-1}$, et donc des moments inférieurs de $\widehat{\Sigma}_n$. La borne (13) ne suffit pas à contrôler de telles quantités, car il est nécessaire de contrôler la queue inférieure

$$\mathbb{P}(\lambda_{\min}(\widehat{\Sigma}_n) \leq t) \tag{14}$$

pour tout $t \in (0, 1 - C\sqrt{d/n})$. La borne (13) fournit un contrôle précis de la queue (14) pour $t \in (c, 1 - C\sqrt{d/n})$, mais pas pour $t \in (0, c)$ (où c, C sont des constantes absolues). Cela n'est pas surprenant, car le contrôle de $\lambda_{\min}(\widehat{\Sigma}_n)$ dans ce régime requiert des conditions différentes sur la loi de X; par exemple, la loi P_X uniforme sur $\{-1, 1\}^d$ satisfait $\kappa_* = O(1)$, mais est dégénérée (au sens de la Définition 3) de sorte que $\mathbb{P}(\lambda_{\min}(\widehat{\Sigma}_n) = 0) > 0$ et $\mathcal{E}_n^*(P_X, \sigma^2) = +\infty$. Afin d'obtenir un contrôle sur la queue (14) pour $t \in (0, c)$, une version quantitative de l'hypothèse 3 de non-dégénérescence est requise.

Hypothèse 1 (Petite boule)**.** Il existe des constantes $c > 0$ et $\alpha \in (0, 1]$ telles que, pour tout hyperplan $H \subset \mathbf{R}^d$ et tout $t \in (0, 1)$,

$$\mathbb{P}(\mathrm{dist}(X, H) \leq t) \leq (ct)^\alpha . \tag{15}$$

De manière équivalente, $\mathbb{P}(|\langle \theta, X \rangle| \leq t) \leq ct$ pour tout $\theta \in S^{d-1}$.

Le résultat suivant décrit la meilleure borne possible sur la queue inférieure (14) pour t petit, et montre que l'hypothèse 1 est nécessaire pour obtenir un tel contrôle.

Proposition 3. *Soit $d \geq 2$, et X un vecteur aléatoire dans $\mathbf{R}^d$ tel que $\mathbb{E}XX^\top = I_d$. Alors, pour tout $t \leq 1$,*

$$\sup_{\theta \in S^{d-1}} \mathbb{P}(|\langle \theta, X \rangle| \leq t) \geq 0.16 \cdot t ,$$
$$\mathbb{P}\big(\lambda_{\min}(\widehat{\Sigma}_n) \leq t\big) \geq (0.025 \cdot t)^{n/2} .$$

Enfin, s'il existe des constantes $c_1, c_2 > 0$ telles que $\mathbb{P}(\lambda_{\min}(\widehat{\Sigma}_n) \leq t) \leq (c_1 t)^{c_2 n}$, alors X satisfait l'hypothèse 1 avec $c = \sqrt{c_1}$ et $\alpha = 2c_2$.

Il reste à montrer que l'hypothèse 1 est également suffisante pour obtenir la queue inférieure souhaitée. C'est ce qu'affirme l'énoncé suivant :

Théorème 2

Si X satisfait l'hypothèse 1 et si $n \geq 6d/\alpha$, alors en notant $C = 3c^4 e^{1+9/\alpha}$, on a pour tout $t \in (0,1)$

$$\mathbb{P}\big(\lambda_{\min}(\widehat{\Sigma}_n) \leq t\big) \leq (Ct)^{\alpha n/6} . \tag{16}$$

La preuve de ce résultat est inspirée de celle du Théorème 3 par Oliveira [41], avec certaines différences spécifiques au cas où t est arbitrairement petit. Tout d'abord, $\lambda_{\min}(\widehat{\Sigma}_n)$ s'exprime naturellement comme l'infimum d'un processus stochastique :

$$\lambda_{\min}(\widehat{\Sigma}_n) = \inf_{\theta \in \mathbf{R}^d} \left\{ \langle \widehat{\Sigma}_n \theta, \theta \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \langle \theta, X_i \rangle^2 \right\}. \tag{17}$$

Il serait alors naturel de raisonner de la façon suivante (qui fonctionne effectivement lorsque X possède des queues très légères, comparables à celles d'une loi gaussienne). Tout d'abord, on considère un sous-ensemble fini $A \subset S^{d-1}$ tel que tout élément de S^{d-1} est à distance au plus t de A ; on peut alors choisir A de sorte que $|A| \leq (3/t)^d$. À partir de l'hypothèse 1 et par des arguments classiques sur les sommes de variables indépendantes, on montre que pour tout $\theta \in A$, $\mathbb{P}(n^{-1} \sum_{i=1}^n \langle \theta, X_i \rangle^2 \leq 10t) \leq (c_1 t)^{c_2 n}$. Par une borne d'union sur A, on en déduit que $\mathbb{P}(\inf_{\theta \in A} n^{-1} \sum_{i=1}^n \langle \theta, X_i \rangle^2 \leq 10t) \leq (3/t)^d (c_1 t)^{c_2 n} \leq (c_3 t)^{c_4 n}$ pourvu que $n \gtrsim d$. Enfin, on étend la borne inférieure sur A à S^{d-1} par approximation.

Cet argument ne fonctionne pas ici, car la dernière étape d'approximation fait naturellement intervenir la plus grande valeur propre de $\widehat{\Sigma}_n$: en effet, étant donné $\theta \in S^{d-1}$ et $\theta' \in A$ tel que $\|\theta - \theta'\| \leq t$, on utilise que $|\langle \widehat{\Sigma}_n \theta, \theta \rangle - \langle \Sigma_n \theta', \theta' \rangle| \lesssim \lambda_{\max}(\widehat{\Sigma}_n) \cdot t$. Malheureusement, l'hypothèse 1 (qui n'implique l'existence d'aucun moment d'ordre $2+\varepsilon$) est bien trop faible pour obtenir un contrôle satisfaisant sur $\lambda_{\max}(\widehat{\Sigma}_n)$ pour $n \gtrsim d$, comme indiqué précédemment. Afin de contourner cette difficulté, l'approximation par une discrétisation finie A de S^{d-1} doit être remplacée par un autre argument. L'idée consiste à approcher, pour tout θ, la quantité $\langle \widehat{\Sigma}_n \theta, \theta \rangle$ par sa moyenne sur un petit voisinage de θ, à savoir une calotte sphérique centrée en θ. Il est alors possible de contrôler uniformément les moyennes locales par une technique spécifique, à savoir l'inégalité dite « PAC-Bayésienne » introduite par McAllester [37] dans le contexte de l'apprentissage statistique, et développée par Audibert et Catoni [9, 2] dans le cadre de l'estimation robuste. Le gain est que le terme d'approximation est une moyenne uniforme sur toutes les directions possibles (car la perturbation est centrée en θ et « isotrope »), et fait donc intervenir la quantité $\frac{1}{d}\,\mathrm{Tr}(\widehat{\Sigma}_n)$ au lieu de $\lambda_{\max}(\widehat{\Sigma}_n)$. La première quantité peut alors se contrôler facilement par un argument additionnel de troncature de X.

Ces résultats permettent d'obtenir des bornes pour la régression linéaire. Tout d'abord, afin d'obtenir des bornes fines, nous introduisons un autre paramètre de kurtosis que κ_* :

$$\tilde{\kappa} = \frac{\mathbb{E}\|X\|^4}{d^2} . \tag{18}$$

On a toujours $\tilde{\kappa} \leq \kappa^*$, mais il est possible que $\tilde{\kappa} \ll \kappa^*$. En effet, si X est uniforme sur l'ensemble $\{\sqrt{d} e_j \ : \ 1 \leq j \leq d\}$ (où $(e_j)_{1 \leq j \leq d}$ est la base usuelle de $\mathbf{R}^d$), on a $\tilde{\kappa} = 1$ tandis que $\kappa_* = d$.

THÉORÈME 3

Pour toute loi P_X satisfaisant l'hypothèse 1 et telle que $\tilde{\kappa} < \infty$, en notant $C = 28c^4 e^{1+9/\alpha}$ on a pour $n \geq \max(6d, 12 \log(12\alpha^{-1}))/\alpha$:

$$\frac{\sigma^2 d}{n} \leq \mathcal{E}_n^*(P_X, \sigma^2) \leq \frac{\sigma^2 d}{n}\left(1 + \frac{C \tilde{\kappa}\, d}{n}\right). \tag{19}$$

Dans le cas général mal spécifié (où $P \notin \mathcal{P}(P_X, \sigma^2)$), en notant $\theta^* = \arg\min_{\theta \in \mathbf{R}^d} L(f_\theta)$ et en supposant que

$$\chi = \mathbb{E}\left[(Y - \langle \theta^*, X\rangle)^4 \|X\|^4\right] / d^2$$

est fini, on a pour $n \geq \max(96, 6d)/\alpha$,

$$\mathcal{E}_P(\hat{\theta}_n^{\mathrm{mc}}) \leq \frac{1}{n}\mathbb{E}\left[(Y - \langle \theta^*, X\rangle)^2 \|X\|^2\right] + 276 C^2 \sqrt{\kappa_* \chi} \left(\frac{d}{n}\right)^{3/2} . \tag{20}$$

Dans les équations (19) et (20), on vérifie par des calculs heuristiques asymptotiques (en faisant tendre $n \longrightarrow \infty$ et en fixant P) que ces bornes sont fines dans ce régime, et décrivent donc bien le risque minimax et le risque dans le cas mal spécifié. Notons que la borne (19) dans le cas bien spécifié, qui repose sur une analyse directe, fait apparaître la constante de kurtosis $\tilde{\kappa}$, tandis que la borne (20) dans le cas mal spécifié, qui utilise le Théorème 3, fait apparaître la constante plus élevée κ_*.

4 Estimation de densité et régression logistique

Estimation de densité conditionnelle. Dans cette section, nous considérons un autre problème d'apprentissage statistique, à savoir l'*estimation de densité conditionnelle*. Dans ce problème, on cherche non pas (comme dans le cas de la régression avec perte carrée) à effectuer une prédiction *ponctuelle* de la réponse (en cherchant à prédire une valeur proche), mais plutôt une prédiction *probabiliste* attribuant des probabilités aux différentes valeurs possibles de la réponse, en cherchant à attribuer la probabilité la plus élevée possible à celle-ci.

Formellement, soient $\mathcal{X}$ et $\mathcal{Y}$ deux ensembles (espaces mesurables), et μ une mesure de référence sur $\mathcal{Y}$. L'espace $\widehat{\mathcal{Y}}$ des prédictions (voir la Section 2) est ici l'ensemble des densités de probabilités sur $\mathcal{Y}$ par rapport à μ. On définit la *perte logarithmique* (aussi appelée *perte entropique* ou *logistique*) $\ell : \widehat{\mathcal{Y}} \times \mathcal{Y} \longrightarrow \mathbf{R}$ par :

$$\ell(h, y) = -\log h(y) \qquad (h \in \widehat{\mathcal{Y}},\ y \in \mathcal{Y})\,. \tag{21}$$

Cette fonction de perte est couramment utilisée en théorie de l'information, car elle admet une interprétation en termes de codage et de compression de données [14, Chapitre 5]. En effet, si $\mathcal{Y}$ est un ensemble fini et h une mesure de probabilités sur $\mathcal{Y}$, il existe une façon de coder chaque élément $y \in \mathcal{Y}$ avec $\lceil -\log_2 h(y) \rceil$ bits, ce qui établit une correspondance entre les « codes » sur $\mathcal{Y}$ et les densités de probabilités. En ignorant la partie entière (ce qui change peu de choses dans le cas d'ensembles $\mathcal{Y}$ riches), la perte logarithmique (21) correspond donc à la longueur du code donné par h associé à $y \in \mathcal{Y}$.

Un prédicteur est ici une fonction $f : \mathcal{X} \longrightarrow \widehat{\mathcal{Y}}$ associant à tout $x \in \mathcal{X}$ une densité $f(x) \in \widehat{\mathcal{Y}}$ sur $\mathcal{Y}$, c'est-à-dire une *densité conditionnelle*. Pour $x \in \mathcal{X}$ et $y \in \mathcal{Y}$, on note $f(y|x) = f(x)(y)$, de sorte que la perte de la densité conditionnelle f sur l'échantillon $z = (x, y)$ s'écrit $\ell(f, z) = -\log f(y|x)$, et si $(X, Y) \sim P$, le risque de f vaut $L(f) = -\mathbb{E} \log f(Y|X)$. Le choix de la mesure de référence μ n'affecte le risque $L(f)$ que par une constante additive indépendante de f, de sorte que la différence

$$L(g) - L(f) = \mathbb{E} \log\left(\frac{f(Y|X)}{g(Y|X)}\right)$$

ne dépend pas du choix de μ. En notant $P_X^f = f \cdot (P_X \otimes \mu)$ la loi $f(y|x) P_X(\mathrm{d}\,x) \mu(\mathrm{d}\,y)$ sur $\mathcal{X} \times \mathcal{Y}$, et en supposant que la loi conditionnelle de Y sachant X admette une densité conditionnelle f^* par rapport à μ (*i.e.*, $P = P_X^{f^*}$), on a pour tout f,

$$L(f) - L(f^*) = \int_{\mathcal{X}\times\mathcal{Y}} \log\left(\frac{f^*(y|x)}{f(y|x)}\right) f^*(y|x) P_X(\mathrm{d}\,x)\mu(\mathrm{d}\,y) = \mathrm{KL}(P, P_X^f) \geq 0 \tag{22}$$

où $\mathrm{KL}(P, Q) = \int \log(\frac{\mathrm{d}\,P}{\mathrm{d}\,Q})\,\mathrm{d}\,P$ est la *divergence de Kullback-Leibler* (ou *entropie relative*) entre P et Q. Il en découle que le prédicteur de Bayes (2) f_{Bayes} n'est autre que la densité conditionnelle de Y sachant X, et que l'excès de risque est donné par la divergence de Kullback-Leibler.

Comme en Section 2, on se donne une classe $\mathcal{F}$ de prédicteurs (ici, de densités conditionnelles), c'est-à-dire un *modèle statistique* (conditionnel). Deux approches sont alors possibles. La première consiste à supposer que la vraie densité conditionnelle de Y sachant X appartient à $\mathcal{F}$; on dit alors que le modèle est *bien spécifié*. La seconde approche, moins restrictive, consiste à faire peu d'hypothèses sur la loi de $Y|X$ et à chercher une densité conditionnelle dont les performances prédictives sont proches de la meilleure densité de $\mathcal{F}$. On dit alors que le modèle est *mal spécifié*, et c'est à cette seconde configuration que nous nous intéresserons.

L'estimateur du maximum de vraisemblance. L'estimateur le plus classique est l'*estimateur du maximum de vraisemblance* (EMV), qui minimise l'erreur empirique :

$$\hat{f}_n^{\mathrm{emv}} = \operatorname*{arg\,min}_{f \in \mathcal{F}} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \ell(f, (X_i, Y_i)) \right\} = \operatorname*{arg\,max}_{f \in \mathcal{F}} \left\{ \prod_{i=1}^{n} f(Y_i | X_i) \right\}. \tag{23}$$

En d'autres termes, l'EMV choisit la densité qui maximise la probabilité/densité conditionnelle attribuée aux données (aux réponses).

Pour simplifier, l'EMV tend à avoir de bonnes performances lorsque le modèle $\mathcal{F}$ est bien spécifié et suffisamment peu complexe (par rapport à la taille n de l'échantillon). Par exemple, si $\mathcal{F} = \{f_\theta : \theta \in \Theta\}$ est paramétrée de façon suffisamment régulière par un paramètre $\theta \in \Theta \subset \mathbf{R}^d$ et si $n \gg d$, l'EMV admet (sous certaines conditions) un excès de risque d'ordre $O(d/n)$, ce qui est optimal.

En revanche, même pour une classe $\mathcal{F}$ de la forme précédente, les performances de l'EMV peuvent se dégrader significativement dans le cas mal spécifié, et l'excès de risque peut être bien plus élevé que $O(d/n)$. De plus, cette sensibilité au caractère mal spécifié n'est pas spécifique à l'EMV, mais est souvent partagée par tout estimateur qui sélectionne un élément $\hat{f}_n$ de la classe de référence $\mathcal{F}$. Cette obstruction, essentiellement due à un défaut de convexité, est bien connue dans le cadre de l'agrégation de modèles [10, 28]. Nous verrons des exemples de ce phénomène dans le cas du modèle linéaire gaussien et du modèle logistique.

Agrégation par mélange bayésien. Une approche classique en estimation de densité (et en agrégation de modèles) est l'agrégation par mélange bayésien. L'idée consiste à « convexifier » le problème, en se plaçant sur l'espace des mesures de probabilités sur la classe $\mathcal{F}$. Plus précisément, en notant $\mathcal{F} = \{f_\theta : \theta \in \Theta\}$, on se donne une mesure de probabilités π sur l'espace Θ des paramètres, appelée *loi a priori*. On définit alors pour $i = 0, \dots, n$ le postérieur $\hat{\rho}_i$, qui est la loi de probabilités sur Θ telle que

$$\frac{\mathrm{d}\,\hat{\rho}_i}{\mathrm{d}\,\pi}(\theta) = \frac{\prod_{j\le i} f_\theta(Y_j|X_j)}{\int_\Theta \prod_{j\le i} f_\vartheta(Y_j|X_j)\pi(\mathrm{d}\,\vartheta)}\,. \tag{24}$$

Le prédicteur agrégé $\hat{f}_n$, introduit et analysé par [3, 10, 50] (voir aussi [49, 35]), est donné par la moyenne des postérieurs prédictifs :

$$\hat{f}_n(y|x) = \frac{1}{n+1}\sum_{i=0}^{n}\int_\Theta f_\theta(y|x)\hat{\rho}_i(\mathrm{d}\,\theta)\,. \tag{25}$$

L'agrégation par mélange bayésien admet des garanties théoriques intéressantes : elle satisfait des bornes d'excès de risque qui ne se dégradent pas dans le cas mal spécifié. Dans le cas où f_θ dépend de manière suffisamment régulière de $\theta \in \Theta \subset \mathbf{R}^d$, en choisissant par exemple π uniforme sur Θ (en supposant Θ borné), on peut montrer que la procédure (25) satisfait une borne d'excès de risque en espérance de la forme $\mathcal{E}(\hat{f}_n) \lesssim d\log(n\cdot\mathrm{diam}(\Theta))/n$, où $\mathrm{diam}(\Theta)$ est le diamètre de Θ. Une telle garantie est remarquable, car valable sous des hypothèses faibles. En revanche, cette approche ne permet pas de traiter le cas où Θ est non borné, comme pour le modèle linéaire gaussien (voir plus bas) ; de plus, la borne contient un terme en $\log n$ supplémentaire, par rapport à une borne idéale en $O(d/n)$. Surtout, d'un point de vue computationnel, $\hat{f}_n$ requiert d'évaluer les postérieurs (24). Ainsi, le calcul approché du dénominateur de (24) se ramène à une tâche d'échantillonnage, ce qui est relativement coûteux.

Un estimateur alternatif. Nous décrivons une autre procédure pour l'estimation de densité conditionnelle, introduite dans [40] dont sont issus les résultats suivants. Cette procédure minimise une borne générale de risque fondée sur des arguments d'échangeabilité et de stabilité. Ce type d'argument a été utilisé dans de nombreux contextes en apprentissage statistique, voir par exemple [48, 17, 25].

Étant donné un jeu de données i.i.d. D_n et un échantillon « virtuel » $(x,y) \in \mathcal{X}\times\mathcal{Y}$, on note $\hat{f}_n^{(x,y)}$ l'EMV sur le jeu de données augmenté $D_n \cup (x,y)$.

Théorème 4

Pour tout estimateur $\hat{g}_n$ et toute loi P sur $\mathcal{X}\times\mathcal{Y}$, on a :

$$\mathcal{E}(\hat{g}_n) \le \mathbb{E}_{D_n,X}\Big[\sup_{y\in\mathcal{Y}}\Big\{\ell(\hat{g}_n(X),y) - \ell(\hat{f}_n^{(X,y)}(X),y)\Big\}\Big]\,. \tag{26}$$

La borne (26) est minimisée en prenant $\hat{g}_n = \tilde{f}_n$, où

$$\tilde{f}_n(y|x) = \frac{\hat{f}_n^{(x,y)}(y|x)}{\int_{\mathcal{Y}} \hat{f}_n^{(x,y')}(y'|x)\mu(\mathrm{d}\, y')} \,. \tag{27}$$

De plus, dans ce cas la borne (26) s'écrit :

$$\mathcal{E}(\tilde{f}_n) \leq \mathbb{E}_{D_n,X}\Big[\log\Big(\int_{\mathcal{Y}} \hat{f}_n^{(X,y)}(y|X)\mu(\mathrm{d}\, y) \Big) \Big] \,. \tag{28}$$

Nous allons appliquer l'estimateur (27) et étudier les bornes correspondantes, pour deux modèles classiques : le modèle linéaire gaussien (pour une réponse appartenant à $\mathcal{Y} = \mathbf{R}$) et le modèle logistique (pour une réponse binaire, soit $\mathcal{Y} = \{-1, 1\}$).

Modèle linéaire gaussien. On suppose ici que $\mathcal{X} = \mathbf{R}^d$ et que $\mathcal{F} = \{f_\theta : \theta \in \Theta\}$, où $f_\theta(y|x) = \exp(-(y - \langle\theta, x\rangle)^2/2)$ est la densité de la loi gaussienne $\mathcal{N}(\langle\theta, x\rangle, 1)$ par rapport à la mesure de Lebesgue $\mu(\mathrm{d}\, y) = \mathrm{d}\, y/\sqrt{2\pi}$. Dans ce cas, la perte logarithmique s'écrit

$$\ell(f_\theta, (x, y)) = -\log f_\theta(y|x) = \frac{1}{2}(y - \langle\theta, x\rangle)^2 \,, \tag{29}$$

ce qui coïncide (au facteur 1/2 près) avec la perte de la régression linéaire considérée en Section 3. En particulier, $L(f_\theta) = \mathbb{E}(Y - \langle\theta, X\rangle)^2$, et l'EMV $\hat{\theta}_n^{\mathrm{emv}}$ est simplement l'estimateur des moindres carrés $\hat{\theta}_n^{\mathrm{mc}}$. Ainsi, pour les estimateurs de la forme $\hat{f}_n = f_{\hat{\theta}_n} \in \mathcal{F}$ (qui choisissent une densité appartenant à la classe $\mathcal{F}$), le problème de l'estimation de densité est équivalent à celui de la régression linéaire.

Il découle alors des Propositions 1 et 2 que, dans le cas *bien spécifié*, l'estimateur minimax parmi les estimateurs à valeurs dans $\mathcal{F}$ est l'EMV $\hat{f}_n^{\mathrm{emv}}(y|x) = \mathcal{N}(\langle\hat{\theta}_n^{\mathrm{mc}}, x\rangle, 1)$, dont le risque vaut (lorsque $n \geq d$ et P_X est non dégénérée, avec les notations de la Section 3)

$$\mathcal{E}(\hat{f}_n^{\mathrm{emv}}) = \frac{\mathbb{E}[\mathrm{Tr}(\Sigma^{1/2}\widehat{\Sigma}_n^{-1}\Sigma^{1/2})]}{2n} = \frac{1}{2}\,\mathbb{E}\Big[\frac{h_{n+1}}{1 - h_{n+1}}\Big] .$$

Toujours dans le cas bien spécifié, il est possible de considérer le risque minimax parmi tous les estimateurs $\hat{f}_n$ (pouvant prendre des valeurs hors de $\mathcal{F}$). Dans ce cas, on montre de manière similaire que le risque minimax est infini si $n < d$ ou si P_X est dégénérée, et que sinon le risque minimax (bien spécifié) vaut

$$\mathcal{E}_n^*(\ell, \mathcal{F}, P_X \otimes \mathcal{F}) = -\frac{1}{2}\log\left(1 - h_{n+1}\right) \leq \frac{1}{2}\mathbb{E}\log\Big(1 + \mathrm{Tr}(\Sigma^{1/2}\widehat{\Sigma}_n^{-1}\Sigma^{1/2})\Big) \,, \tag{30}$$

qui est également caractérisé par la loi du levier h_{n+1} et contrôlé par la queue inférieure de $\widehat{\Sigma}_n$. Lorsque $n \gg d$ et sous les conditions du Théorème 3, les deux expressions ci-dessous sont essentiellement équivalentes et d'ordre $d/(2n)$. Notons cependant que si $P_X = \mathcal{N}(0, \Sigma)$ et dans le régime asymptotique $n, d \longrightarrow \infty$ avec $d/n \longrightarrow \gamma \in (0,1)$, le risque optimal (30) converge vers $-\frac{1}{2}\log(1-\gamma) < \frac{1}{2}\gamma/(1-\gamma)$, et l'on obtient donc un gain à considérer des estimateurs non restreints à $\mathcal{F}$ [38, Chapitre 8].

En revanche, la performance de l'EMV est sensible au caractère mal spécifié du modèle, c'est-à-dire à la loi de l'erreur $\varepsilon = Y - \langle \theta^*, X\rangle$ où $\theta^* = \arg\min_{\theta \in \mathbf{R}^d} L(f_\theta)$. (Le cas bien spécifié correspond au cas où ε est indépendante de X et de loi $\mathcal{N}(0,1)$.) En effet, le Théorème 3 donne dans ce cas que (sous des hypothèses convenables) $\mathcal{E}(\hat{\theta}_n^{\mathrm{emv}}) \lesssim \mathbb{E}[\varepsilon^2 \|\Sigma^{-1/2} X\|^2]/n$, qui peut être arbitrairement plus élevé que d/n lorsque $\mathbb{E}\,\varepsilon^2\|\Sigma^{-1/2}X\|^2 \gg d$.

Théorème 5

L'estimateur $\tilde{f}_n$ défini par (27) s'écrit, pour le modèle linéaire gaussien,

$$\tilde{f}_n(y|x) = \mathcal{N}\big(\langle \hat{\theta}_n^{\mathrm{mc}}, x\rangle, (1 + \langle (n\widehat{\Sigma}_n)^{-1}x, x\rangle)^2\big) = \mathcal{N}\big(\langle \hat{\theta}_n^{\mathrm{mc}}, x\rangle, (1 - h_n(x))^{-2}\big) \quad (31)$$

où $h_n(x)$ est le levier de x, cf. (9). De plus, il satisfait la borne suivante, sans hypothèse sur la loi de $Y|X$:

$$\mathcal{E}(\tilde{f}_n) \leq -\mathbb{E}\big[\log(1 - h_{n+1})\big] \leq \frac{\mathbb{E}\,\mathrm{Tr}(\Sigma^{1/2}\widehat{\Sigma}_n^{-1}\Sigma^{1/2})}{n}. \quad (32)$$

La forme de l'estimateur $\tilde{f}_n$ s'interprète naturellement : la prédiction de la loi conditionnelle de Y associée à une valeur de $x \in \mathbf{R}^d$ est une gaussienne, mais dont la variance est corrigée par le levier de x au sein du jeu de données. Ainsi, les valeurs de x admettant un levier $h_n(x)$ élevé conduiront à des densités plus étalées ; cela est raisonnable, car nous avons vu en Section 3 que pour de tels points x, les prédictions de l'estimateur des moindres carrés seront plus incertaines. Cela suggère une interprétation générale de l'estimateur $\tilde{f}_n$ défini par (27), au-delà du cas gaussien : cet estimateur fondé sur des réponses y « fictives » calibre les prédictions en fonction de la sensibilité de l'EMV à la valeur de y en x, c'est-à-dire d'une notion de « levier » de x. De plus, la quantité (28) intervenant dans la borne de risque correspond à une notion de levier pour le problème de l'estimation de densité conditionnelle.

Du point de vue théorique, l'intérêt du Théorème 4 est que la borne (32) *ne dépend pas de la loi conditionnelle de Y sachant X*, c'est-à-dire de la loi de l'erreur

ε. De plus, cette borne valable dans le cas général mal spécifié est au plus deux fois la borne optimale (30) (et donc au plus deux fois la borne de l'EMV) dans le cas bien spécifié, quelle que soit la loi P_X de X. En particulier, sous les conditions du Théorème 3, cette borne est d'ordre $O(d/n)$ dans le cas mal spécifié, tandis que l'EMV peut se dégrader arbitrairement dans ce cas.

Notons que des bornes complémentaires d'excès de risque sur des boules ℓ^2 de $\mathbf{R}^d$ sont satisfaites par une variante régularisée de $\tilde{f}_n$, mais nous les omettons ici.

Modèle logistique. Nous traitons maintenant le cas du modèle logistique. Ici, on a toujours $\mathcal{X} = \mathbf{R}^d$, mais la réponse est binaire : $\mathcal{Y} = \{-1, 1\}$. Le modèle logistique est donné par $\mathcal{F} = \{f_\theta : \theta \in \mathbf{R}^d\}$, où f_θ est la densité sur $\{-1, 1\}$ (par rapport à la mesure de comptage) donnée par $f_\theta(1|x) = 1 - f_\theta(-1|x) = \sigma(\langle \theta, x\rangle)$, où $\sigma : \mathbf{R} \longrightarrow \mathbf{R}$ est la fonction sigmoïde $\sigma(u) = e^u/(1+e^u)$. Il s'agit du modèle « linéaire » standard lorsque y est binaire, à l'instar du modèle gaussien lorsque y est réel.

Pour des raisons techniques, nous ne considérons pas le modèle logistique $\mathcal{F}$ complet, mais seulement une boule ℓ^2 de rayon B, soit $\mathcal{F}_B = \{f_\theta : \|\theta\| \leq B\}$. On suppose (et c'est la seule hypothèse) que X est borné presque sûrement, soit $\|X\| \leq R$ p.s.

Dans ces conditions, l'estimateur le plus naturel est l'EMV $\hat{f}_n^{\mathrm{emv}}$ sur $\mathcal{F}_B$. Sous ces hypothèses, des résultats classiques impliquent que l'excès de risque de l'EMV est d'au plus $O(\min(BR/\sqrt{n}, de^{BR}/n))$. Cette borne n'est cependant pas satisfaisante : la quantité $BR/\sqrt{n}$ décroît seulement en $1/\sqrt{n}$ (au lieu de $1/n$), tandis que la quantité de^{BR}/n est bien en d/n, mais avec un facteur exponentiel e^{BR} prohibitif. On peut se demander si l'EMV admet une meilleure borne, mais ce n'est pas le cas : sans hypothèse supplémentaire, tout estimateur prenant ses valeurs au sein du modèle logistique $\mathcal{F}$ peut avoir un excès de risque d'ordre $\Theta(\min(BR/\sqrt{n}, e^{BR}/n))$ [26].

La méthode d'agrégation par mélange bayésien (25) peut être appliquée à ce problème, et cette procédure admet une garantie améliorée en $O(d\log(BRn)/n)$ [29, 19]. En revanche, cette procédure est coûteuse à implémenter, car elle requiert d'effectuer de l'échantillonnage selon le postérieur.

Dans ce cas, la version régularisée de l'estimateur $\tilde{f}_n$ admet une forme simple. Étant donné l'échantillon D_n, $\lambda > 0$ ainsi qu'une paire (x, y), on pose

$$\hat{\theta}_\lambda^{(x,y)} = \arg\min_{\theta \in \mathbf{R}^d} \left\{ \frac{1}{n+1} \left(\sum_{i=1}^n \ell(f_\theta, (X_i, Y_i)) + \ell(f_\theta, (x, y)) \right) + \lambda \|\theta\|^2 \right\}. \qquad (33)$$

Étant donné $x \in \mathbf{R}^d$, la prédiction $\tilde{f}_{\lambda,n}(y|x)$ vaut pour $y \in \{-1, 1\}$:

$$\tilde{f}_{\lambda,n}(y|x) = \frac{\sigma(y\langle \hat{\theta}_\lambda^{(x,y)}, x\rangle) e^{-\lambda\|\hat{\theta}_\lambda^{(x,y)}\|^2}}{\sigma(\langle \hat{\theta}_\lambda^{(x,1)}, x\rangle) e^{-\lambda\|\hat{\theta}_\lambda^{(x,1)}\|^2} + \sigma(-\langle \hat{\theta}_\lambda^{(x,-1)}, x\rangle) e^{-\lambda\|\hat{\theta}_\lambda^{(x,-1)}\|^2}}. \tag{34}$$

En particulier, le calcul de (34) se réduit au calcul de $\hat{\theta}_\lambda^{(x,y)}$ pour $y = \pm 1$, ce qui revient à résoudre deux problèmes de minimisation convexe de la forme (33). Les problèmes de minimisation convexe étant peu coûteux numériquement en comparaison aux problèmes d'échantillonnage, on obtient un gain computationnel.

Théorème 6

Pour toute loi P telle que $\|X\| \leq R$ presque sûrement, l'estimateur (34) avec $\lambda = R^2/(n+1)$ satisfait, pour tout $B > 0$,

$$\mathcal{E}(\tilde{f}_{\lambda,n}; \mathcal{F}_B) \leq \frac{3\,d + B^2R^2}{n}. \tag{35}$$

Ainsi, l'estimateur $\tilde{f}_{\lambda,n}$ contourne la borne inférieure en $\min(BR/\sqrt{n}, e^{BR}/n)$ pour les estimateurs restreints à la classe $\mathcal{F}$, en remplaçant la dépendance exponentielle en la norme par une dépendance quadratique. En particulier, dans le régime où $BR = O(\sqrt{d})$ (qui est naturel en dimension d), on obtient une borne $O(d/n)$.

Notons qu'il est possible d'obtenir une dépendance encore plus faible (logarithmique) en la norme via l'estimateur de mélange bayésien, au prix d'une procédure plus complexe à calculer. Une autre limitation de la garantie du Théorème 4 (ainsi que de celle de l'agrégation par mélange bayésien) est qu'elle ne contrôle que l'espérance de l'excès de risque, et pas ses déviations. Il serait intéressant d'obtenir une procédure calculable efficacement qui admette des bornes d'excès de risque favorables en forte probabilité.

5 Conclusion

Dans ce résumé, nous avons considéré deux problèmes d'apprentissage statistique, à savoir la régression linéaire et l'estimation de densité conditionnelle.

Pour la régression linéaire, la difficulté du problème est caractérisée par la loi des *leviers* des variables $X_1, \dots, X_n$. Ceci implique que la loi gaussienne est la plus favorable en grande dimension. La procédure la plus naturelle pour l'estimation de densité conditionnelle, à savoir l'estimateur du maximum de vraisemblance, est satisfaisante dans le cas bien spécifié mais peut se dégrader significativement dans le cas mal spécifié. Il est cependant possible de corriger cet estimateur en le « régularisant » à partir d'échantillons « fictifs », ce qui revient à calibrer ses prédictions à partir d'une notion de levier. Pour les modèles linéaire gaussien et logistique (ainsi que quelques autres), l'estimateur ainsi obtenu admet de meilleures garanties que l'EMV dans le cas mal spécifié, tout en restant calculable par optimisation convexe.

Références

[1] R. Adamczak, A. Litvak, A. Pajor et N. Tomczak-Jaegermann. Quantitative estimates of the convergence of the empirical covariance matrix in log-concave ensembles. *Journal of the American Mathematical Society*, 23(2) :535-561, 2010.

[2] J.-Y. Audibert et O. Catoni. Robust linear least squares regression. *Annals of Statistics*, 39(5) :2766-2794, 2011.

[3] A. R. Barron. Are Bayes rules consistent in information ? In *Open Problems in Communication and Computation*, pages 85-91. Springer, 1987.

[4] L. Birgé et P. Massart. Minimum contrast estimators on sieves : exponential bounds and rates of convergence. *Bernoulli*, 4(3) :329-375, 1998.

[5] L. Breiman et D. Freedman. How many variables should be entered in a regression equation ? *J. American Statistical Association*, 78(381) :131-136, 1983.

[7] A. Caponnetto et E. De Vito. Optimal rates for the regularized least-squares algorithm. *Foundations of Computational Mathematics*, 7(3) :331-368, 2007.

[8] O. Catoni. PAC-Bayesian bounds for the Gram matrix and least squares regression with a random design. *arXiv:1603.05229*, 2016.

[9] O. Catoni. *PAC-Bayesian Supervised Classification : The Thermodynamics of Statistical Learning*. Institute of Mathematical Statistics, 2007.

[10] O. Catoni. *Statistical Learning Theory and Stochastic Optimization : Ecole d'Eté de Probabilités de Saint-Flour XXXI - 2001*. Springer-Verlag, 2004.

[14] T. M. Cover et J. A. Thomas. *Elements of Information Theory*. Wiley, 2006.

[16] L. Devroye, L. Györfi et G. Lugosi. *A Probabilistic Theory of Pattern Recognition*, tome 31 de *Applications of Mathematics*. Springer-Verlag, 1996.

[17] L. Devroye et T. Wagner. Distribution-free inequalities for the deleted and holdout error estimates. *IEEE Trans. Information Theory*, 25(2) :202-207, 1979.

[18] N. El Karoui. Random matrices and high-dimensional statistics : beyond covariance matrices. In *Proceedings of the ICM*, pages 2875-2894, Rio, 2018.

[19] D. Foster, S. Kale, H. Luo, M. Mohri et K. Sridharan. Logistic regression : the importance of being improper. In *31st Conference on Learning Theory*, 2018.

[23] L. Györfi, M. Kohler, A. Krzyzak et H. Walk. *A distribution-free theory of nonparametric regression*. Springer Science & Business Media, 2002.

[25] D. Haussler, N. Littlestone et M. K. Warmuth. Predicting $\{0, 1\}$-functions on randomly drawn points. *Information and Computation*, 115(2) :248-292, 1994.

[26] E. Hazan, T. Koren et K. Y. Levy. Logistic regression : Tight bounds for stochastic and online optimization. In *27th Conference on Learning Theory*, 2014.

[27] D. Hsu, S. M. Kakade et T. Zhang. Random design analysis of ridge regression. *Foundations of Computational Mathematics*, 14(3) :569-600, 2014.

[28] A. Juditsky, P. Rigollet et A. B. Tsybakov. Learning by mirror averaging. *Annals of Statistics*, 36(5) :2183-2206, 2008.

[29] S. Kakade et A. Ng. Online bounds for Bayesian algorithms. In *Advances in Neural Information Processing Systems 17*, pages 641-648, 2005.

[32] V. Koltchinskii et K. Lounici. Concentration inequalities and moment bounds for sample covariance operators. *Bernoulli*, 23(1) :110-133, 2017.

[33] V. Koltchinskii et S. Mendelson. Bounding the smallest singular value of a random matrix without concentration. *IMRN*, 2015(23) :12991-13008, 2015.

[34] G. Lecué et S. Mendelson. Performance of empirical risk minimization in linear aggregation. *Bernoulli*, 22(3) :1520-1534, 2016.

[35] N. Littlestone et M. K. Warmuth. The weighted majority algorithm. *Information and Computation*, 108(2) :212-261, 1994.

[36] V. A. Marchenko et L. A. Pastur. Distribution of eigenvalues for some sets of random matrices. *Matematicheskii Sbornik*, 114(4) :507-536, 1967.

[37] D. A. McAllester. Some PAC-Bayesian theorems. *Machine Learning*, 37(3) :355-363, 1999.

[38] J. Mourtada. *Contributions à l'apprentissage statistique : estimation de densité, agrégation d'experts et forêts aléatoires*. Institut polytechnique de Paris, 2020.

[39] J. Mourtada. Exact minimax risk for linear least squares, and the lower tail of sample covariance matrices. *arXiv:1912.10754*, 2019.

[40] J. Mourtada et S. Gaïffas. An improper estimator with optimal excess risk in misspecified density estimation and logistic regression. *arXiv:1912.10784*, 2019.

[41] R. Oliveira. The lower tail of random quadratic forms with applications to ordinary least squares. *Probability Theory and Related Fields*, 166(3) :1175-1194, 2016.

[43] M. Rudelson. Random vectors in the isotropic position. *Journal of Functional Analysis*, 164(1) :60-72, 1999.

[44] N. Srivastava et R. Vershynin. Covariance estimation for distributions with $2 + \varepsilon$ moments. *Annals of Probability*, 41(5) :3081-3111, 2013.

[45] A. B. Tsybakov. *Introduction to nonparametric estimation*. Springer, 2009.

[46] A. B. Tsybakov. Optimal rates of aggregation. In *Learning Theory and Kernel Machines*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, pages 303-313. Springer, 2003.

[47] V. Vapnik. *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer, 2000.

[48] V. Vapnik et A. Chervonenkis. *Theory of Pattern Recognition*. Nauka, 1974.

[49] V. Vovk. A game of prediction with expert advice. *Journal of Computer and System Sciences*, 56(2) :153-173, 1998.

[50] Y. Yang. Mixing strategies for density estimation. *Annals of Statistics*, 28(1) :75-87, 2000.

Jaouad Mourtada

Depuis septembre 2020, Jaouad Mourtada est maître de conférence au département de statistique de l'ENSAE/CREST. Ses recherches se situent à l'intersection des statistiques et de la théorie de l'apprentissage. Il s'est particulièrement intéressé à la compréhension de la complexité des problèmes de prédiction et d'estimation. Ses intérêts de recherche actuels tournent principalement autour de questions relatives à la théorie de l'apprentissage statistique et à la statistique robuste.

Email : jaouad.mourtada@ensae.fr
Site web : https://jaouadmourtada.github.io

Percolation et percolation de premier passage

par :

Barbara Dembin[4] *— ETH Zürich*

1 Introduction

Dans un premier temps, nous présenterons les modèles de percolation et de percolation de premier passage. Puis, nous présenterons deux résultats obtenus pendant cette thèse qui illustrent comment des techniques de percolation de premier passage permettent d'obtenir de nouveaux résultats sur le modèle de percolation.

1.1 Percolation

Le modèle de percolation a été introduit par Broadbent et Hammersley en 1957 [6] dans le but de modéliser la circulation d'un fluide dans une roche poreuse. Une roche poreuse est une roche comportant des trous à l'échelle microscopique. On peut se demander ce qu'il se passe lorsqu'on immerge la roche dans l'eau. Est-ce que l'eau pourra s'infiltrer en profondeur ? En particulier, est ce que l'eau va se propager jusqu'à atteindre le centre de la roche ? Intuitivement, plus la densité de trous est élevée, plus il y a de chance que l'eau atteigne le centre de la roche. Le modèle de percolation a pour but de donner une formulation mathématique rigoureuse de ce problème physique.

Soit $d \geq 2$. Ce modèle peut se définir sur le graphe $\mathbb{Z}^d$ comme suit. Notons $(\mathbb{Z}^d, \mathbb{E}^d)$ le graphe ayant pour sommets les nœuds de $\mathbb{Z}^d$ et pour arêtes l'ensemble $\mathbb{E}^d$ des arêtes entre plus proches voisins de $\mathbb{Z}^d$ pour la distance euclidienne. À chaque arête $e \in \mathbb{E}^d$, on associe une variable aléatoire $B_p(e)$ qui suit une loi de Bernoulli de paramètre $p \in [0,1]$, de telle sorte que la famille de variables aléatoires $(B_p(e), e \in \mathbb{E}^d)$ soit indépendante. Si $B_p(e) = 1$, on dit que l'arête $e \in \mathbb{E}^d$ est ouverte, *i.e.*, l'eau peut circuler à travers e. Sinon, on dit qu'elle est fermée. Le paramètre p représente alors la densité de trous.

4. barbara.dembin@math.ethz.ch

On peut définir le graphe aléatoire $\mathcal{G}_p$ ayant pour sommets les nœuds de $\mathbb{Z}^d$ et pour arrêtes l'ensemble des arrêtes ouvertes $\{e \in \mathbb{E}^d : B_p(e) = 1\}$. On note $\mathcal{C}_p(0)$ la composante connexe de 0 dans $\mathcal{G}_p$. Notons que le modèle est invariant en loi par translation, *i.e.*, chaque sommet de $\mathbb{Z}^d$ voit en loi le même environnement. Sans perte de généralité, on peut donc considérer que 0 correspond au centre de la roche. Les trous étant microscopiques, du point de vue du centre de la roche, l'extérieur de la roche se situe infiniment loin. Ainsi, le fait que l'eau atteigne le centre de la roche peut se reformuler mathématiquement par le fait que la composante connexe $\mathcal{C}_p(0)$ soit infinie. On peut alors définir la probabilité de percolation $\theta(p)$ par

$$\theta(p) = \mathbb{P}\big(\,|\mathcal{C}_p(0)| = \infty\,\big)$$

où $|\mathcal{C}_p(0)|$ correspond au nombre de sommets dans $\mathcal{C}_p(0)$. On peut montrer que la fonction $p \mapsto \theta(p)$ est croissante. Intuitivement, plus la densité de trous p est élevée, plus il y a d'arêtes ouvertes et donc plus la composante connexe $\mathcal{C}_p(0)$ est grande. Pour montrer ce résultat, nous allons coupler les percolations de paramètre $p < q$, c'est à dire nous allons utiliser le même aléas pour les construire. Le couplage suivant est standard en percolation. Considérons une famille indépendante et identiquement distribuée de variables aléatoires $(U(e), e \in \mathbb{E}^d)$ uniformes sur $[0,1]$ et définissons pour $e \in \mathbb{E}^d$ $p \in [0,1]$, $B_p(e) = \mathbb{1}_{U(e) \leq p}$. Il est facile de vérifier que la famille $(B_p(e), e \in \mathbb{E}^d)$ est une famille indépendante de variables aléatoires de Bernoulli de paramètre p. Grâce à ce couplage, on a que $\mathcal{C}_p(0) \subset \mathcal{C}_q(0)$. Il en résulte que $\theta(p) \leq \theta(q)$.

Définissons le paramètre critique

$$p_c = \sup\big\{\,p\ :\ \theta(p) = 0\,\big\}.$$

On peut montrer que $p_c \in (0,1)$. Ce modèle présente une transition de phase à p_c : le comportement n'est pas le même lorsque $p < p_c$ ou $p > p_c$. Autour de p_c, de petites modifications à l'échelle microscopique ont des répercussions macroscopiques. On distingue deux régimes.

- **Régime sous-critique :** Pour $p < p_c$, on a $\theta(p) = 0$. On peut montrer qu'il n'existe presque sûrement aucune composante connexe infinie dans $\mathcal{G}_p$. L'eau ne circule qu'au niveau microscopique.
- **Régime surcritique :** Pour $p > p_c$, on a $\theta(p) > 0$. On peut montrer qu'il existe presque sûrement une unique composante connexe infinie dans $\mathcal{G}_p$ qu'on note $\mathcal{C}_p$. L'existence de cette composante connexe infinie entraîne la circulation d'eau à un niveau macroscopique.

Pour $d = 3$, l'existence d'une composante connexe infinie au point critique p_c est encore un problème ouvert.

1.2 Percolation de premier passage

Le modèle de percolation de premier passage peut être vu comme une généralisation du modèle de percolation. Il comporte deux principales interprétations que nous présentons ci-dessous.

Première interprétation : Etude des géodésiques

Le modèle de percolation de premier passage a été introduit en 1965 par Hammersley et Welsh [24] dans le but de modéliser la propagation d'un fluide de façon plus générale que le modèle de percolation. À chaque arête $e \in \mathbb{E}^d$, on associe une variable aléatoire $t_G(e)$ à valeurs dans $\mathbb{R}^+$ ou encore $\mathbb{R}^+ \cup \{+\infty\}$ de telle sorte que la famille $(t_G(e), e \in \mathbb{E}^d)$ soit indépendante et identiquement distribuée selon une loi G. La variable aléatoire $t_G(e)$ peut être interprétée de plusieurs façons différentes et donc modéliser des problèmes différents.

L'interprétation la plus étudiée du modèle de percolation de premier passage consiste à dire que la variable aléatoire $t_G(e)$ représente un temps de passage, *i.e.*, le temps nécessaire pour traverser l'arête $e \in \mathbb{E}^d$. On peut alors définir une pseudo-métrique aléatoire T_G sur le graphe : pour chaque paire de sommets x, $y \in \mathbb{Z}^d$, la variable aléatoire $T_G(x,y)$ correspond au temps le plus court pour aller de x à y, *i.e.*,

$$T_G(x,y) = \inf\left\{\sum_{e\in\gamma} t_G(e) \ : \ \gamma \text{ chemin de } x \text{ à } y\right\}.$$

Un chemin qui atteint cet infimum est appelé géodésique.

Définition de la constante de temps Quel est le comportement asymptotique de la quantité $T_G(0,nx)$ quand n tend vers l'infini ? Le nombre minimum d'arêtes nécessaires pour relier 0 à nx étant d'ordre n on s'attend à ce que $T_G(0,nx)$ soit d'ordre n. Sous certaines conditions de moments sur la distribution G, on peut prouver qu'asymptotiquement quand n est grand, la variable aléatoire $T_G(0,nx)$ se comporte comme $n\,\mu_G(x)$ où $\mu_G(x)$ est une constante déterministe dépendant seulement de la distribution G et du sommet x, *i.e.*,

$$\lim_{n\to\infty} \frac{T_G(0,nx)}{n} = \mu_G(x) \qquad \text{presque sûrement et dans } L^1$$

quand cette limite existe. Cette constante μ_G est appelé constante de temps. La preuve de ce résultat utilise la notion de sous-additivité et le théorème ergodique sous-additif de Kingman. Pour comprendre, cette notion de sous-additivité. Essayons de montrer le résultat plus faible suivant

$$\lim_{n\to\infty} \frac{\mathbb{E}[T_G(0,nx)]}{n} = \mu_G(x)\,. \tag{36}$$

Par l'inégalité triangulaire, on a pour $n, m \geq 1$

$$\mathbb{E}[T_G(0,(n+m)x)] \leq \mathbb{E}[T_G(0,nx)] + \mathbb{E}[T_G(nx,(n+m)x)]\,.$$

Le modèle étant invariant par translation, on a $\mathbb{E}[T_G(nx,(n+m)x)] = \mathbb{E}[T_G(0,mx)]$. Il s'en suit que la suite $(\mathbb{E}[T_G(0,nx)])_{n\geq 1}$ est sous-additive, le lemme ci-dessous permet de conclure l'existence de la limite dans (36).

Lemme 1 (Lemme sous-additif - Lemme de Fekete). *Soit $(u_n)_{n\geq 1}$ une suite réelle sous-additive, c'est à dire, que $(u_n)_{n\geq 1}$ vérifie*

$$\forall n \geq 1 \quad \forall m \geq 1 \qquad u_{n+m} \leq u_n + u_m\,.$$

Alors,

$$\lim_{n\to\infty} \frac{u_n}{n} = \inf_{n\geq 1} \frac{u_n}{n} \in \mathbb{R} \cup \{-\infty\}\,.$$

Le théorème de Kingmann est une version plus forte du lemme de Fekete dans le cas de suite réelle sous-additive "en distribution". Pour pouvoir définir μ_G en utilisant ce théorème, on a besoin de bonnes propriétés d'intégrabilité sur G, sinon la constante μ_G sera infinie. Il existe un moyen de définir différement la constante de temps qui est adapté pour les lois G avec de mauvaises propriétés d'intégrabilités (cela comprend également le cas où G aurait un atome en $+\infty$ tant qu'il n'est pas trop gros). Dans [13], Cerf et Théret étendent la définition de la constante de temps μ_G pour des distributions plus générales G à valeurs dans $\mathbb{R}_+ \cup \{+\infty\}$ qui satisfont $G(\{+\infty\}) < 1 - p_c$. L'idée est qu'au lieu de regarder le temps entre 0 et nx, de regarder le temps entre deux points proches de respectivement 0 et nx dont on sait que le temps pour les relier est d'espérance finie. Soit $M > 0$ tel que $G([0,M]) > p_c(d)$, les arêtes de temps inférieur à M percolent, il existe un cluster infini que l'on note $\mathcal{C}_M$ d'arêtes de temps inférieur à M. Notons $\tilde{x}$ le point dans $\mathcal{C}_M$ le plus proche de x. Au lieu d'étudier le temps entre 0 et nx, on va étudier la quantité $T_G(\tilde{0},\widetilde{nx})$. Etant donné que $\tilde{0}$ et $\widetilde{nx}$ sont tous les deux dans le cluster $\mathcal{C}_M$, ils sont reliés par un chemin d'arêtes de temps inférieur à M. Il suit que $\mathbb{E}[T_G(\tilde{0},\widetilde{nx})] < \infty$. Avec cette nouvelle définition, on a encore de la sous-additivité et on peut donc définir une constante de temps ainsi

$$\lim_{n\to\infty} \frac{T_G(\tilde{0},\widetilde{nx})}{n} = \mu_G(x) \qquad \text{presque sûrement et dans } L^1.$$

On peut montrer que cette façon de définir la constante de temps coïncide avec la première dans le cas où G a de bonnes propriétés d'intégrabilités.

Propriétés de la constante de temps Dans [30], Kesten prouve que μ_G est une norme sur $\mathbb{R}^d$ si et seulement si $G(\{0\}) < p_c$. Lorsque $G(\{0\}) > p_c$, il n'est pas difficile de comprendre pourquoi $\mu_G = 0$: il existe presque sûrement une composante connexe infinie $\mathcal{C}$ d'arêtes de temps de passage nul. Avec grande probabilité, la géodésique entre 0 et nx est principalement composée d'arêtes de temps nul excepté au plus $C \log n$ arêtes, où $C > 0$ est une constante positive. On a donc

$$\lim_{n\to\infty} \frac{T(0,nx)}{n} = 0 \qquad \text{presque sûrement et dans } L^1.$$

Le cas où $G(\{0\}) = p_c$ est beaucoup plus délicat à traiter.

Par ailleurs, on peut montrer que la convergence de $T_G(0,nx)/n$ a lieu uniformément dans toutes les directions, cela revient à dire qu'une forme asymptotique émerge. En effet, lorsque $G(\{0\}) < p_c$, l'ensemble des points $x \in \mathbb{Z}^d$ tels que $T_G(0,x) \leq n$ ressemble asymptotiquement à $n\mathcal{B}_{\mu_G}$, où $\mathcal{B}_{\mu_G}$ est la boule unité associée à la norme μ_G.

Seconde interprétation : Etude des surfaces de coupure minimale

Il existe une seconde interprétation du modèle de percolation de premier passage dont l'étude a commencé bien plus tard. Désormais, on considère que la variable aléatoire $t_G(e)$ représente une capacité, *i.e.*, cela correspond à la quantité maximale d'eau qui peut traverser l'arête par seconde. On imagine alors que les arêtes correspondent à des tubes dont l'aire de la section correspond à la capacité $t_G(e)$. Plus la capacité $t_G(e)$ est grande plus le débit d'eau pouvant circuler à travers l'arête est grand. L'étude de ce modèle permet alors de comprendre la quantité maximale d'eau par seconde - que l'on appellera flux maximal - qui peut circuler dans le réseau. Introduisons un cadre plus formel pour l'étude du flux maximal. Considérons une grande boîte dans $\mathbb{R}^d$ et deux côtés opposés de cette boîte que nous appelons haut et bas.

Définition 2 : Courant admissible haut/bas dans la boîte

Un courant f est une fonction définie sur $\mathbb{E}^d$ qui décrit la façon dont l'eau circule dans le réseau. Pour chaque arête e, la quantité $f(e)$ nous renseigne sur le débit d'eau qui traverse e et dans quelle orientation l'eau traverse e. On dit que f est un courant admissible si :

- $f = 0$ en dehors de la boîte
- la quantité d'eau traversant e ne dépasse pas la capacité $t_G(e)$.

- la loi des nœuds est respectée partout en dehors du bas et du haut de la boîte qui correspondent aux source et puits, *i.e.*, pour chaque sommet x de $\mathbb{Z}^d$ à l'intérieur de la boîte, la quantité d'eau qui arrive à x est égale à la quantité d'eau qui sort de x

Définition 3 : Surface de coupure

On dit qu'un ensemble d'arêtes $E \subset \mathbb{E}^d$ est une surface de coupure haut/bas dans la boîte si tout chemin du haut vers le bas qui reste dans la boîte utilise au moins une arête de E : l'ensemble E sépare le haut du bas de la boîte. Par ailleurs, la capacité de E est égale à la somme des capacités des arêtes dans E.

Pour pouvoir définir le haut et le bas d'un cylindre, il faut définir une discrétisation du cylindre continu. La discrétisation choisie ici est par l'intérieur (voir figure 1).

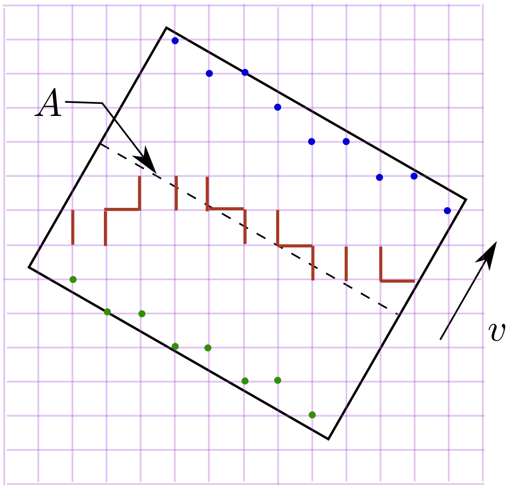


Figure 1 — *Les points bleus (respectivement verts) correspondent à la discrétisation par l'intérieur du haut (resp. bas) du bord du cylindre de base A orienté dans la direction v. L'ensemble d'arêtes en rouge est une surface de coupure qui sépare le haut du bas du cylindre. Tout chemin d'un point bleu à un point vert qui reste dans le cylindre passe par au moins une arête en rouge.*

Intéressons-nous à la quantité maximale d'eau ϕ qui peut entrer dans la boîte par le bas par seconde pour les courants admissibles haut/bas, *i.e.*,

$$\phi = \sup \{\text{quantité d'eau entrant par le bas pour } f : f \text{ courant admissible}\} .$$

Une première question est de comprendre si le flux maximal dans la boîte correctement renormalisée converge lorsque la taille de la boîte tend vers l'infini. Grâce à un théorème de théorie des graphes, l'étude du flux maximal équivaut à trouver des surfaces de coupure de capacité minimale. Parmi toutes ces surfaces de coupure, celles qui atteignent la capacité minimale agissent comme un goulot d'étranglement, elles limitent le flux : toutes leurs arêtes sont saturées. Le théorème du flux maximal - coupure minimale (voir par exemple [20]) dit que la capacité minimale des surfaces de coupure est égale au flux maximal.

Par conséquent, l'étude du flux maximal est associée à l'étude des surfaces de coupure aléatoires qui peuvent être considérées comme des surfaces $(d-1)$-dimensionnelles. En ce sens, ce problème peut être vu comme l'analogue en grande dimension de la première interprétation, l'étude des géodésiques consiste à minimiser la capacité totale sur des objets de dimension 1 alors que dans l'étude des surfaces de coupure minimale consiste à minimiser la capacité totale sur des objets de dimension $d-1$. On comprend alors pourquoi l'étude des surfaces de coupure minimale présente plus de difficultés techniques que l'étude des géodésiques.

En 1987, Kesten a étudié le flux maximal en dimension 3 dans [31] pour les boîtes droites, *i.e.*, orientées dans une direction parallèle aux axes du réseau. Il a montré que le flux maximal dans la boîte correctement renormalisé converge lorsque la taille de la boîte tend vers l'infini vers une constante déterministe ν_G. Il s'agit de la constante de flux. Cet article est très technique et tente de donner un sens rigoureux à la notion de surface. En particulier, le flux ϕ n'a pas de propriété sous-additive : l'union de deux surfaces de coupure correspondant au flux ϕ dans des cylindres adjacents, peut ne pas être une surface de coupure pour l'union des cylindres. Heureusement, notre compréhension de ces objets s'est beaucoup améliorée depuis, en particulier grâce aux travaux de Boivin, Cerf, Garet, Rossignol, Théret et Zhang. Cependant, le flux maximal est encore moins étudié que les géodésiques. Certains résultats existant sur les géodésiques n'ont pas d'analogue en terme de surface de coupure minimale.

Introduisons un flux alternatif τ entre la moitié supérieure et inférieure du bord du cylindre qui possède une propriété de sous-additivité. Notons A le plan méridien du cylindre. Alors, les surfaces de coupure correspondantes sont ancrées au bord ∂A de A (voir figure 2). Pour ce flux, si on fusionne les surfaces de coupure de deux cylindres adjacents, il s'agira toujours d'une surface de coupure

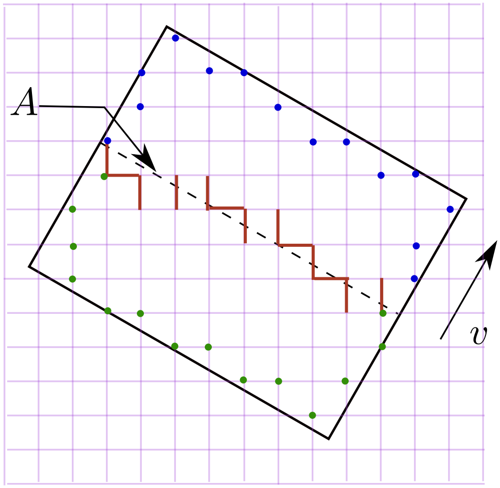


Figure 2 — *Les points bleus (respectivement verts) correspondent à la discrétisation par l'intérieur de la moitié supérieure (resp. moitié inférieure) du bord du cylindre de base A orienté dans la direction v. L'ensemble d'arêtes en rouge est une surface de coupure qui sépare la moitié supérieure de la moitié inférieure. Tout chemin d'un point bleu à un point vert qui reste dans le cylindre passe par au moins une arête en rouge.*

pour le grand cylindre. On peut ainsi retrouver de la sous-additivité. En étudiant, un autre flux alternatif ayant également une propriété de sous-additivité, Rossignol et Théret ont pu définir la constante de flux ν_G pour toutes les directions et dimensions et sous la seule hypothèse que $G(\{+\infty\}) < p_c$ dans [42]. Pour $v \in \mathbb{R}^d$, $\|v\|_2 = 1$, on peut interpréter $\nu_G(v)$ comme le débit maximal asymptotique d'eau par unité de surface qu'il est possible d'envoyer dans la direction v. Le réseau étant anisotropique, la constante $\nu_G(v)$ varie avec v. Bien sûr, la constante de flux ν_G conserve toutes les symétries du réseaux. Dans [51], Zhang prouve que $\nu_G > 0$ si et seulement si $G(\{0\}) < 1 - p_c$. Intuitivement, lorsque $G(\{0\}) > 1 - p_c$, les arêtes de capacité strictement positive sont en régime sous-critique de percolation sur $\mathbb{Z}^d$, elles ne peuvent transporter d'eau à l'échelle macroscopique et donc $\nu_G = 0$. Le cas $G(\{0\}) = 1 - p_c$ est beaucoup plus délicat à traiter.

2 De la percolation de premier passage vers la percolation

L'étude du modèle de percolation de premier passage nous permet de déduire des résultats sur le modèle de percolation. Nous allons présenter deux résultats sur la percolation de premier passage qui donnent de nouveaux résultats sur le modèle de percolation. Le premier résultat concerne la première interprétation du modèle : en étudiant la régularité de la constante de temps μ_G pour une certaine famille de distributions G, nous quantifierons comment en percolation surcritique la distance de graphe dans $\mathcal{G}_p$ est affectée par des perturbations du paramètre p.

Le second résultat, concerne la seconde interprétation du modèle. En étudiant la quantité maximale d'eau qu'un ensemble convexe A peut envoyer à l'infini, nous en déduirons un résultat sur le nombre maximal de chemins disjoints de nA vers l'infini dans le graphe $\mathcal{G}_p$.

2.1 Régularité de la constante de temps

Dans [22], Garet, Marchand, Procaccia et Théret prouvent la continuité de la fonction $G \mapsto \mu_G$. Dans la continuité de cet article, nous avons étudié la régularité de la fonction $p \mapsto \mu_{G_p}$ où $G_p = p\delta_1 + (1-p)\delta_\infty$. Les arêtes avec un temps infini dans le modèle de percolation de premier passage correspondent aux arêtes fermées dans le modèle de percolation. Il est possible de coupler ces deux modèles de sorte que T_{G_p} correspondent à la distance de graphe dans $\mathcal{G}_p$. Le problème de la régularité de $p \mapsto \mu_{G_p}$ est donc équivalent à l'étude de la régularité en p de la distance de graphe pour deux sommets éloignés de la composante connexe infinie $\mathcal{C}_p$ pour $p > p_c$. Dans [11], nous parvenons avec Raphaël Cerf à contrôler l'écart entre μ_{G_p} et μ_{G_q} :

Théorème 7

Soit $p_0 > p_c$, il existe une constante $C > 0$ (qui ne dépend que de p_0) telle que

$$\forall p,q \in [p_0, 1] \qquad \sup_{x:\|x\|_2=1} |\mu_{G_p}(x) - \mu_{G_q}(x)| \leq C|q-p|\,.$$

Connaître la régularité de la constante de temps μ_G donne également des informations sur la forme limite $\mathcal{B}_{\mu_G}$, notamment sur comment la forme limite est affectée par de petites perturbations de la loi G.

Pour étudier la régularité de la fonction $p \mapsto \mu_{G_p}$, notre but est de contrôler la différence entre la distance de graphe dans $\mathcal{G}_p$ pour une percolation de Bernoulli de paramètre $p > p_c$ avec la distance de graphe dans $\mathcal{G}_q$ où $q \geq p$. On couple les deux percolations de paramètres p et q en utilisant le couplage à partir de variables uniformes définit en introduction. On a donc $\mathcal{G}_p \subset \mathcal{G}_q$ et il en résulte que $\mu_{G_p} \geq \mu_{G_q}$. La difficulté de la preuve est de montrer que $\mu_{G_q} \leq \mu_{G_p} + C(q-p)$. Le passage clé de la preuve réside dans la modification d'un chemin. Soit $x \in \mathbb{Z}^d$. Supposons que 0 et nx appartiennent à $\mathcal{C}_p$. Considérons une géodésique γ dans $\mathcal{G}_q$ reliant 0 et nx. Certaines des arêtes de γ sont p-fermées, *i.e.*, pas présentes dans $\mathcal{G}_p$. Le but est de construire à partir de ce chemin un chemin p-ouvert en contournant les arêtes p-fermées. Par un simple calcul sur les variables uniformes, la probabilité qu'une arête soit p-fermée sachant qu'elle est q-ouverte est $(q-p)/q$. On s'attend donc à ce que le nombre d'arêtes p-fermées dans γ soit de l'ordre de $(q-p)|\gamma| \approx (q-p)n$. Avant de révéler quelles sont les arêtes de γ qui sont p-fermées et qui auront besoin d'être contournées, nous établissons d'abord pour chaque arête e de γ un coût $c(e)$ aléatoire qui correspond au nombre d'arêtes que cela coûterait pour contourner l'arête e par un chemin p-ouvert. Ce coût $c(e)$ ne dépend que de γ et de l'état p-ouvert et q-ouvert des arêtes hors de γ. En particulier, ce coût est indépendant de la connaissance des arêtes p-fermées de γ.

Pour établir ce coût $c(e)$ nous construisons des détours à une échelle mésoscopique en utilisant une technique de mécanique statistique appelée renormalisation multi-échelle. Pour une arête e fixée, il se peut que le coût pour la contourner soit grand. Cependant, nous pouvons montrer qu'avec grande probabilité, le coût du détour moyen est constant

$$\sum_{e \in \gamma} c(e) \leq Cn\,.$$

Cette famille de coût est construite de façon à ce que lorsqu'on révèle les arêtes à contourner, on puisse construire un chemin γ' entre 0 et nx, p-ouvert qui contourne ces mauvaises arêtes de sorte que

$$|\gamma' \setminus \gamma| \leq \sum_{e \in \gamma} c(e) \mathbb{1}_{e \text{ est } p\text{-fermée}}\,.$$

Autrement dit le coût à payer pour contourner toutes ces arêtes est borné par la somme des coûts $c(e)$ des arêtes à contourner.

La famille de variables aléatoires $(c(e), e \in \gamma)$ étant indépendante de la famille de variable aléatoires $(\mathbb{1}_{e \text{ est } p\text{-fermée}}, e \in \gamma)$ et $\mathbb{P}(e \text{ est } p\text{-fermée} \mid e \in \gamma) = (q-p)/q$, on peut montrer que avec grande probabilité

$$|\gamma' \setminus \gamma| \leq C(q-p)n\,.$$

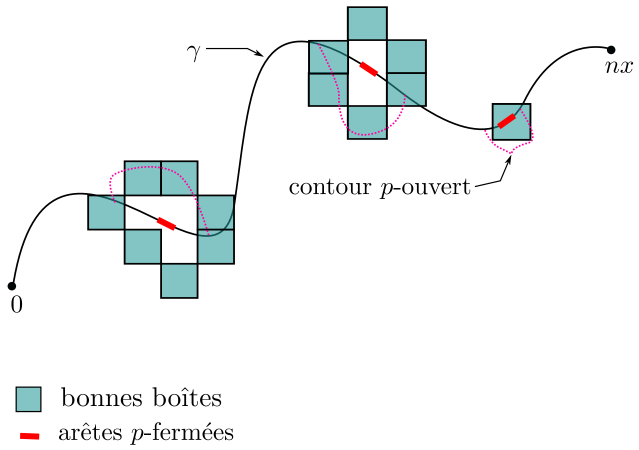


Figure 3 — *Contournement des arêtes p-fermées de γ à l'aide de bonnes boîtes (boîtes de taille mésoscopique avec de bonnes propriétés de connectivité.*

Ainsi, on a

$$T_{G_p}(0, nx) \leq |\gamma'| \leq |\gamma| + |\gamma' \setminus \gamma| \leq T_{G_q}(0, nx) + Cn(q - p)$$

le résultat suit en divisant par n et en passant à la limite.

2.2 Flux maximal d'un convexe compact vers l'infini

Soit G une distribution à valeurs dans $\mathbb{R}_+$ admettant un moment exponentiel. Dans [15], nous étudions le flux maximal entre un convexe compact A de $\mathbb{R}^d$ et l'infini pour $d \geq 2$ dans le réseau renormalisé $\mathbb{Z}^d/n$ (cela correspond au graphe $(\mathbb{Z}^d, \mathbb{E}^d)$ contracté par un facteur n) où les arêtes du réseau renormalisé ont, indépendamment, une capacité qui suit la loi G. Dans ce cadre, à la différence de l'étude des surfaces de coupure minimale dans une boîte où il n'existe qu'un nombre fini de surfaces de coupure possibles, l'existence d'une surface de coupure minimale séparant A de l'infini n'est pas claire. Dans [15], nous prouvons l'existence d'une surface de coupure minimale $\mathcal{E}_n$ entre A et l'infini dans le réseau renormalisé $\mathbb{Z}^d/n$ en adaptant des arguments de Zhang dans [52]. S'il existe plusieurs surfaces de coupure minimale, nous choisissons celle de plus petit cardinal. Notons $\mathcal{C}(A)$ la capacité continue du bord ∂A de A, *i.e.*,

$$\mathcal{C}(A) = \int_{\partial A} \nu_G(n_A(x)) d\mathcal{H}^{d-1}(x)$$

où $n_A(x)$ est le vecteur extérieur unitaire de A au point $x \in \partial A$ et $\mathcal{H}^{d-1}$ la mesure de Hausdorff $(d-1)$-dimensionnelle. Rappelons que $\nu_G(n_A(x))$ correspond au débit maximal d'eau asymptotique par unité de surface pouvant être envoyé dans la direction $n_A(x)$. La quantité $\mathcal{C}(A)$ correspond donc au débit maximal d'eau asymptotique que A peut envoyer par unité de temps. Lorsque la source A souhaite envoyer de l'eau vers l'infini dans le réseau renormalisé, elle est limitée par les arêtes au bord de A. On peut montrer qu'il existe dans un voisinage du bord de A une surface de coupure de capacité de l'ordre de $\mathcal{C}(A)n^{d-1}$. La source A ne pourra donc pas envoyer vers l'infini plus d'eau que cette quantité. La question est de savoir si $\mathcal{C}(A)n^{d-1}$ correspond à la quantité d'eau maximale que A peut envoyer à l'infini ; on cherche à écarter le scénario où il existe une surface de coupure qui entoure A (pas nécessairement proche du bord de A) de capacité d'un ordre de grandeur inférieur à $\mathcal{C}(A)n^{d-1}$. Dans [15], nous résolvons une conjecture formulée par Garet en 2008 dans [21]. Nous parvenons à écarter avec grande probabilité l'existence d'une telle surface de coupure.

THÉORÈME 8

Soit $d \geq 3$. Soit $\varepsilon > 0$. Il existe des constantes $C_1 > 0$ et $C_2 > 0$ telles que

$$\forall n \geq 1 \qquad \mathbb{P}\left(|\,\text{capacite}(\mathcal{E}_n) - \mathcal{C}(A)n^{d-1}| \geq \varepsilon n^{d-1}\right) \leq C_1 \exp(-C_2 n^{d-1})$$

où capacite$(\mathcal{E}_n)$ est la capacité de la surface de coupure minimale $\mathcal{E}_n$.

Garet a prouvé ce résultat en dimension 2. En appliquant le lemme de Borel-Cantelli, on obtient le corollaire suivant.

Corollaire 2. *On a*

$$\lim_{n\to\infty} \frac{\text{capacite}(\mathcal{E}_n)}{n^{d-1}} = \mathcal{C}(A) \qquad \textit{presque sûrement}.$$

Nous prouvons ce théorème en étudiant séparément les grandes déviations par au-dessus et par en-dessous. La preuve des déviations par au dessus consiste à prouver que

$$\mathbb{P}(\text{capacite}(\mathcal{E}_n) \geq (\mathcal{C}(A) + \varepsilon)n^{d-1}) \leq C_1 \exp(-C_2 n^{d-1})\,.$$

La preuve des grandes déviations par au-dessus suit essentiellement la même stratégie de preuve que Garet. En approchant A par un polytope convexe et en utilisant des estimées de grandes déviations sur le flux τ dans un cylindre, nous pouvons construire avec grande probabilité, une surface de coupure dont la capacité est arbitrairement proche $\mathcal{C}(A)n^{d-1}$.

La preuve des grandes déviations par en-dessous est plus délicate. Ce que l'on cherche à montrer est que si la capacité de $\mathcal{E}_n$ est anormalement faible, alors il doit exister quelque part un cylindre dans lequel le flux est anormalement faible (événement que l'on sait bien contrôler).

La principale difficulté réside dans le manque de compacité. La surface de coupure $\mathcal{E}_n$ ne peut être presque sûrement contenue dans un compact. Ce problème a été réglé par Garet par des estimées combinatoires astucieuses sur les possibles surfaces de coupure minimale. Cependant, pour les dimensions $d \geq 3$, même les estimées combinatoires les plus ingénieuses ne fonctionneront pas parce que le terme combinatoire ne pourra être contrebalancé par la probabilité qu'on cherche à estimer. Pour résoudre ce problème, nous procédons comme dans l'article de Cerf et Théret [12].

L'idée étant de construire à partir de la surface de coupure minimale $\mathcal{E}_n$ un objet continu E_n de $\mathbb{R}^d$ dont le bord par arêtes, *i.e.*, les arêtes ayant une extrémité dans E_n et l'autre en dehors, corresponde exactement à $\mathcal{E}_n$ (voir figure 4. Grâce à des estimées sur la taille de $\mathcal{E}_n$, on peut montrer qu'avec grande probabilité E_n a un périmètre plus petit qu'une constante c.

Comme on s'attend à ce que la surface de coupure minimale ne s'éloigne pas trop de A, on va pouvoir observer des événements peu probables juste en inspectant une région bornée autour de A. Cela nous permet d'étudier uniquement la portion de E_n dans cette région bornée. Il sera alors possible de retrouver de la compacité, ce qui nous permettra de localiser $\mathcal{E}_n$ pour montrer qu'on peut trouver dans la zone où elle se situe, un cylindre avec un flux anormalement bas.

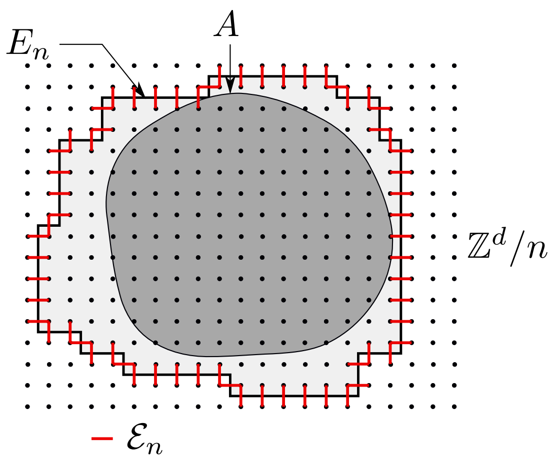


FIGURE 4 — *Représentation de A de $\mathcal{E}_n$ et E_n dans le réseau renormalisé $\mathbb{Z}^d/n$*

Soit $p > p_c$. Considérons la distribution $G = p\delta_1 + (1-p)\delta_0$ et un convexe compact $A \subset \mathbb{R}^d$ tel que $0 \in A$. Pour cette loi, on peut montrer que le flux maximal entre nA et l'infini correspond au cardinal maximal $\mathrm{dis}(nA)$ pour une collection de chemins ouverts disjoints de nA à l'infini. Nous pouvons déduire du théorème 2.2 le corollaire suivant sur la percolation surcritique.

Corollaire 3. *Soit $\varepsilon > 0$. Il existe des constantes $C_1 > 0$, $C_2 > 0$ telles que*

$$\forall n \geq 1 \qquad \mathbb{P}\left(\frac{\mathrm{dis}(nA)}{\mathcal{C}(A)n^{d-1}} \notin (1-\varepsilon, 1+\varepsilon)\right) \leq C_1 \exp(-C_2 n^{d-1}).$$

Références

[6] S. R. Broadbent et J. M. Hammersley. Percolation processes. I. Crystals and mazes. *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, 53 :629-641, 1957.

[11] R. Cerf et B. Dembin. The time constant for Bernoulli percolation is Lipschitz continuous strictly above p_c, 2021. arXiv : 2101.11858 [math.PR].

[12] R. Cerf et M. Théret. Lower large deviations for the maximal flow through a domain of $\mathbb{R}^d$ in first passage percolation. *Probability Theory and Related Fields*, 150 :635-661, 2011.

[13] R. Cerf et M. Théret. Weak shape theorem in first passage percolation with infinite passage times. *Ann. Inst. H. Poincaré Probab. Statist.*, 52(3) :1351-1381, août 2016. DOI : 10.1214/15-AIHP686. URL : https://doi.org/10.1214/15-AIHP686.

[15] B. Dembin. The maximal flow from a compact convex subset to infinity in first passage percolation on $\mathbb{Z}^d$. *Ann. Probab.*, 48(2) :622-645, mars 2020. DOI : 10.1214/19-AOP1367. URL : https://doi.org/10.1214/19-AOP1367.

[20] D. R. Fulkerson. Flow networks and combinatorial operations research. In *Studies in graph theory, Part I*, 139-171. Studies in Math., Vol. 11. Math. Assoc. Amer., Washington, D.C., 1975.

[21] O. Garet. Capacitive flows on a $2D$ random net. *Annals of Applied Probability*, 19(2) :641-660, 2009.

[22] O. Garet, R. Marchand, E. B. Procaccia et M. Théret. Continuity of the time and isoperimetric constants in supercritical percolation. *Electron. J. Probab.*, 22 :35 pp. 2017. DOI : 10.1214/17-EJP90. URL : https://doi.org/10.1214/17-EJP90.

[24] J. M. Hammersley et D. J. A. Welsh. First-passage percolation, subadditive processes, stochastic networks, and generalized renewal theory. In *Proc. Internat. Res. Semin., Statist. Lab., Univ. California, Berkeley, Calif*, pages 61-110. Springer-Verlag, New York, 1965.

[30] H. Kesten. Aspects of first passage percolation. In *École d'été de probabilités de Saint-Flour, XIV—1984*. Tome 1180, Lecture Notes in Math. Pages 125-264. Springer, Berlin, 1986.

[31] H. Kesten. Surfaces with Minimal Random Weights and Maximal Flows : a Higher Dimensional Version of First-Passage Percolation. *Illinois Journal of Mathematics*, 31(1) :99-166, 1987.

[42] R. Rossignol et M. Théret. Existence and continuity of the flow constant in first passage percolation. *Electron. J. Probab.*, 23 :Paper No. 99, 42, 2018. DOI : 10.1214/18-EJP214. URL : https://doi.org/10.1214/18-EJP214.

[51] Y. Zhang. Critical behavior for maximal flows on the cubic lattice. *Journal of Statistical Physics*, 98(3-4) :799-811, 2000. ISSN : 0022-4715.

[52] Y. Zhang. Limit theorems for maximum flows on a lattice. *Probability Theory and Related Fields*, mai 2017. ISSN : 1432-2064. DOI : 10.1007/s00440-017-0775-z. URL : https://doi.org/10.1007/s00440-017-0775-z.

Barbara Dembin

Barbara Dembin est Postdoc à l'ETH de Zürich sous la supervision de Vincent Tassion. Elle a fait son doctorat au Laboratoire de Probabilités Statistique et Modélisation (LPSM) sous la direction de Marie Théret. Elle travaille sur la percolation, la percolation de premier passage et la percolation booléenne. Son principal sujet d'étude est le flux maximal dans la percolation de premier passage.

Email : barbara.dembin@math.ethz.ch

Site web : https://n.ethz.ch/~bdembin/

Prix Dantzig 2021 attribué à Hedy Attouch

par :
Michel Thèra[1] *— Professeur Émérite à l'Université de Limoges, Adjunct Professor, Federation University Australia*

Le prix George B. Dantzig, crée par R. W. Cottle, E. L. Johnson, R. M. van Slyke et R. J.-B. Wets, est un prix prestigieux décerné conjointement par la Mathematical Optimisation Society (MOS) et la Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM). Il récompense des recherches qui, par leur originalité, leur ampleur et leur profondeur, ont un impact majeur sur le domaine de l'optimisation mathématique. Il est décerné tous les trois ans.

Les deux récipiendaires du prix George B. Dantzig 2021 sont :

- Hedy Attouch, professeur émérite à l'université de Montpellier pour “ *his fundamental contributions to modern variational analysis and nonsmooth optimization, including new notions of variational convergence, the introduction of novel topologies for the study of quantitative stability of variational systems, and their application in algorithm design and analysis, dynamical systems and partial differential equations*”
- Michel Goemans professeur au Massachusetts Institute of Technology (MIT) pour “ *his outstanding contributions to the field of combinatorial optimization; most notably, the initiation of new research directions, introduction of*

1. michel.thera@unilim.fr

novel and deep techniques, and ingenious use of sampling, rounding, and geometric ideas to significantly advance several fields, including the pioneering use of semi-definite programming for the design of approximation algorithms".

À l'occasion de ce prix, me revient le plaisir de rappeler la carrière et les principaux travaux de notre collègue Hedy Attouch.

Après avoir terminé ses études à l'École Normale Supérieure de Cachan, Hedy Attouch a commencé sa carrière comme maître de conférences à l'Université Paris-Sud, Orsay en 1971. En 1976, il obtient sa thèse de doctorat d'État "*EDP associées aux opérateurs sous-différentiels* "à l'Université Paris VI sous la direction de Haïm Brezis. A partir de 1983, il devient Professeur de Mathématiques à l'Université de Perpignan, d'où il rejoint le Laboratoire d'Analyse Convexe de l'Université Montpellier II en 1988. Depuis 2015, il est professeur émérite à l'Université de Montpellier, tout en conservant la même énergie et le même enthousiasme dans la conduite de ses activités de recherche. Hedy Attouch est un mathématicien travaillant à l'interface entre les mathématiques théoriques et appliquées, Son activité de recherche se divise en trois différentes périodes thématiques :

- Convergences variationnelles et opérateurs maximaux monotones (1972-1996)
- Approches en temps continu et discret pour l'optimisation (1997-2008)
- Développement de méthodes algorithmiques rapides pour des problèmes d'optimisation convexes et non convexes (2009-2020)

Convergences variationnelles et opérateurs maximaux monotones

H. Attouch a été un des premiers à comprendre que les opérateurs maximaux monotones entrent en jeu pour l'écriture des conditions d'optimalité pour les problèmes variationnels convexes et donc, qu'ils jouent un rôle important dans l'optimisation, les équations aux dérivées partielles et la mécanique. C'est ainsi que la convergence en graphe des suites de multiapplications a été le point de départ d'un programme de recherche qui s'est avéré fructueux, et qui s'est focalisé sur l'introduction, le développement et le lien de nouvelles notions de convergences variationnelles, comme l'épi-convergence (en collaboration avec Roger Wets), avec d'autres notions de convergence bien établies, comme les convergences au sense de Mosco et de De Giorgi (la Γ-convergence). Une vision synthétique de ces notions de convergence variationnelle et de leurs applications aux problèmes variationnels, y compris à l'homogénéisation de structures composites, se trouve dans la monographie "*Convergence variationnelle pour fonctions et opérateurs*" publiée par Pitman en 1984, ainsi que dans l'article "*Convergences en analyse multivoque et variationnelle*," MATAPLI 36, 22–39 (1993) co-écrit avec M. Théra.

Un des grands intérêts des convergences variationnelles est de produire et de créer de nouveaux objets mathématiques, tout comme le font les méthodes de perturbation singulière ou de relaxation. Ceci a conduit, dans un travail commun avec M. Théra et J.-B. Baillon (Journal of Convex Analysis, 1994), a définir une notion généralisée de somme d'opérateurs monotones maximaux, comme limite variationnelle d'une expression régularisée. Cette approche offre une nouvelle perspective sur un sujet important, lié à la formule de Trotter-Lie-Kato, et aux équations de Schrödinger avec des potentiels singuliers. Soulignons également le principe général de dualité d'Attouch-Théra qui concerne la somme de deux opérateurs, et la condition de qualification d'Attouch-Brezis. Ces deux outils se sont révélés très utiles pour garantir une dualité de Fenchel forte pour les problèmes de minimisation convexe ainsi que la maximalité de la somme de deux opérateurs maximaux monotones.

Approches en temps continu et discret pour l'optimisation

Cette période s'inscrit sous la bannière des systèmes gradients dont H. Attouch découvre l'importance et la grande souplesse tout en progressant parallèlement dans l'optimisation et l'analyse variationnelle des équations aux dérivées partielles. Ses premiers travaux avec A. Damlamian sur les inclusions différentielles gouvernées par des sous-différentiels dépendant du temps ont posé les bases de techniques qui ont permis d'élargir leur domaine d'application aux équations aux dérivées partielles et à la mécanique unilatérale. Considérer les algorithmes numériques comme des systèmes dynamiques discrets et utiliser l'analyse de stabilité de Lyapunov pour les systèmes dissipatifs, permet une compréhension approfondie et unifiante de divers algorithmes d'optimisation de type gradient et proximal. Une des principales découvertes de cette période est la méthode de la boule pesante avec frottement (publiée dans un article avec X. Goudou et P. Redont), qui simule la trajectoire d'une boule roulant sur le graphe d'une fonction et tendant à se stabiliser en un de ses minima locaux sous l'effet d'un frottement visqueux. Ses liens étroits avec les systèmes dynamiques dissipatifs, la stabilisation asymptotique en théorie du contrôle, la mécanique unilatérale et les sciences de la décision ont été progressivement découverts. Les propriétés asymptotiques des trajectoires, ainsi que les propriétés de convergence des approches en temps discret correspondantes ont été étudiées dans plusieurs articles communs avec F. Alvarez pour les potentiels convexes et les opérateurs monotones. Il est important de mentionner que les schémas itératifs qui en résultent sont ceux actuellement appelés algorithmes inertiels et de mémoire, qui ont atteint une énorme popularité en raison de leurs propriétés théoriques et de leurs performances numériques. Une percée majeure a été accomplie dans un article conjoint avec F. Alvarez, J. Bolte et P. Redont, où un système dissipatif de type gradient de second ordre avec amortissement piloté par le Hessien de la fonction à minimiser a été introduit et analysé, ce qui permet de modéliser des lois de choc avec coefficient de restitution. Une autre réalisation importante a été l'introduction et l'étude d'une nouvelle classe d'algorithmes de minimisation proximale alternée (dans une série d'articles avec J. Bolte, P. Redont et A. Soubeyran) qui mettent en évidence le concept de coût au changement, couvrant ainsi un large spectre d'applications allant des jeux dynamiques aux équations aux dérivées partielles et à la psychologie comportementale. Durant cette période, la première édition de la monographie d'Hedy Attouch "Variational Analysis in Sobolev and BV spaces. Applications to PDE's and Optimization" (co-auteurs : G. Buttazzo et G. Michaille, MPS/SIAM Series on Optimization 6, SIAM Philadelphia, 2006, 634 pages) a été publiée. Une deuxième édition enrichie est parue en 2014.

Développement de méthodes algorithmiques rapides pour des problèmes d'optimisation convexes et non convexes

La visibilité et l'impact des recherches d'H. Attouch dans cette troisième période sont impressionnants. Cela est dû au fait que ses recherches sont devenues pertinentes pour les chercheurs dans de nombreux domaines appliqués où l'optimisation joue un rôle important, comme l'informatique, l'ingénierie, les statistiques et la science des données. Il a placé l'interaction puissante entre les systèmes dynamiques continus et les algorithmes (qui sont obtenus par des discrétisations temporelles explicites ou implicites) au centre de son activité de recherche. En 2009, dans un article conjoint avec J. Bolte, H. Attouch a présenté à la communauté d'optimisation numérique la propriété Kurdyka-Lojasiewicz (KL) qui s'appuie sur des idées issues de la géométrie algébrique réelle et est satisfaite par la plupart des fonctions utilisées dans la pratique, comme les fonctions semi-algébriques, et plus généralement "tame". Dans ce cadre, un premier résultat a été obtenu concernant la convergence globale pour la suite des itérés de l'algorithme proximal pour les problèmes non lisses non convexes. Plus tard, il a prouvé que le même type de résultat s'applique à d'autres algorithmes pour des problèmes non convexes, comme le forward-backward splitting et les méthodes de Gauss-Seidel régularisées (avec J. Bolte et B. F Svaiter), et la méthode de minimisation alternée proximale (avec J. Bolte, P. Redont et A. Soubeyran). Ces travaux pionniers sur la propriété KL et son rôle dans l'analyse de la convergence des algorithmes pour les problèmes d'optimisation non convexes non lisses ont eu un impact fondamental sur la recherche de la communauté de l'optimisation au cours de la dernière décennie.

Les systèmes de type gradient non autonomes jouent un rôle important dans le contrôle asymptotique et la stabilisation des systèmes non linéaires. H. Attouch a développé un programme de recherche (avec M.-O. Czarnecki) étudiant l'effet de l'introduction d'un terme de régularisation de Tikhonov dans la dynamique sur la sélection asymptotique d'un équilibre de norme minimale. Dans le même contexte de dynamique non-autonome, il a également introduit (dans des articles conjoints avec P. Redont et B.F. Svaiter) des systèmes dynamiques continus de type Newton régularisé approchant l'ensemble des solutions des inclusions monotones dans les espaces de Hilbert. Au cours des cinq dernières années, H. Attouch a fondamentalement avancé dans l'étude des méthodes algorithmiques du premier ordre en optimisation. Cela a été l'objet de nombreuses publications et de nouvelles collaborations avec S. Adly, R. Bot, L. Briceno, P. Combettes, R. Csetnek, Z. Chbani, J. Fadili, S.C. László, H. Riahi. Ces méthodes s'appuient sur des techniques de splitting (éclatement) et ne font appel qu'à des blocs élémentaires (évaluation du gradient dans le cas différentiable, de l'opérateur proximal dans le cas non différentiable). Elles jouent un rôle central dans de nombreux domaines de l'optimisation de grande dimension (statistique, apprentissage, signal/image). L'obtention de résultats de convergence asymptotique rapide des schémas continus/discrets s'appuye sur l'analyse de Lyapunov, la modélisation du terme d'amortissement (réglage du frottement visqueux, contrôle géométrique piloté par le Hessien), les techniques de reparamétrage temporel, les techniques de régularisation (Tikhonov...), et les stratégies de splitting issues de la théorie des jeux (meilleure réponse, anticipation, mémoire...). Ces travaux ont ainsi permis de comprendre à travers l'approche systèmes dynamiques, le réglage subtil du coefficient de viscosité qui fournit la convergence rapide (optimale) dans les algorithmes de Nesterov et de Beck-Teboule (FISTA) obtenus par discrétisation temporelle. H. Attouch a également prouvé (dans des articles communs avec J. Peypouquet et A. Cabot) que de nombreux outils et résultats pour les problèmes de minimisation sont étonnamment valables dans le contexte plus général des inclusions gouvernées par des opérateurs maximaux monotones. Une attention particulière a été portée à l'interaction entre relaxation et termes inertiels, mais aussi, très récemment (avec S.C. László), à l'introduction d'algorithmes inertiels rapides pour résoudre des inclusions monotones, en utilisant des méthodes de Newton régularisées. Les résultats récents sur tous ces sujets de recherche font l'objet de la nouvelle monographie de H. Attouch : "Dynamique et algorithmes pour l'optimisation continue. Convergence and Complexity Analysis" (co-auteur : J. Peypouquet, MPS/SIAM Series on Optimization, SIAM, 700 pages), qui sera bientôt publié.

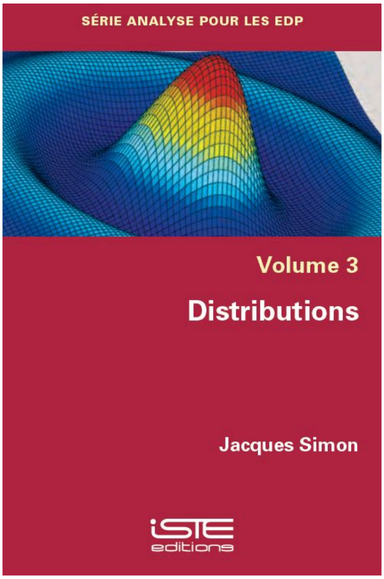
Pour terminer, je voudrais ajouter que j'ai eu personnellement la chance de travailler avec Hedy au début des années 90 lorsque nous nous sommes retrouvés à l'Université de Californie Davis et quelques années plus tard au Centre de recherches de l'Université de Montréal. C'est durant ces deux périodes que le concept de somme variationnelle ainsi que le principe de dualité sont nés. Hedy a su m'enthousiasmer vers des mathématiques plus en relation avec les applications et cette rencontre a changé ma carrière. Je lui en suis reconnaissant.

Résumé de livres

par :

André De Laire — Université de Lille

Distributions par Jacques Simon ISTE Editions (2021)



Ce livre est le troisième des six volumes d'un ouvrage dédié à la résolution d'équations aux dérivées partielles (EDP). Dans le premier volume, Jacques Simon a développé les propriétés des espaces de Neumann E, c'est-à-dire des espaces vectoriels semi-normés, séparés et séquentiellement complets (i.e. dans lesquels toute suite de Cauchy converge), qui englobent les espaces de Banach et de Fréchet. L'intérêt est que des espaces de Neumann tels que $L^p_{\mathrm{loc}}(\Omega)$, $H^m(\Omega)$-faible ou $\mathcal{D}'(\Omega)$, où Ω est un ouvert de $\mathbb{R}^d$, sont courants en EDP, mais ils ne sont pas normables.

Ceci était une préparation pour donner dans ce volume une théorie simple et originale des distributions à valeurs dans un espace de Neumann, leur ensemble étant noté $\mathcal{D}'(\Omega; E)$. La propriété de complétude séquentielle est plus simple et générale que celle de quasi-complétude utilisée par Laurent Schwartz. L'auteur travaille avec des familles de semi-normes, ce qui lui permet par exemple d'engendrer la topologie de $\mathcal{D}(\Omega)$ de manière plus simple que sa construction comme limite inductive des espaces $\mathcal{D}_K(\Omega)$. De même, il munit $\mathcal{D}'(\Omega; E)$ d'une famille de semi-normes qui engendre la topologie simple, au contraire de la topologie uniforme utilisée par L. Schwartz.

Cette approche lui permet de montrer le théorème de noyaux à valeurs vectorielles en évitant le recours aux difficiles propriétés topologiques. Rappelons que ce théorème de séparation de variables est essentiel pour les EDP d'évolution car il établit, par exemple, l'identification d'un élément de $\mathcal{D}'(]0,T[\times\Omega;E)$ à une distribution de $\mathcal{D}'(]0,T[,\mathcal{D}'(\Omega;E))$.

En plus des opérations habituelles telles que la dérivation, produit, changement de variables, régularisation, etc., ce livre présente une opération nouvelle, la pondération, qui donne des propriétés analogues à celles de la convolution pour les distributions définies sur un ouvert quelconque. En outre, un chapitre entier est dédié à la reconstruction d'une fonction f à partir de son gradient ∇f, en utilisant des formules de représentation d'une distribution par ses dérivées. En particulier, on trouve les preuves du théorème de de Rham et du théorème de Poincaré, généralisés aux distributions à valeurs dans un espace de Neumann.

D'un point de vue historique, l'origine des concepts et des résultats est précisée en notes de bas de page, ce qui est très instructif. De plus, l'auteur donne systématiquement une intéressante discussion de ses définitions et résultats, et les met également en perspective par rapport à ceux de la littérature.

Ce livre, ou plutôt cet ouvrage, est un projet remarquable qui donne une construction simple et auto-contenue de tous les résultats classiques des distributions, généralisés aux espaces de Neumann, avec un accent important sur les propriétés séquentielles des espaces, ce qui le rend très accessible.

Pour toutes ces raisons, je pense que cet ouvrage va devenir une référence incontournable, qui devrait faire partie de toutes les bibliothèques universitaires de mathématiques. On attend impatiemment la sortie des prochains volumes portant sur les espaces de Lebesgue, de Sobolev et les EDP.

par :
Cécile Louchet[1] *— Université d'Orléans*

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 recherche

▸ *Habilitation soutenue par :* **Giovanni CONFORTI**

Problème de Schrödinger, transport optimal et inégalités fonctionnelles

Soutenue le 15 décembre 2021
École Polytechnique

Résumé :
Ce mémoire contient une synthèse de certains travaux qui portent sur la theorie des probabilités et ses liens avec la géométrie Riemannienne et certaines branches de l'analyse, notamment le transport optimal. Toutes ces thématiques de recherche trouvent un terrain commun dans l'étude du problème de Schrödinger, qui est un problème de minimisation entropique sous contraintes permettant de déterminer l'évolution plus probable d'un nuage

1. cecile.louchet@univ-orleans.fr

de particules Borwniennes conditionnellement à l'observation de leur loi empirique à deux temps distincts. Il y a deux thèmes récurrents dans le manuscrit. Le premier consiste à montrer que les ponts de Schrödinger satisfont une équation du second ordre, c'est-à-dire une équation qui s'exprime à l'aide d'un terme d'accélération. Le développer ce théme amené à explorer différents formalismes, comme le calcul de Itô et le calcul de Otto et à chercher à établir de nouveaux liens entre eux. Le second thème consiste à quantifier, à l'aide d'inégalités fonctionnelles et d'estimés de dissipation d'entropie, la vitesse de convergence à l'equilibre et le comportement ergodique des processus de Markov, avec un intérêt particulier pour ceux qui sont solutions optimales d'un problème de contrôle stochastique. Le mémoire est articulé en six chapitres et trois parties. La première partie, composée par les quatre premiers chapitres, est consacrée au problème de Schrödinger. La deuxième partie porte sur les inégalités convexes de Sobolev pour les chaînes de Markov est se compose d'un seul chapitre, exactement comme la troisième partie, où je traite le problème de la construction des courbes splines pour interpoler des mesures de probabilité.

▸ *Habilitation soutenue par* : **Franck IUTZELER**

Autour de l'utilisation de la structure dans certains problèmes d'optimisation

Soutenue le 15 décembre 2021

Laboratoire Jean Kuntzmann et Université Grenoble Alpes

Résumé :
L'optimisation mathématique tient une place de plus en plus importante en science des données. Ceci est dû en partie à la difficulté croissante des taches d'apprentissage mais aussi à la structure particulière des problèmes de minimisation associés qui les rend souvent tractables, parfois distribuables, mais toujours intéressants. C'est le thème central de cette habilitation.
Dans un premier temps, je m'intéresse à la caractérisation mathématique de la structure sous-jacente des solutions de problèmes régularisés (par exemple, lorsqu'un a priori de parcimonie est ajouté au problème) ainsi qu'a l'exploitation algorithmique de ce phénomène. La seconde partie de ce document traite de la résolution de problèmes de minimisation par plusieurs

machines coordonnées de manière asynchrone par une entité centrale ; ce type de calculs est une nouvelle fois rendu possible par la structure particulière des problèmes en science des données. Finalement, quelques perspectives viennent conclure ce travail.

▸ *Habilitation soutenue par* : **Aline LEFEBVRE-LEPOT**

Collections de solides en interaction : suspensions, milieux granulaires et micro-nageurs

Soutenue le 14 décembre 2021
École Polytechnique

Résumé :
Mes travaux ces dernières années ont eu pour fil conducteur l'étude et la simulation numérique de systèmes mécaniques formés solides en interaction : suspensions passives ou actives ou encore milieux granulaires. Le premier chapitre du manuscrit décrit certains problèmes posés par l'étude de ces systèmes.
On se concentre ensuite sur la simulation numérique de suspensions. Celle-ci nécessite la résolution d'un problème couplé entre le fluide de Stokes et les structures rigides. Dans le second chapitre, on cherche à résoudre précisément le problème quand les particules sont proches. La méthode proposée est basée sur un développement asymptotique explicite de la solution quand la distance inter-particulaire tend vers zéro. Dans le troisième chapitre on s'intéresse à l'utilisation de méthodes d'éléments finis de frontière pour la résolution du problème fluide-structure. On traite, dans le cas des équations de Stokes, les deux difficultés classiques pour ce type de méthodes : d'une part, le développement d'algorithmes rapides pour la résolution de systèmes pleins et d'autre part, le calcul des intégrales singulières intervenant dans le problème.
Dans le quatrième chapitre, nous nous intéressons à la conception d'algorithmes permettant de traiter les contacts (avec ou sans frottement) dans les systèmes que nous considérons. Les algorithmes décrits sont de type Dynamique des Contacts. A chaque pas de temps, les forces de contact sont calculées de manière implicite, comme solution d'un problème convexe sous contrainte. On présente des études rhéologiques de matériaux granulaires basées sur ces algorithmes.

Enfin, dans le cinquième chapitre, on s'intéresse à l'étude de micro-nageurs évoluant dans un fluide de Stokes. On cherche à savoir si ces nageurs peuvent "nager", c'est-à-dire, effectuer des déformations cycliques (des brassées) générant un déplacement donné. On propose un cadre général pour répondre à cette question en réécrivant le problème comme un problème de contrôle.

Thèses de doctorat d'université

▸ *Thèse soutenue par* : **Anouar ABDELDJAOUED FERFACHE**

▸ *Sous la direction de* : Salim Bouzebda (université de Technologie de Compiègne).

The semiparametric M-estimators and their applications to the multiple change point problems

Soutenue le 7 décembre 2021

Laboratoire de Mathématiques Appliquées de Compiègne, Université de Technologie de Compiègne

---

Résumé :

In this dissertation we are concerned with semiparametric models. These models have success and impact in mathematical statistics due to their excellent scientific utility and intriguing theoretical complexity. In the first part of the thesis, we consider the problem of the estimation of a parameter θ, in Banach spaces, maximizing some criterion function which depends on an unknown nuisance parameter h, possibly infinite-dimensional. We show that the m out of n bootstrap, in a general setting, is weakly consistent under conditions similar to those required for weak convergence of the non smooth M-estimators. In this framework, delicate mathematical derivations will be required to cope with estimators of the nuisance parameters inside non-smooth criterion functions. We then investigate an exchangeable weighted bootstrap for function-valued estimators defined as a zero point of a function-valued random criterion function. The main ingredient is the use of a differential identity that applies when the random criterion function is linear in terms of the empirical measure. A large number of bootstrap

resampling schemes emerge as special cases of our settings. Examples of applications from the literature are given to illustrate the generality and the usefulness of our results. The second part of the thesis is devoted to the statistical models with multiple change-points. The main purpose of this part is to investigate the asymptotic properties of semiparametric M-estimators with non-smooth criterion functions of the parameters of multiple change-points model for a general class of models in which the form of the distribution can change from segment to segment and in which, possibly, there are parameters that are common to all segments. Consistency of the semi-parametric M-estimators of the change-points is established and the rate of convergence is determined. The asymptotic normality of the semiparametric M-estimators of the parameters of the within-segment distributions is established under quite general conditions. We finally extend our study to the censored data framework. We investigate the performance of our methodologies for small samples through simulation studies.

▸ *Thèse soutenue par* : **Maryam AL ZOHBI**

▸ *Sous la direction de* : Mustapha Jazar (université Libanaise) et Ahmad El Hajj (université de Technologie de Compiègne).

Contributions to the existence, uniqueness, and contraction of the solutions to some evolutionary partial differential equations

Soutenue le 10 décembre 2021

Laboratoire de Mathématiques Appliquées de Compiègne, Université de Technologie de Compiègne

---

Résumé :

In this thesis, we are mainly interested in the theoretical and numerical study of certain equations that describe the dynamics of dislocation densities. Dislocations are microscopic defects in materials, which move under the effect of an external stress.

As a first work, we prove a global in time existence result of a discontinuous solution to a diagonal hyperbolic system, which is not necessarily strictly hyperbolic, in one space dimension. Then in another work, we broaden our scope by proving a similar result to a non-linear eikonal system, which is in

fact a generalization of the hyperbolic system studied first. We also prove the existence and uniqueness of a continuous solution to the eikonal system. After that, we study this system numerically in a third work through proposing a finite difference scheme approximating it, of which we prove the convergence to the continuous problem, strengthening our outcomes with some numerical simulations. On a different direction, we were enthused by the theory of differential contraction to evolutionary equations. By introducing a new distance, we create a new family of contracting positive solutions to the evolutionary p-Laplacian equation.

▸ *Thèse soutenue par* : **Hanine AWADA**

▸ *Sous la direction de* : Michele Bolognesi (IMAG, Montpellier).

Hypersurfaces cubiques spéciales

Soutenue le 21 octobre 2021
IMAG, Montpellier

Résumé :
Le problème de la rationalité des hypersurfaces cubiques lisses complexes de dimension 4 est un des problèmes les plus mystérieux en géométrie algébrique. On s'attend à ce que la cubique générale soit non rationnelle. Mais pour l'instant uniquement des exemples d'hypersurfaces cubiques rationnelles sont connues. Dans cette thèse, nous nous intéressons surtout aux hypersurfaces cubiques spéciales c'est-à-dire des hypersurfaces cubiques contenant une surface algébrique non homologue à une intersection complète. Elles forment une union infinie dénombrable de diviseurs C_d dans l'espace de modules des hypersurfaces cubiques lisses C. Dans un premier temps, nous étudions l'intersection des diviseurs C_d dans C. Ceci va nous permettre de construire de nouveaux exemples d'hypersurfaces cubiques rationnelles. Plus précisément, nous considérons des diviseurs qui paramètrent des hypersurfaces cubiques birationnelles à des fibrations en surfaces sur P^2. La rationalité des hypersurfaces cubiques en question est équivalente à celle des surfaces sur le corps de fonctions de P^2 et souvent cela dépend de l'existence de sections rationnelles des fibrations sur P^2 associées. En intersectant ces diviseurs avec d'autres (qui paramètrent des cubiques rationnelles), nous construisons de nouveaux exemples d'hypersurfaces cubiques qui : sont birationnelles à des fibrations en surfaces sur

P^2, sont rationnelles, mais dont la fibration associée n'admet pas de sections. Par la suite, nous montrons que l'intersection de jusqu'à 20 diviseurs C_{d_k} dans l'espace de modules C est non vide sous certaines conditions sur les discriminants d_k. En s'appuyant sur ce dernier résultat et en utilisant certaines propriétés de surfaces $K3$ de rang supérieur ou égal à 19, nous produisons, dans chaque diviseur C_d, une infinité de familles de dimension 1 d'hypersurfaces cubiques, telles que leurs motifs de Chow sont de dimension finie et de type abélien. Nous obtenons un résultat semblable aussi pour certaines variétés de Hyperkähler associées. Ensuite, nous considérons les familles universelles des hypersurfaces cubiques au-dessus des diviseurs C_d. Nous proposons deux méthodes différentes pour démontrer l'unirationalité de ces familles universelles pour $8 \le d \le 42$. Finalement, nous étudions une autre classe de variétés de Fano, les variétés de Gushel-Mukai de dimension 4, et nous développons une méthode générale pour démontrer l'unirationalité de certains espaces de modules des variétés de Gushel-Mukai avec m points marqués.

▸ *Thèse soutenue par* : **Enzo BATTISTELLA**

▸ *Sous la direction de* : Éric Deutsch (Gustave Roussy, Inserm, Paris-Saclay), Nikos Paragios (TheraPanacea, CentraleSupélec, université Paris-Saclay), Maria Vakalopoulou (MICS, CentraleSupélec, université Paris-Saclay).

High Dimensional Graph Theory Approaches for Various Omics Data

Soutenue le 13 juillet 2021
CentraleSupélec, Université Paris-Saclay

Résumé :
This thesis presented conditional-random-field-based approaches for medical applications on diverse omics data. This methodology allowed leveraging more complex, structural information and notable assets from graph theory, particularly interesting to express intricate biological properties. We demonstrated their usefulness for clustering and feature selection towards classification. Their relevance was exemplified over several medical applications and omics data.
First, we proposed a generic and resilient feature selection and classification pipeline we developed for COVID-19 patients staging and outcome predic-

tion using only CT scans and clinical information. Relying on an automated segmentation technique, we extracted imaging information. After a required step of dimensionality reduction, we singled out a few relevant factors for classification. We obtained promising performance outperforming radiologist experts on all the tasks. We further extended and adapted our methodology to cope with other different omics data, diseases, and medical expectations. Second, we focused on a clustering process towards the determination of a clinically relevant gene signature for pan-cancer lesions characterization. Oncology is a perfectly suited area for this kind of approach as tumors present a high heterogeneity while being a major affliction worldwide. Many studies are involved in its description through genomics. However, the task's complexity dwells in the data's large dimensionality and the experimental cost for identifying unknown gene functions. We highlighted our compact signature's relevance by resorting to unsupervised and supervised tumor types and subtypes distinction combined with statistically significant biological considerations. Finally, we formulated a new higher-order distance learning framework for feature selection and weighting, relying on conditional random fields and clustering. We proposed a mathematical optimization method for its resolution able to handle the high-order information complexity efficiently. Strong from this paradigm's expressiveness, we investigated the use of high-order graph theory properties as cliques, eccentricity, connectivity, or path lengths. We established those attributes' informativeness in classification settings and reported superior results than with standard approaches.

▸ *Thèse soutenue par* : **Mahmoud BENTRIOU**

▸ *Sous la direction de* : Paul-Henry Cournède (MICS, CentraleSupélec, université Paris-Saclay), Paolo Ballarini (MICS, CentraleSupélec, université Paris-Saclay).

Statistical Inference and Verification of Chemical Reaction Networks

Soutenue le 8 décembre 2021
CentraleSupélec, Université Paris-Saclay

Résumé :

Les réseaux de réactions chimiques (CRN) constituent un formalisme utilisé pour modéliser des processus biologiques. Quand la population est de taille modérée et supposée bien mélangée, le processus stochastique sous-jacent pour décrire ses dynamiques est une chaîne de Markov en temps continu (CTMC). Ce processus est dit sans mémoire : l'état futur du système ne dépend que de l'état courant.
L'inférence statistique de ce type de CTMC est complexe : le calcul de la vraisemblance est en général difficile à résoudre. Les méthodes ABC (Approximate Bayesian Computation) forment une classe de méthodes bayésiennes sans calcul de vraisemblance qui permettent d'approcher la distribution postérieure avec des simulations de Monte-Carlo.
La vérification de modèles, qui fut à l'origine développée pour garantir la fiabilité de systèmes et logiciels informatiques, se penche de plus en plus sur la biologie des systèmes. En effet, il y a un réel besoin de comprendre les interactions complexes entre molécules dans les systèmes biologiques. Malheureusement, l'espace d'états d'un CTMC défini par un CRN explose généralement, voir est infini. Pour palier à cela, des méthodes de vérification statistiques ont été développées. Le principe est de simuler un certain nombre de fois le modèle et de calculer le ratio des simulations qui ont vérifié une propriété. Récemment, une logique temporelle appelée HASL a été introduite pour la vérification statistique de modèles : elle adopte intrinsèquement le point de vue statistique de la vérification.
Dans cette thèse, nous nous intéressons à l'inférence statistique et la vérification statistique de chaines de Markov en temps continu définies par un modèle de réseau de réactions chimiques. Notre contribution tient principalement dans la formulation d'un algorithme ABC combiné avec le formalisme HASL appelé automaton-ABC. Nous appliquons cette méthode haut niveau sur plusieurs tâches d'inférence statistique et de vérification pour des CTMCs issus de systèmes biologiques, impliquant notamment des modèles oscillatoires et des problèmes d'atteignabilité bornés en temps. L'implémentation des méthodes présentées est documentée et a conduit au développement d'une bibliothèque dans le langage de programmation Julia.

- *Thèse soutenue par* : **Julien BERNIS**
- *Sous la direction de* : Piernicola Bettiol (université de Brest).

Conditions nécessaires et suffisantes en contrôle optimal et applications

Soutenue le 23 février 2021
Université de Brest, Laboratoire de Mathématiques de Bretagne Atlantique

---

Résumé :
La partie 1 de cette thèse traite de la programmation dynamique en contrôle optimal. On considère un problème de Bolza non-autonome en contrôle optimal pour lequel la dynamique et le lagrangien sont continus en temps seulement presque partout (avec limites à droite et à gauche partout). Plusieurs caractérisations (proximale, de Dini, et viscosité) de la fonction valeur du problème en tant qu'unique solution généralisée de l'équation de Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) correspondante sont démontrées dans la classe des fonctions semi-continues inférieurement. Le cas où une contrainte d'état est ajoutée au problème précédent est aussi considéré. Des conditions de compatibilité ad hoc entre l'ensemble des contraintes A et la fonction dictant la dynamique F sont introduites, ce qui permet d'approximer dans $W^{1,1}$ les trajectoires non-faisables par des F-trajectoires faisables et par suite d'établir différentes caractérisations (proximale, de Dini, et viscosité) de la fonction valeur en tant qu'unique solution de l'équation (HJB).
La partie 2 de cette thèse traite de résultats obtenus concernant les conditions nécessaires d'optimalité en calculs de variations et la régularité des minimiseurs. Le problème considéré est celui d'un problème de Bolza non-autonome d'ordre N dans lequel le lagrangien L est seulement Borel mesurable, et peut prendre pour valeur +1. On établit d'abord les conditions nécessaires d'optimalité sous la forme d'une équation du type Euler-Lagrange, ainsi que sous la forme d'une équation du type Erdmann – Du Bois-Reymond, sans imposer au lagrangien la convexité par rapport à sa dernière variable, ni aucune condition de croissance particulière. En imposant en plus à L une condition de croissance plus générale que la croissance super-linéaire utilisée habituellement, les conditions nécessaires sont mises à profit afin d'établir que la dernière dérivée d'un minimiseur de ce problème est essentiellement bornée.
Mots-clés : Optimisation, contrôle optimal, équation de Hamilton-Jacobi-Bellman, fonction valeur, contrainte d'état, calcul des variations, analyse non lisse, problème de Bolza, conditions nécessaires d'optimalité, régularité des minimiseurs.

▸ *Thèse soutenue par* : **Guillaume BONNET**

▸ *Sous la direction de* : Jean-Marie Mirebeau (CNRS et Centre Borelli, ENS Paris-Saclay, université Paris-Saclay), Frédéric Bonnans (Inria Saclay et L2S, CentraleSupélec, université Paris-Saclay).

Discrétisation aux différences finies monotones d'équations aux dérivées partielles dégénérées elliptiques en utilisant la première réduction de Voronoi

Soutenue le 1er décembre 2021
LMO, Université Paris-Saclay

Résumé :
Dans cette thèse, nous utilisons la première réduction de Voronoi, un outil issu de la théorie de la géométrie des réseaux de petite dimension, afin de construire des discrétisations aux différences finies monotones sur grilles cartésiennes de certains opérateurs différentiels dégénérés elliptiques. Nous étudions les schémas numériques qui résultent de cette construction.
La première partie de la thèse est consacrée à l'étude de propriétés générales de la première réduction de Voronoi et de son extension aux formes quadratiques inhomogènes. Nous utilisons ces propriétés pour prouver certaines garanties théoriques à propos des schémas aux différences finis associés. Nous recommandons une discrétisation particulière, consistante à l'ordre deux, d'opérateurs différentiels linéaires anisotropes en dimensions deux et trois comprenant à la fois des termes d'ordres un et deux. Nous prouvons la quasi-optimalité de cette construction. Par ailleurs, nous étudions certaines propriétés de régularité et de compacité de la première réduction de Voronoi en dimensions allant jusqu'à quatre.
La seconde partie de la thèse est consacrée à l'étude de discrétisations de certaines équations particulières. Nous concevons une méthode permettant d'approcher efficacement des distances de Randers et des distances de transport optimal associées, en utilisant un principe de grandes déviations. Nous discrétisons les opérateurs de Pucci et de Monge-Ampère, reformulés comme des maxima d'opérateurs semi-linéaires ; en dimension deux, nous montrons que les maxima apparaissant naturellement dans les discrétisations étudiées admettent des expressions de forme fermée, ce qui réduit le coût numérique de leur évaluation. Nous étudions le caractère bien posé et, dans certains cas, la convergence d'un schéma numérique pour le second problème aux limites pour l'équation de Monge-Ampère, qui est le problème

aux limites naturel pour cette équation lorsqu'elle est associée à un problème de transport optimal. Nous présentons une application numérique au problème du réfracteur en champ lointain en optique non imageante.

▸ *Thèse soutenue par* : **João Guilherme CALDAS STEINSTRAESSER**

▸ *Sous la direction de* : Antoine Rousseau (INRIA LEMON, Montpellier) et Vincent Guinot (université de Montpellier).

**Couplage de modèles 'shallow water' à porosité à différentes échelles
en présence d'anisotropie**

Soutenue le 1er octobre 2021
INRIA LEMON, Montpellier

Résumé :
Cette thèse de doctorat porte sur l'étude du couplage des modèles de Saint-Venant non linéaires à différentes échelles, appliqué à la simulation numérique d'inondations urbaines. Des simulations précises dans ce domaine ont, en général, un coût computationnel prohibitif dû aux petites tailles de maille nécessaires pour la discrétisation spatiale de la géométrie urbaine et, par conséquent, les petits pas de temps restreints par des conditions de stabilité. Au cours des deux dernières décennies, des modèles de Saint-Venant à porosité ont été proposés comme une alternative, s'agissant des modèles à échelle élargie utilisant des mailles et des pas de temps plus grands, et capables de fournir des bonnes approximations globales aux solutions des modèles fins, avec un temps de calcul considérablement plus petit. Néanmoins, certains phénomènes à petite échelle ne sont pas capturés par ce type de modèle. Nous cherchons donc à formuler un modèle numérique couplant les modèles à petite et à large échelle, afin d'obtenir des solutions plus précises à l'intérieur des zones urbaines, toujours avec des temps de calcul plus petits par rapport à la simulation des modèles fins. La ligne directrice de ce travail est l'utilisation de méthodes itératives de parallélisation en temps, du type prédicteur-correcteur, qui s'adaptent naturellement à cette formulation fin/-grossier. Nous nous concentrons sur la méthode Pararéel (parareal method), une des méthodes de parallélisation en temps les plus connues. Comme défi majeur, la parallélisation en temps présente en général des instabilités et

une convergence lente dans le cadre de la résolution de problèmes hyperboliques ou dominés par l'advection, comme les équations de Saint-Venant. Nous considérons donc une variante de la méthode qui incorpore des modèles d'ordre réduit (Reduced-Order models - ROMs) formulés à la volée au cours des itérations de la méthode Pararéel, utilisant la decomposition orthogonale aux valeurs propres (Proper Orthogonal Decomposition - POD) et la méthode d'interpolation empirique (Empirical Interpolation Method - EIM), et capable d'améliorer la stabilité et la convergence de la méthode pour la résolution de problèmes hyperboliques non linéaires. Nous étudions les limitations de cette méthode Pararéel basée sur des ROMs et nous proposons des modifications qui fournissent des améliorations additionnelles à la stabilité et la convergence : l'enrichissement des données d'entrée pour les techniques de réduction de modèle ; la formulation des ROMs locaux en temps ; et l'incorporation d'une méthode Pararéel adaptative proposée récemment dans la littérature. La méthode Pararéel originale et celle basée sur des modèles réduits, y compris les modifications proposées, sont comparées et évaluées en termes de stabilité, convergence vers la solution du modèle fin et accélération de la simulation numérique obtenue dans une implémentation parallèle. Dans un premier temps, les méthodes et améliorations proposées sont formulées, étudiées et implémentées en considérant des simulations numériques couplant les équations de Saint-Venant classiques (sans le concept de porosité) à différentes échelles. Après cette étude initiale, nous appliquons les méthodes au couplage des équations classiques et des équations à porosité, pour la simulation d'inondations urbaines.

▸ *Thèse soutenue par* : **Tiffany CHERCHI**

▸ *Sous la direction de* : Benoite De Saporta (IMAG, Montpellier) et François Dufour (Institut Polytechnique de Bordeaux).

Optimisation de politiques séquentielles d'emploi et de maintenance prédictive de systèmes multi-composants

Soutenue le 16 décembre 2021
IMAG, Montpellier

Résumé :
On présente un problème d'optimisation pour la maintenance d'un système multi-composants conçu par Thales. Le système est requis pour effectuer

des missions qui peuvent entraîner des dégradations et pannes aléatoires de ses composants, ainsi que des pénalités en cas d'échec. L'objectif industriel est alors de déterminer une politique permettant d'assurer les missions tout en minimisant les coûts de maintenance, sur tout un horizon. L'idée principale de ce travail est de modéliser l'évolution du système via le formalisme d'un Processus Markovien Décisionnel (MDP). Ainsi, l'objectif est de résoudre le problème d'optimisation mathématique associé : déterminer pour chaque date de décision et chaque état du système, l'action qui minimise la somme des coûts générés sur tout l'horizon. C'est ce qu'on appelle une politique. Le modèle défini donne lieu à un problème d'optimisation non standard dans le cadre des MDP, car l'espace d'états est continu et le noyau de transition n'est pas analytique, mais seulement simulable. Pour rechercher une politique optimale, on propose de discrétiser la règle de décision du MDP. Ceci permet de prendre des décisions sur un nombre itérable d'états, sans discrétiser la dynamique du MDP. Enfin, le noyau de transition n'étant toujours pas explicite, on implémente et on compare deux méthodes d'optimisation stochastiques basées sur les simulations afin d'approcher et d'expliciter une politique optimale, interprétable et applicable industriellement.

▸ *Thèse soutenue par* : **Marie CHION**

▸ *Sous la direction de* : Frédéric Bertrand (université de Technologie de Troyes) et de Christine Carapito (CNRS - université de Strasbourg).

Développement de nouvelles méthodologies statistiques pour l'analyse de données de protéomique quantitative

Soutenue le 16 décembre 2021

Institut de Recherche Mathématique Avancée et Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien, Université de Strasbourg

---

Résumé :
L'analyse protéomique consiste à étudier l'ensemble des protéines exprimées par un système biologique donné, à un moment donné et dans des conditions données. Les récents progrès technologiques en spectrométrie de masse et en chromatographie liquide permettent d'envisager aujourd'hui des études protéomiques à large échelle et à haut débit. Ce travail de thèse porte sur le développement de méthodologies statistiques pour l'analyse

des données de protéomique quantitative et présente ainsi trois principales contributions. La première partie propose d'utiliser des modèles de régression par spline monotone pour estimer les quantités de tous les peptides détectés dans un échantillon grâce à l'utilisation de standards internes marqués pour un sous-ensemble de peptides ciblés. Une extension de ce travail s'appuyant sur une approche par processus gaussiens est également décrite. La deuxième partie présente une stratégie de prise en compte de l'incertitude induite par le processus d'imputation multiple dans l'analyse différentielle. A partir des règles de Rubin pour l'imputation multiple, une statistique de test t-modéré est proposé, tenant compte des variabilités intra- et inter-imputation. Cette stratégie a été implémentée dans le package R mi4p et un tutoriel de ce package est détaillé dans le manuscrit. Enfin, la troisième partie prolonge la partie précédente en proposant un cadre bayésien pour l'analyse différentielle, permettant notamment de tenir compte des corrélations entre les intensités des peptides.

- *Thèse soutenue par* : **Grégoire CLARTÉ**
- *Sous la direction de* : Christian Robert (université Paris Dauphine) et Robin Ryder (université Paris Dauphine).

Quelques contributions aux méthodes computationnelles bayesiennes, avec applications à la phylolinguistique

Soutenue le 6 octobre 2021
Université Paris Dauphine

Résumé :
Ce travail est la concaténation de trois parties, ayant pour point commun de porter sur les statistiques bayesiennes. La première partie concerne les méthodes bayesiennes d'inférence de phylogénies, avec une application à l'histoire des langues des Signes. Nous dévelopons un modèle pour des données matricielles, dont lignes et colonnes sont corrélées ; ces données peuvent représenter des traits socio-culturels, phénotypiques, ou, comme dans notre cas, des données lexicales. Nous montrons comment calculer la vraisemblance de ce modèle et proposons des méthodes numériques pour échantillonner depuis le posterior associé, basées sur un Monte Carlo sequentiel

associé à un tempering exotique. Les résultats sur données simulées sont plus que satisfaisants, tandis que les résultats sur données réelles apportent des éléments de réponses aux questions des linguistes. La deuxième partie traite des méthodes bayésiennes approchées. Ces méthodes s'utilisent lorsque les vraisemblances sont intractables, elles sont, hélas, particulièrement sensibles au fléau de la dimension, requerrant des ressources exponentiellement élevées à mesure que la dimension croit. Pour résoudre ce problème, nous explorons une version à la Gibbs des méthodes ABC traditionnelles, où l'on met à jour sequentiellement les coordonnées des paramètres selon des lois conditionnelles approchées reposant sur des statistiques résumées de dimension moindre. Bien qu'il ne soit pas possible d'utiliser des méthodes classiques pour étudier cette méthode, nous avons été capables de montrer sa convergence vers une mesure stationnaire dépourvue de forme explicite. Les expériences démontrent une efficacité particulière parrapport aux méthodes standard. La troisième partie est dédiée aux méthodes numériques particulaires. Au cours des dernières décénies, des méthodes MCMC non linéaires ont été dévelopées ; bien qu'attirantes par leur vitesse de convergence et leur efficacité, leur implémentation et étude théorique reste problématique. Nous introduisons une large classe de méthodes non linéaires qu'il est possible d'étudier à l'aide de limites champ-moyen de particules en interaction. L'implémentation que l'on propose repose sur le calcul parallèle sur GPU.

▸ *Thèse soutenue par* : **Alexandre CONSTANTIN**

▸ *Sous la direction de* : Stéphane Girard (Inria).

Time-Series Analysis of Massive Satellite Images : Application to Earth Observation

Soutenue le 13 décembre 2021

Laboratoire Jean Kuntzmann et Université Grenoble Alpes

Résumé :

This thesis takes place in the context of the processing of the data from Sentinel-2 mission. This mission, initiated by the European Space Agency and launched in 2017, produces an unprecedented amount of Satellite Image Time-Series (SITS). Among the key analyses of these images, this thesis fo-

cuses on the classification task, i.e. land use or land cover maps that can be produced using spectro-temporal aspect of the Sentinel-2 SITS.
Two main difficulties are identified in this thesis for the process of Sentinel-2 SITS. First, the unprecedented amount of data requires both scalable classifiers and code optimization techniques (such as parallel processing). Second, the acquisition noise (clouds, shadows) combined with the temporal aspect results in irregular and unevenly sampled time-series. Conventional approaches re-sample time-series to a set of time stamps, then they use machine learning techniques to classify vectors at a large-scale (national scale). The main disadvantage of this two-step processing approach is that it increases the number of operations applied to the SITS, implying a more difficult transition to massive amount of data. To a lower extent, the re-sampling step may slightly alter the temporal characteristics of the data.
This thesis contributions are the following. We introduce a novel model-based approach with the ability to classify irregularly sampled time-series based on a mixture of multivariate Gaussian processes. A two-step approach has been used, by defining on one hand a model of uni-variate time-series, independent from the spectral wavelength point of view, then by considering on the second hand both spectral and temporal information from SITS. These models allow jointly a reconstruction of unobserved or noisy data. Estimation of both models has been implemented using a parallelized python code to be scalable to large-scale data-sets. The two models are evaluated numerically on Sentinel-2 SITS in terms of classification and reconstruction accuracy and are compared with conventional approaches. Analyses of the results illustrate the relevance of the two models and the benefit of using interpretable parametric models.
Mots-clés : Time Series, Optimization, Big Data, Earth Observation.

▸ *Thèse soutenue par* : **Josué CORUJO RODRÌGUEZ**
▸ *Sous la direction de* : Djalil Chafaï (université Paris Dauphine).

Modèles de Moran multi-alléliques et distributions quasi-stationnaires

Soutenue le 3 décembre 2021
Université Paris Dauphine

Résumé :

L'objectif principal de cette thèse est d'étudier l'évolution, en temps long et pour une grande taille de population, des modèles de Moran multi-alléliques, qui sont des processus de Markov à temps continu et à espace discret, inspirés de modèles mathématiques pour la biologie. Nous nous intéressons à l'étude, entre autres aspects, de la relation entre le processus de Moran, compris comme un système de particules en interaction, et la théorie des distributions quasi-stationnaires. Plus précisément, nous exhibons des phénomènes de propagation du chaos lorsque la taille de la population est grande, et nous établissons des contrôles quantitatifs de la convergence en temps long vers l'équilibre. Les principaux résultats sont divisés en trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous montrons que la mesure de probabilité empirique induite par le système de particules converge, lorsque la taille de la population est grande, vers la loi d'une chaîne de Markov absorbante conditionnée à ne pas être absorbée. De plus, nous établissons un contrôle de cette convergence, en prouvant une propagation du chaos uniforme en temps. Nous prouvons également la normalité asymptotique du biais et nous fournissons une expression explicite pour la variance asymptotique, utilisée ensuite pour définir un autre système de particules avec une erreur quadratique plus petite. Dans le deuxième chapitre, nous considérons un modèle plus simple où l'espace d'état est fini et le taux de mortalité est uniforme. Dans ce contexte, nous trouvons une expression explicite pour le spectre du générateur du système de particules en termes de spectre de la matrice des taux de mutation. De plus, nous étudions l'ergodicité du processus et, pour un schéma particulier de mutation, mutation indépendante des parents, nous sommes en mesure de prouver l'existence de phénomènes de cutoff pour les distances de variation totale et chi-deux. Le troisième chapitre est consacré à l'étude d'un cas particulier, où le processus de mutation correspond à une marche aléatoire asymétrique sur le graphe cyclique. Nous montrons que ce modèle possède une solvabilité remarquable, malgré le fait qu'il soit non-réversible avec une distribution invariante non-explicite.

▸ *Thèse soutenue par* : **Rihab DAADAA**

▸ *Sous la direction de* : Simon Labrunie (IECL, université de Lorraine) et Jean Rodolphe Roche (IECL, université de Lorraine).

Formulation mixte augmentée d'un modèle « Full-wave » tridimensionnel dans un plasma froid : Analyse numérique d'une approximation P2-P1

Soutenue le 13 décembre 2021
IECL, Universite de Lorraine

Résumé :
L'objet de ce mémoire de thèse est d'étudier une méthode de simulation numérique d'un modèle dit Full wave de la propagation dans un tokamak d'une onde électromagnétique injectée par un ensemble d'antennes installées sur le bord de l'enceinte de confinement. Une méthode de simulation par éléments finis de Lagrange est déployée. Dans le premier chapitre est introduit le modèle physique considéré pour décrire la propagation d'une onde électrostatique d'une fréquence proche de la résonance hybride dans un plasma dit froid et confiné par un champ magnétique à l'intérieur d'un tokamak. La propagation des ondes électromagnétiques est modélisée par les équations de Maxwell. Une approximation de la solution harmonique en temps est considérée. Dans le chapitre deux sont rappelées les formulations varationnelles mixtes et mixtes augmentées déjà étudiées précédemment. Ces formulations nous permettent de chercher des solutions dans $(H^1(\Omega))^3$ et donc une approximation en éléments finis conformes dans cet espace. Le chapitre trois est dédié à la présentation de la discrétisation des équations du modèle en trois dimensions d'espace. Dans le chapitre quatre il est démontré le caractère bien posé du système d'équations discret lorsqu'on considère une approximation de type Taylor-Hood P_2-P_1. Un résultat d'existence et unicité de la solution dans le cas d'un tore polyédrique est présenté. Le chapitre 5 est dédié aux simulations numériques. En premier on explicite les termes du tenseur diélectrique K ainsi que ses dérivées, qui sont nécessaires au montage de la matrice de raideur du système. Les premières simulations concernent le cas où la densité des électrons et des ions est constante. On présente ensuite des résultats dans le cas où les densités ont un profil parabolique. Le cas où le vecteur d'onde est une fonction de la distance au centre du tokamak est également considéré.

▸ *Thèse soutenue par* : **Antonin DELLA NOCE**
▸ *Sous la direction de* : Paul-Henry Cournède (MICS, CentraleSupélec, uni-

versité Paris-Saclay), Amélie Mathieu (INRAE, AgroParisTech, UMR Éco-Sys).

Symmetric and heterogeneous population models : approximations for simulation and statistical inference

Soutenue le 29 mars 2021
CentraleSupélec, Université Paris-Saclay

Résumé :
Les mouvements collectifs décrivent des populations dans lesquelles les interactions entre individus sont le moteur de leurs déplacements dans l'espace et de leurs transformations dans le temps. La compréhension et le contrôle des mouvements collectifs constituent des enjeux majeurs dans de nombreux domaines, notamment pour l'étude des écosystèmes (dynamique des essaims d'animaux), la sécurité dans les grands rassemblements et les bâtiments (mouvement de foule), ou encore l'agriculture (étude de la croissance des plantes). Les modèles de population que nous considérons sont des systèmes d'équations différentielles ayant la propriété d'être hétérogènes, i.e., constituées d'individus avec des caractéristiques différentes, et ces caractéristiques ont une influence sur la dynamique. Cette hypothèse est motivée par l'application agricole, où il est question d'étudier les interactions entre plantes de différentes variétés, voire de différentes espèces. Ces systèmes sont également supposés symétriques, i.e., ayant une dynamique invariante par permutation des individus, ce qui est une caractéristique largement répandue au sein des modèles de mouvement collectif, et qui permet de nombreuses simplifications. Un certain nombre de défis restent toutefois à relever pour que ces modèles soient utilisés dans des cas d'application concrets, et nous nous concentrons en particulier sur les problèmes liés à l'inférence statistique, i.e., la confrontation du modèle à des données expérimentales, des observations réalisées sur le système réel étudié. Un premier niveau de difficulté est d'ordre computationnel : la simulation de grandes populations en interaction peut s'avérer trop coûteuse en temps de calcul, et elle constitue ainsi un premier obstacle à l'étude de la population à une échelle macroscopique. Un second niveau difficulté a trait à la qualité des données : du fait de la complexité du système modélisé, les observations expérimentales ne peuvent permettre de caractériser exactement la dynamique du système (en particulier car elles ne portent généralement que sur une sous-partie de la population), et il est nécessaire de quantifier

les incertitudes liées aux imperfections dans l'acquisition de ces données. Dans cette thèse, nous caractérisons l'ensemble des sources d'incertitude liées aux observations partielles des systèmes symétriques et hétérogènes dans un cadre bayésien. Certaines sources d'incertitude, notamment celle venant d'une connaissance inexacte de la taille de la population et des propriétés des individus non observés, donnent lieu à des problèmes d'inférence particulièrement difficiles, que nous nous proposons d'approcher en utilisant des représentations macroscopiques de la population. Ces approximations statistiques du mouvement global de la population sont basées sur des simulations numériques des distributions limites de champ moyen associées au mouvement collectif, distribution s'exprimant comme la solution d'une équation de transport non-locale.

▸ *Thèse soutenue par* : **Amir DIB**

▸ *Sous la direction de* : Nicolas Vayatis (ENS Paris-Saclay) et Mathilde Mougeot (ENSIEE, ENS Paris-Saclay).

Apprentissage de motifs en grande dimension pour les séries symboliques

Soutenue le 11 octobre 2021

Université de Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, Centre Borelli

Résumé :
Bien que l'application des méthodes apprentissage automatique dans divers contextes ait connu une croissance rapide au cours de la dernière décennie, son utilisation dans les environnements industriels reste problématique. La raison principale tient au conflit entre les procédures historiques établies et le manque de transparence du processus de décision d'une chaîne d'apprentissage automatique. Par ailleurs, la nature et la qualité des données disponibles ne permet pas l'utilisation directe des modèles d'apprentissage statistiques traditionnels. La plupart des bases de données industrielles n'ont pas été construites dans l'objectif de satisfaire aux standards du traitement automatique mais pour se conformer a des exigences réglementaires et assister aux tâches administratives. En particulier, les données non numériques ou symboliques sont couramment utilisées pour leur versatilité. Des exemples de telles données sont les documents textuels, les séries d'événements d'un ordinateur de bord ou encore les séquences ADN.

La motivation première de cette thèse est la conception d'approches humainement interprétable pour la maintenance prédictive du parc ferroviaire français. Nous proposons d'aller au-delà des approches standards par l'utilisation de méthodes associant techniques d'extraction de motifs et approches statistiques pour la détection d'anomalie. Le contenu de cette thèse trouve une application plus large dans n'importe quel domaine d'application nécessitant le traitement de séries temporelles symboliques.
La première contribution consiste en une solution complète d'apprentissage automatique pour la maintenance prédictive d'une large flotte de trains. Comme seconde contribution, nous proposons une nouvelle méthode pour les ensembles de données symboliques basée sur un modèle génératif bayésien qui permet l'amélioration des métriques de références de façon interprétable pour un ensemble de données symboliques. Dans une troisième contribution, nous introduisons une nouvelle méthode d'extraction progressive basée sur les complexités locales afin d'obtenir des intervals de confiance sur la fréquence des motifs. Finalement, une nouvelle méthode générale d'optimisation stochastique basée sur un échantillonage alternatif est proposé. Cette méthode s'applique au cas spécifique de l'apprentissage bayésien dans le cadre de l'inférence variationnelle. Dans ce cadre, nous fournissons une preuve théorique et empirique de la supériorité de cette approche par rapport aux méthodes les plus avancées.
Mots-clés : Apprentissage automatique, serie temporelle, statistiques bayesiennes, detection d'anomalie, quantization optimale, maintenance predictive.

▸ *Thèse soutenue par* : **Anatole ERTUL**

▸ *Sous la direction de* : Oriane Blondel (CNRS, ICJ) et Fabio Toninelli (Technical University of Vienna).

Diffusion et relaxation pour des systèmes de particules avec contraintes cinétiques

Soutenue le 1er décembre 2021
ICJ, Université Claude Bernard Lyon 1

Résumé :
Dans cette thèse, nous étudions des modèles de particules en interaction particuliers appelés KCM (Kinetically Constrained Models). Il s'agit de pro-

cessus de Markov sur un espace de configuration $\{0,1\}^G$ où G est l'ensemble des sommets d'un graphe, le plus souvent $\mathbb{Z}^d$, qui ont été introduits dans les années 1980 par des physiciens pour répondre à des questions sur les transitions de phase vitreuses. L'étude se fait sur deux axes. Pour un premier modèle particulier, nous établissons un résultat précis sur la convergence du processus vers une mesure invariante, en démontrant au passage que ce modèle est un nouvel exemple de phénomène appelé *cut-off* : la distance en variation totale entre la loi du processus et la mesure d'équilibre chute brusquement autour d'une valeur critique qui dépend de la taille du système. Dans un second temps, nous étudions un autre modèle, conservatif, dans lequel on suit la trajectoire d'une particule marquée. Il avait été démontré en 2018 que cette trajectoire admet une limite diffusive, avec un coefficient de diffusion strictement positif. Nous prolongeons ici ce résultat en donnant des bornes précises de ce coefficient lorsque la densité de particule tend vers 1.

▸ *Thèse soutenue par* : **Amandine ESCALIER**

▸ *Sous la direction de* : Jérémie Brieussel (IMAG, Montpellier), Romain Tessera (IMJ-PRG).

Géométries locale et asymptotique des groupes

Soutenue le 1er octobre 2021
Université de Paris

Résumé :
Ce manuscrit présente les travaux de recherche effectués durant ma thèse sur les questions de rigidité Locale-Globale et les problèmes d'équivalence mesurée. Après une courte introduction, nous présentons dans la première partie les résultats obtenus sur la LG-rigidité et correspondant à l'article [Esc20]. Un graphe transitif ⊠ est dit Locale-Globale rigide s'il existe R > 0 tel que tout autre graphe dont les boules de rayon R sont isométriques aux boules de rayon R de ⊠ est revêtu par ⊠. Un exemple de tel graphe est donné par l'immeuble de Bruhat-Tits de PSLn(⊠) lorsque n ≥ 4 et ⊠ est un corps local non-archimédien de caractéristique nulle. Dans cette première partie nous étendons cette propriété de rigidité à une nouvelle classe de graphes quasii sométriques à l'immeuble parmi lesquels figurent les réseaux sans-torsion de SLn(⊠). La preuve est l'occasion de démontrer un résultat sur la

structure locale des immeubles. Nous montrons que si l'on y considère une PSLn(⊠)-orbite donnée, alors un sommet est uniquement déterminé par les sommets voisins contenus dans cette orbite. Dans notre deuxième partie nous exposons les travaux (en cours) portant sur les équivalences orbitales et mesurées. On dit que deux groupes sont orbite équivalents si tous deux admettent une action sur un même espace de probabilité qui partagent les mêmes orbites (à ensemble de mesure nulle près). Notamment, le théorème d'Ornstein et Weiss stipule que tout groupe infini moyennable est orbite équivalent au groupe des entiers. Delabie, Koivisto, Le Maître et Tessera ont introduit une version quantitative de l'équivalence orbitale et de son pendant mesuré afin d'affiner cette relation au sein des groupes moyennables infinis. Ils obtiennent en outre des obstructions à l'existence de telles équivalences à l'aide du profil isopérimétrique. Dans cette partie nous proposons de répondre au problème inverse de la quantification (trouver un groupe qui est orbite ou mesure équivalent à un groupe prescrit avec quantification prescrite) dans le cas du groupe des entiers ou du groupe d'allumeur de réverbère. Pour ce faire nous nous basons sur les produits diagonaux introduits par Brieussel et Zheng fournissant des groupes à profil isopérimétrique prescrit.

- *Thèse soutenue par* : **Raphaël GROSCOT**
- *Sous la direction de* : Laurent Cohen (université Paris Dauphine).

Représentations séparables de formes 3D pour le traitement de formes

Soutenue le 29 juin 2021
Université Paris Dauphine

Résumé :

L'analyse et la synthèse de formes 3D deviennent un enjeu majeur dans de plus en plus d'industries. Du divertissement à l'imagerie médicale, en passant par les véhicules autonomes, de nombreuses innovations exigent de traiter des formes en quantités de plus en plus importantes. Cependant, elles posent deux défis majeurs. Le premier est leur manque de représentation canonique. Voxels, nuages de points ou maillages ont chacun leurs avantages et inconvénients. Le second est la relation entre forme et sens.

Les formes naturelles peuvent généralement être décomposées en parties, mais la fonction est difficile à démêler de la géométrie. Cette thèse explore plusieurs représentations de formes séparant la sémantique de la géométrie, à des fins de génération. Le premier mouvement s'appuie sur l'apprentissage automatique et les réseaux de neurones. Ces derniers ont démontré leur capacité à séparer le sens de l'apparence dans les images, et nous montrons comment ces idées s'appliquent aux formes 3D. Nous nous sommes concentrés sur le problème des recombinaisons de formes, i.e. la génération de formes dont les éléments constitutifs proviennent de modèles différents. Ce problème présente une ambiguïté inhérente, une tension entre la fidélité d'une pièce donnée à sa forme originale et la cohérence de l'objet nouvellement assemblé. Nous abordons cette ambiguïté au moyen de modèles génératifs, dont les espaces latents servent d'intermédiaire de plausibilité. Nous concevons ici deux réseaux de neurones spécifiquement qui reproduisent la segmentation des formes au sein de leurs espaces latents. Le premier fonctionne avec des nuages de points, naturellement séparables en sous-nuages. Il dédie des coordonnées spécifiques du code latent à chaque partie sémantique, en utilisant des encodeurs dédiés. Nous démontrons comment ceci permet de réaliser des échanges de parties et des interpolations. Le second étend la technique aux voxels, en intégrant la recombinaison via transformations affines au réseau lui-même. On l'entraîne de bout en bout au démontage et au remontage de formes, sans supervision. Les recombinaisons s'opèrent en intervenant entre ces deux étapes. Le second mouvement, plus poussé, s'appuie sur une nouvelle représentation de formes, baptisée Deformable Voxel Grid. Il s'agit d'un volume actif qui, fondé sur une minimisation d'énergie, adapte l'espace ambiant à la forme. Il facilite traitement et analyse ultérieurs, en séparant la géométrie en contenant et contenu topologique. Ceci repose sur une étape inversible, le recalage, qui permet d'interpréter notre modèle comme un générateur de forme à espace latent explicite et discret. Nous proposons d'abord plusieurs approximations qui permettent d'appliquer des DVG à n'importe quel jeu de données, automatiquement. Notre méthode d'optimisation ne requiert que des informations de surface éparses, et s'exécute en parallèle sur GPU, en l'implémentant comme un réseau de neurones. Après avoir calculé des DVG sur des formes variées, telles que des chaises ou des avions, nous réalisons une analyse approfondie de solutions naïves qui, exploitant la séparation contenant/contenu, marchent étonnamment bien sur un éventail d'applications : exploration de données, recherche par similarité, synthèse de forme par déformation, approximation avec des quadrilatères et correspondances de formes. Enfin, nous élaborons un cadre plus large pour le morphing de formes, s'appuyant sur une métrique entre formes recalées dans leurs DVG respectifs. La recherche d'un chemin minimal entre deux points de l'espace latent discret des DVG fournit les images clés d'un morphing, et les étapes intermédiaires s'interpolent facilement. Nous menons des expériences qui montrent que nos morphings sont qualitativement comparables à l'état de l'art en deep learning, tout en nécessitant des ensembles de données beaucoup plus maigres et en étant non seulement explicables, mais aussi modifiables en cas d'erreur.

▸ *Thèse soutenue par* : **Amirali HANNANI**

▸ *Sous la direction de* : Stefano Olla (université Paris Dauphine).

Perturbation aléatoire de certains systèmes de particules en interaction,
liés à la mécanique quantique

Soutenue le 16 décembre 2021
Université Paris Dauphine

Résumé :
Cette thèse est consacrée à l'étude de deux projets de recherche distincts. Ils partagent le même esprit dans le sens suivant : dans ces deux problèmes, un système de particules en interaction lié à la mécanique quantique est perturbé par un certain bruit/désordre "aléatoire". Ces perturbations changent la nature de la dynamique et conduisent à des phénomènes nouveaux et intéressants. Le premier est une chaîne désordonnée unidimensionnelle d'oscillateurs harmoniques quantiques, où une limite hydrodynamique dans l'échelle hyperbolique du temps et de l'espace est prouvée ; la distribution de l'élongation, de la quantité de mouvement et de l'énergie converge vers la solution de l'équation d'Euler dans cette échelle. La localisation d'Anderson découple l'énergie mécanique et thermique, ce qui permet de fermer l'équation macroscopique hors de l'équilibre thermique. Ce résultat indique également que le profil de température n'évolue pas dans le temps. Un phénomène similaire à la décroissance de la corrélation facilite le traitement de la nature quantique du système. A notre connaissance, c'est l'un des premiers exemples où l'on peut prouver rigoureusement la limite hydrodynamique pour un système quantique. Dans le deuxième modèle, une perturbation stochastique conservant la masse d'une certaine classe d'équations de Schr"odinger discrètes non-linéaires est introduite, modélisant l'action d'un bain de chaleur à une température donnée. La mesure de Gibbs correspondante est la seule mesure invariante de la dynamique, fournissant des propriétés d'ergodicité et de mélange temporel. En guise d'application, on étudie la limite de grand temps, l'approximation du continuum, et la limite de basse température dans le cas cubique unidimensionnelle focalisante.

▸ *Thèse soutenue par* : **Brice HANNEBICQUE**

▸ *Sous la direction de* : Érick Herbin (MICS, FdM CNRS, CentraleSupélec, université Paris-Saclay).

Régularité de processus stochastiques généralisés

Soutenue le 23 mars 2021
CentraleSupélec, Université Paris-Saclay

Résumé :
De plus et moins récentes études révèlent un besoin par la communauté probabiliste de comprendre des processus indexés par des espaces plus généraux que $\mathbb{N}$ ou $\mathbb{R}_+$. Sont donc étudiés dans cette thèse les processus $X = X_{tt}$ indexés par un ensemble T très général muni d'une relation d'ordre représentant une forme d'écoulement temporel. Les situations concernées sont très variées et englobent certaines classes de variétés différentielles et d'arbres continus, sans négliger certains espaces ayant des saveurs plus algébriques.
La structure d'ordre permet d'identifier naturellement chaque processus $X = X_{tt}$ à un processus $X = X_{AA}$ indexé par une certaine collection d'ensembles, créant un pont avec la théorie des processus indexés par des ensembles développée par Ivanoff et Merzbach. Sous certaines conditions, ce dernier peut être étendu à une mesure stochastique, menant à la construction d'une application linéaire correspondant à l'intégrale par rapport à X. Si le cas où X a des accroissements indépendants est bien compris depuis les travaux de Rajput et Rosiński, celui des accroissements stationnaires ou échangeables était principalement resté cantonné à $\mathbb{R}_+$. On développe ici des notions de stationnarité adaptées à ce cadre général et en déduisons sous ces hypothèses des représentations pour le processus X et ses extensions.
Dans une dernière partie, ces représentations sont peaufinées pour obtenir des propriétés trajectorielles sur X : dans quel espace fonctionnel vit-il ? régularité hölderienne ?...

▸ *Thèse soutenue par* : **André HARNIST**
▸ *Sous la direction de* : Daniele Di Pietro (IMAG, Montpellier).

Méthodes Hybrid High-Order pour des problèmes complexes en mécanique des fluides

Soutenue le 11 octobre 2021
IMAG, Montpellier

Résumé :
Les travaux de cette thèse portent sur le développement et l'analyse de méthodes de discrétisation Hybrides d'Ordre Élevé (HHO : Hybrid High-Order, en anglais) pour des problèmes complexes en mécanique des fluides. Les méthodes HHO sont une nouvelle classe de méthodes de discrétisation des EDPs, capable de gérer des maillages polytopiques généraux. Nous nous intéressons aux problèmes faisant intervenir des fluides non-newtoniens, plus précisément dans un cadre non-hilbertien. L'objectif est de généraliser des théorèmes d'analyse fonctionnelle discrète au cas non-hilbertien afin d'établir des résultats de bonne position, de convergence par compacité, et des estimations d'erreur pour les méthodes HHO.
Trois problèmes principaux sont étudiés pour lesquels nous développons, analysons et illustrons numériquement une méthode HHO. Le premier porte sur les équations de Stokes généralisées aux fluides non-newtoniens, pouvant considérer des fluides caractérisés par des lois en puissance ou de Carreau–Yasuda. Dans l'analyse, nous introduisons la notion de fonction encadrée permettant de gérer la non-linéarité du problème. De plus, nous généralisons au cadre non-hilbertien une inégalité de Korn discrète afin d'obtenir la bonne position du problème, ainsi qu'une estimation d'erreur.
Le second problème concerne les problèmes de Leray–Lions, dont un exemple classique est celui du p-Laplacien. Dans le cas où $p < 2$, des dégénérescences locales peuvent apparaître lorsque le gradient de la solution s'annule ou explose. Dans ce travail, nous établissons de nouvelles estimations d'erreur offrant des ordres de convergence allant de $(k+1)(p-1)$ à $k+1$ selon la dégénérescence du problème, où k correspond au degré polynomial de la méthode.
Le troisième problème porte sur les équations de Navier–Stokes, généralisées aux fluides non-newtoniens incompressibles, dont leur convection peut suivre une loi en puissance. Nous introduisons deux exposants de Sobolev caractérisant le comportement de loi en puissance des lois de viscosité et

de convection du fluide. Dans ce travail, une analyse du problème continu permet de faire apparaître des relations entre ces exposants de Sobolev qui se répercutent au niveau discret. Nous établissons ainsi des résultats de convergence sous l'hypothèse de régularité minimale, ainsi qu'une estimation d'erreur pour les fluides pseudoplastiques. Enfin, nous appliquons la méthode sur le problème de la cavité entraînée, permettant d'illustrer les phénomènes engendrés par l'introduction des lois en puissances dans les termes de visqueux et convectif.

▸ *Thèse soutenue par* : **Ivailo HARTARSKY**
▸ *Sous la direction de* : Cristina Toninelli (université Paris Dauphine).

Percolation bootstrap et modèles cinétiquement contraints : universalité en deux dimensions et au-delà

Soutenue le 7 décembre 2021
Université Paris Dauphine

Résumé :
On étudie deux classes de modèles étroitement liées de physique statistique sur le réseau carré bidimensionnel – les modèles cinétiquement contraints et la percolation bootstrap. Les premiers sont apparus pour modéliser la dynamique des liquides surfondus près de leur transition vitreuse, tandis que la percolation bootstrap modélise de nombreux cadres tels que certains aimants ou encore des phénomènes sociaux. Nous considérons les modèles cinétiquement contraints et la percolation bootstrap d'un point de vue rigoureux probabiliste. On intéresse à leur comportement lorsque leur paramètre tend vers sa valeur critique (possiblement dégénérée). Plus concrètement, nous étudions le taux de divergence de certains temps caractéristiques tels que le temps d'infection d'un site fixé et le temps de relaxation. Parmi les résultats les plus conséquents de la thèse est la détermination des classes d'universalité de modèles cinétiquement contraints ainsi que leurs échelles de temps caractéristiques à l'équilibre en basse température. C'est-à-dire, on établit une partition de tous les modèles possibles en groupes à comportement similaire et fournit une recette pour déterminer ce comportement à partir de la définition du modèle. Des contributions sont apportées à tout le spectre de classes d'universalité de modèles cinétiquement contraints, mais

dans certains cas aussi à la percolation bootstrap plus simple et mieux comprise. En supplément des résultats universels, nous donnons des asymptotiques exactes à la fois en percolation bootstrap et en modèle cinétiquement contraint pour le modèle le plus classique à deux voisins. De plus, nous marquons des progrès sur le modèle cinétiquement contraint à un voisin appelé modèle de Fredrickson–Andersen 1-spin facilité. La thèse est constituée de trois parties principales, basées sur des techniques provenant de domaines différents. La première relève de la dynamique de systèmes de particules en interaction. La deuxième emploie des arguments de combinatoire. La troisième et dernière partie prend un point de vue de percolation.

▸ *Thèse soutenue par* : **Ibtissam ISSA**

▸ *Sous la direction de* : Michel Mehrenberger (université Aix-Marseille) et Ali Wehbe (université du Liban).

Some results on the stabilization of elastic / viscoelastic transmission problems with Kelvin-Voigt or fractional Kelvin-Voigt damping

Soutenue le 7 décembre 2021
Université Aix-Marseille

Résumé :
This thesis is devoted to study the stabilization of some locally coupled systems. First, we study the stability of a one-dimensional coupled wave equations with two interior non smooth viscous dampings where we establish exponential stability. Second, we study the stabilization of a locally coupled wave equations with only one internal viscoelastic damping of Kelvin-Voigt type. Both the damping and the coupling coefficients are non smooth. Using a spectrum approach, we prove the non-uniform stability of the system. Next, using a frequency domain approach, combined with a piecewise multiplier technique and the construction of a new multiplier satisfying some ordinary differential equations, we show that the energy of the smooth solution of the system decays polynomially. Third, we investigate the energy decay of hyperbolic systems of wave-wave, wave-Euler Bernoulli beam and beam-beam types. Indeed, the two equations are coupled through boundary connection with only one localized non smooth fractional Kelvin Voigt damping.

Finally, we study the stability of a multidimensional system of two wave equations coupled by velocities with only one localized non-smooth Kelvin-Voigt damping. By using a spectral analysis, we prove the non uniform stability of the system. Further, using a frequency domain approach combined with a multiplier technique, we establish some polynomial stability results by considering different geometric conditions on the coupling and the damping domains.

▸ *Thèse soutenue par* : **Nissa KASSIS**

▸ *Sous la direction de* : Maxime Hauray (université Aix-Marseille) et Julia Charrier (université Aix-Marseille).

Étude mathématique de la décohérence quantique sur un modèle simplifié de chambre à brouillard

Soutenue le 10 décembre 2021
Université Aix-Marseille

Résumé :
Dans cette thèse, on reprend l'analyse effectuée par le physicien N.F. Mott dans un article ancien (1929), qui donnait une première réponse à un paradoxe soulevé à l'époque par de nombreux physiciens : l'apparition de trajectoires rectilignes pour des particules alpha dans une chambre à brouillard, alors que les noyaux radioactifs émettent des ondes alpha sphériques. Cette analyse a été reprise récemment par plusieurs mathématiciens. A leur suite, nous introduisons un modèle quantique simplifié, unidimensionnel, de chambre à brouillard. Plus précisément, on s'intéresse à des systèmes formés par une source incidente à l'origine qui va interagir avec des détecteurs fixes, ayant un degré de liberté interne et placés symétriquement par rapport à l'origine, via des potentiels à portée nulle (Dirac) ou des potentiels à courte portée (par exemple des barrières de potentiel). Ces simplifications nous permettent d'étudier théoriquement et numériquement les effets de décohérence liés à l'émission d'une onde alpha.
La difficulté principale vient de la grande dimension du système qui croît exponentiellement avec le nombre de détecteurs. Plutôt que de résoudre l'équation de Schrödinger dépendante du temps associée, nous avons choisi une approche basée entièrement sur la diffusion quantique. Ceci permet de

traduire le problème en un système linéaire toujours de grande dimension mais avec de bonnes propriétés mathématiques. Ce système est résolu théoriquement et numériquement par une méthode itérative basée sur notre interprétation physique du système.
Notre premier résultat théorique donne des bornes quantitatives sur l'erreur commise en faisant l'approximation proposée par Mott (qui en 1D revient à négliger les réflexions). Cette estimation nous permet ensuite de justifier l'apparition des trajectoires rectilignes dans le cas d'une particule alpha très énergétique interagissant avec un grand nombre de détecteurs, ce qui est typiquement le cas d'une chambre à brouillard. Nos simulations numériques confirment ces résultats théoriques. Elles mettent en évidence l'apparition de trajectoires rectilignes dans le régime haute énergie évoqué ci-dessus. En revanche, hors de ce régime, on observe numériquement un comportement intrinsèquement quantique.

- *Thèse soutenue par* : **Yassine LAGUEL**
- *Sous la direction de* : Jérôme Malick (CNRS).

Risk averse optimisation :
Models, Algorithms and Applications in Machine Learning

Soutenue le 30 novembre 2021
Laboratoire Jean Kuntzmann et Université Grenoble Alpes

Résumé :
This thesis deals with optimization under uncertainty, which has a long history in operations research and mathematical optimization. This field is currently challenged by applications in artificial intelligence and data science, where risk management has become a crucial issue. In this thesis, we consider nonsmooth optimization problems involving risk measures and coming from statistical learning applications. We pay a special attention to the risk measure called the superquantile (also known as the "Conditional Value at Risk") and we show how, in various contexts, it may enforce robustness for decision-making under uncertainty.
First, we consider convex risk measures admitting a representation in terms of superquantiles. We derive first order oracles with optimal computational complexity. These approximate oracles involve different smoothing techniques for which we propose a unified analysis. We also propose an efficient

implementation of these oracles, coupled with a series of classical optimization methods, in an open-source software in Python. We show empirically, on classification and regression tasks, that the predictions obtained are robust to data shifts.
We then consider chance-constrained optimization problems. We propose a reformulation of these problems in the form of bilevel programs that involve the superquantile. We propose a (semi-) exact penalization for this reformulation, which we treat with a bundle method. We implement our bilevel approach in an open-source python software, which we illustrate on non-convex problems.
Finally, we investigate the use of the superquantile for federated learning. We consider the case of users with heterogeneous data distributions and we show how the superquantile allows for better performances on non-conforming users. We propose an algorithm adapted to the constraints of federated learning, in terms of communications and data privacy. We prove its theoretical convergence in the convex case by controlling the drift induced by local SGD and the dynamic reweighting induced by superquantiles. We also propose an in-depth numerical study of our algorithm and compare its performance with several established baselines.

▸ *Thèse soutenue par* : **Pierre LAVIGNE**

▸ *Sous la direction de* : Frédéric Bonnans (Inria Saclay et L2S, CentraleSupélec, université Paris-Saclay), Laurent Pfeiffer (Inria Saclay et L2S, CentraleSupélec, université Paris-Saclay).

Jeux à champ moyen : méthodes numériques et cas d'agents averses au risque

Soutenue le 3 décembre 2021
CMAP, École polytechnique

Résumé :
Les jeux à champ moyen (abrégés MFG) sont à la fois une théorie mathématique et un outil de modélisation. Développés indépendamment en 2006 par Jean-Michel Lasry et Pierre-Louis Lions, et Minyi Huang, Roland P. Malhamé, et Peter E. Caines, les MFG offrent un cadre particulièrement adapté pour analyser les interactions stratégiques entre un grand nombre

de joueurs rationnels et anonymes. Dans cette thèse, nous proposons plusieurs développements à cette théorie :
1) En utilisant le concept de mesure de risque composite, nous étudions un modèle MFG en temps discret impliquant des agents averses au risque. Nous montrons l'existence d'une solution via une approche de point fixe. Nous montrons qu'une politique optimale du MFG est $\varepsilon(N)$-optimale pour un certain jeu à N joueurs. La suite $\varepsilon(N)$ converge vers zéro lorsque le nombre de joueurs tend vers l'infini.
2) Nous étudions des MFG potentiels (aussi appelés variationnels) en espace de temps discret et en espace d'état fini avec des contraintes dures, c'est-à-dire avec des potentiels convexes, éventuellement non différentiables et à domaine borné. Nous étudions un problème primal et un problème dual, et nous montrons : un résultat de dualité, l'existence et l'unicité (dans le cas différentiable) d'une solution au système MFG. Ensuite, nous implémentons deux familles de méthodes numériques : des méthodes proximales primales-duales (Chambolle-Pock et Chambolle-Pock-Bregman) et des méthodes de Lagrangien augmenté (ADMM et ADM-G). Nous proposons un modèle de congestion et un modèle de prix que nous résolvons avec ces méthodes. Nous comparons les performances empiriques de chacune des méthodes pour chaque problème.
3) Nous appliquons l'algorithme du gradient conditionnel généralisé pour les MFG potentiels, dans un cadre EDP. Nous mettons en évidence le lien entre cet algorithme et une méthode d'apprentissage appelée fictitious play. On montre que pour le taux d'apprentissage $\delta_k = 2/(k+2)$, le coût potentiel converge en $O(1/k)$; l'exploitabilité et les variables du problème convergent en $O(1/\sqrt{k})$, pour des normes spécifiques.

▸ *Thèse soutenue par* : **Pierre MATALON**

▸ *Sous la direction de* : Daniele Di Pietro (IMAG, Montpellier), Ulrich Ruede (Friedrich Alexander Universität, Erlangen-Nürnberg).

Fast solvers for robust discretizations in computational fluid dynamics

Soutenue le 15 octobre 2021
IMAG, Montpellier

Résumé :

We consider a second-order, elliptic partial differential equation discretized by the Hybrid High-Order (HHO) method. HHO is a polyhedral method that handles arbitrary polynomial orders, and for which globally coupled unknowns are located at faces. To efficiently solve the linear system arising after static condensation, this work proposes novel, skeleton-based multigrid methods. One is geometric, the other is algebraic. The geometric algorithm is an h-multigrid method that conserves the polynomial degree at every level. It handles non-nested, unstructured, polyhedral meshes. Numerical tests on homogeneous and heterogeneous diffusion problems show fast convergence, scalability in the mesh size and polynomial order, and robustness with respect to heterogeneity of the diffusion coefficient. The algebraic multigrid method (AMG) applies to the lowest order hybrid methods. It leverages the uncondensed matrix to extract the connectivity graph between elements and faces, and subsequently implements an element-defined aggregation-based coarsening strategy. Used as a preconditioner, this AMG conserves the performance and scalability of standard plain aggregation AMGs that directly work on the condensed system, while exhibiting notable improvement on anisotropic problems with Cartesian meshes.

▸ *Thèse soutenue par* : **Cristian MENDICO**

▸ *Sous la direction de* : Pierre Cardaliaguet (université Paris Dauphine) et Cannarsa Piemarco (GSSI, Italie).

Comportement ergodique des problèmes de contrôle and des jeux à champs moyen

Soutenue le 5 novembre 2021
Université Paris Dauphine

Résumé :
Les travaux de cette thèse concernent l'analyse de systèmes de jeu à champ moyen (MFG) du premier ordre avec contrôle de l'accélération et l'étude du comportement en temps moyen long de systèmes de contrôle de type sous-riemannien. Plus précisément, dans la première partie nous commençons par étudier le caractère bien posé du système MFG associé à un problème de commande à équation linéaire en espace et en état de commande. En particulier, nous prouvons l'existence et l'unicité des solutions généralisées

et nous étudions également leur régularité. Ensuite, nous nous concentrons sur le système MFG avec contrôle de l'accélération, un cas particulier de celui décrit ci-dessus, et nous étudions le comportement en temps moyen long des solutions en montrant la convergence vers une constante ergodique. Ici, comme pour l'analyse précédente, le principal problème est le manque de convexité et de coercivité stricte du Hamiltonien par rapport à la variable de quantité de mouvement. Cela conduit par exemple à la non-existence de solutions de viscosité continue aux équations ergodiques de Hamilton-Jacobi et, par conséquent, ce permet pas de définir le système MFG ergodique au sens classique. Nous concluons cette première partie en établissant un lien entre le système MFG avec contrôle de l'accélération et le système MFG classique. Pour ce faire, nous étudions le problème de perturbation singulière pour le système d'accélération MFG, c'est-à-dire que nous analysons le comportement des solutions aux systèmes de jeu à champ moyen dont le coût d'accélération devient nul. Encore une fois, nous résolvons le problème en utilisant des techniques de calcul des variations en raison du problème résultant du manque de convexité et de coercivité strictes du Hamiltonien par rapport à la variable de quantité de mouvement. Dans la deuxième partie, nous nous concentrons sur les systèmes de contrôle affine sans dérive (de type sous-riemannien). A la différence du cas de l'accélération, nous montrons qu'il existe une constante critique et que l'équation ergodique de Hamilton-Jacobi associée à une telle constante qui possède des solutions de viscosité continues. Pour cela nous faisons appel à la géométrie sous-riemannienne sur l'espace d'état. Toujours en utilisant les propriétés de cette géométrie, nous définissons le semi-groupe de Lax-Oleinink et nous prouvons l'existence d'un point fixe de ce semi-groupe. Nous concluons cette partie, et donc cette thèse, en étendant la célèbre théorie d'Aubry-Mather au cas du système de contrôle sous-riemannien. Nous montrons d'abord une formule de représentation variationnelle de la constante critique et, à partir de celle-ci, nous définissons l'ensemble de Mather et l'ensemble d'Aubry. En utilisant une approche dynamique, nous étudions les propriétés analytiques et topologiques de tels ensembles comme, par exemple, la différentiabilité horizontale de la solution critique en tout point se trouvant dans l'un des deux ensembles. Enfin, nous appliquons ces résultats pour étudier le caractère bien posé du système MFG ergodique associé à de tels systèmes de contrôle.

▸ *Thèse soutenue par* : **Nahed NACEUR**

▸ *Sous la direction de* : Jean Rodolphe Roche (IECL, université de Lorraine) et Moez Khenissi (ESSTHS, université de Sousse).

Une méthode de décomposition de domaine pour la résolution numérique d'une équation non-linéaire

Soutenue le 3 décembre 2020
IECL, Universite de Lorraine

Résumé :
Cette thèse porte sur l'analyse théorique et la résolution numérique 2 d'un type d'équations semi-linéaires elliptiques et paraboliques. Ces équations sont souvent utilisées pour modéliser des phénomènes dans la dynamique de la population et les réactions chimiques. On a commencé cette thèse par l'étude théorique d'une équation elliptique semi-linéaire dont on a démontré l'existence d'une solution faible non négative sous des hypothèses plus générale que celles considérées dans des précédents travaux. Puis on a présenté une nouvelle méthode basée sur la méthode de Newton et la méthode de décomposition de domaine sans et avec recouvrement. Ensuite, on a rappelé quelques aspects théoriques concernant l'existence, l'unicité ainsi que la régularité de la solution d'une équation parabolique appelée équation de type Fujita. On a rappelé aussi des résultats sur l'existence de la solution globale et sur le temps maximal d'existence dans le cas d'explosion. Afin de calculer une approximation numérique de la solution de ce type d'équation, on a introduit une discrétisation en éléments finis dans la variable en espace et un schéma de Crank-Nicholson pour la discrétisation en temps. Pour résoudre le problème non linéaire discret on a implémenté une méthode de Newton couplée avec une méthode de décomposition de domaine. On a démontré que la méthode est bien posée. On a également traité un autre type d'équation parabolique dit équation de Chipot-Weissler. En premier, on a rappelé des résultats théoriques concernant cette équation. Puis, en se basant sur les méthodes numériques étudiées précédemment on a calculé une approximation numérique de la solution de cette équation. Dans la dernière section de chaque chapitre de cette thèse on a présenté des simulations numériques illustrant les performances des algorithmes étudiés et la cohérence des résultats avec la théorie.

▸ *Thèse soutenue par* : **Quentin PETIT**

▸ *Sous la direction de* : Guillaume Carlier (université Paris Dauphine) et Yves Achdou (université Paris 7).

Jeux à champ moyen et transport optimal dans la modélisation urbaine

Soutenue le 18 février 2022
Université Paris Dauphine

Résumé :
Le marché du travail est étroitement lié aux marchés de l'immobilier locatif pour les professionnels et pour les particuliers. L'objet de cette thèse est l'étude des interactions de ces marchés. Dans un premier temps, nous développons et étudions un modèle de jeux à champ moyen permettant de lier le marché du travail avec celui de l'immobilier locatif pour les professionnels. Dans un cadre spécifique où la production des firmes est supposée à rendement d'échelle constant, nous montrons que les équilibres admettent une forme explicite qui nous permet d'établir leur existence et leur unicité. Plusieurs lois économiques, dont celle de Pareto et celle de Gibrat, se vérifient. Puis, dans un cadre plus général où nous supposons que la production est à rendement d'échelle strictement décroissant, nous établissons plusieurs résultats d'existence, et retrouvons la règle d'or d'accumulation du capital. Enfin, nous présentons une méthode numérique pour approcher les équilibres. Nous détaillons plusieurs simulations et étudions l'influence de certains paramètres sur l'équilibre calculé en faisant de la statique comparative. Dans un deuxième temps, nous nous intéressons à un modèle liant le marché du travail avec celui de l'immobilier locatif pour les particuliers. Il admet une composante spatiale et permet de déterminer la distribution des résidences, les salaires et les loyers. Ces trois résultats du modèle vérifient trois conditions d'équilibres : celle du marché du travail, celle du marché de l'immobilier, et une condition de mobilité. La condition sur le marché du travail est liée à un problème de transport optimal, tandis que les deux autres sont liées à un jeu statique non-atomique. Les résultats d'existence et d'unicité d'équilibres que nous établissons exploitent le fait, qu'à l'équilibre, la distribution des résidences admet une forme explicite. Puis plusieurs extensions sont considérées comme l'adaptation du modèle au télétravail. Nous terminons par la présentation d'une méthode numérique développée dans le but d'approcher les équilibres et l'étude, en faisant de la statique comparative, de l'influence de certains paramètres du modèle sur l'équilibre calculé.

▸ *Thèse soutenue par* : **Ivan RASSKIN**

▸ *Sous la direction de* : Jorge Ramírez Alfonsín (IMAG, Montpellier).

A polytopal approach to Apollonian packings and discrete knotted structures

Soutenue le 10 décembre 2021
IMAG, Montpellier

Résumé :
Les empilements apolloniens ont attiré l'attention des mathématiciens en raison de leurs applications en théorie des nombres, théorie géométrique des groupes, géométrie hyperbolique, structures fractales et géométrie discrète. Dans cette thèse, nous étudions une classe d'empilements de sphères où la combinatoire est donnée par un polytope inscrit aux arêtes. À travers cette connexion, les empilements apolloniens peuvent être généralisés dans d'autres contextes géométriques et en dimensions supérieures. La structure polytopale permet également d'obtenir une généralisation du théorème de Descartes pour les empilements de sphères provenant des polytopes réguliers dans toutes les dimensions. Nous utilisons ce résultat pour caractériser l'intégralité des empilements apolloniens provenant des solides platoniciens. Puis, nous introduisons la notion de section apollonienne, et nous l'utilisons pour montrer que l'ensemble des courbures de tout empilement apollonien intégral tétraédrique, octaédrique ou cubique est contenu dans l'ensemble des courbures d'un empilement apollonien orthoplicial intégral. L'approche polytopale nous permet également d'étendre les applications des empilements apolloniens dans une nouvelle direction dans le domaine de la topologie. Dans cette thèse, nous introduisons deux méthodes de construction de représentations en colliers de noeuds et d'entrelacs. La première méthode découle directement du théorème d'empilements de cercles de Koebe-Andreev-Thurston, et donne une borne supérieure linéaire sur le nombre minimal de sphères nécessaires pour construire une représentation en collier en termes du nombre minimal de croisements. Dans la seconde méthode, nous utilisons la structure fractale des empilements apolloniens orthopliciaux pour construire des représentations en collier des entrelacs rationnels avec des propriétés arithmétiques intéressantes.

▸ *Thèse soutenue par* : **Raphael ROMERO**

▸ *Sous la direction de* : Jean-Michel Marin (IMAG, Montpellier), Sophie Lèbre (IMAG, Montpellier), Charles-Henri Lecellier (IGMM) et Laurent Bréhélin (LIRMM, Montpellier).

Identification de déterminants génomiques impliqués dans la spécificité de fixation des facteurs de transcription

Soutenue le 14 décembre 2021
IMAG, Montpellier

Résumé :
Dans cette thèse, nous nous intéressons aux déterminants génomiques qui peuvent expliquer les différences de fixation d'un facteur de transcription (TF) particulier entre deux types cellulaires. Les facteurs de transcriptions reconnaissent des sous-séquences particulières sur lesquelles ils se fixent, l'ensemble de ces sous-séquences est modélisé dans des motifs de fixation. Cependant, le motif de fixation d'un TF ne permet pas d'expliquer entièrement sa fixation. En effet, il n'est pas forcément fixé dès qu'il reconnait son motif de fixation et ne se fixe pas aux mêmes loci en fonction des types cellulaires. Le but de ce travail est donc d'étudier d'autres informations, afin de mieux comprendre la fixation des TF dans différents types cellulaires. Ce problème est étudié dans un cadre de classification supervisée, où les exemples sont des séquences génomiques et les deux classes correspondent aux types cellulaires dans lesquels la séquence est liée par le TF d'intérêt. Les séquences sont décrites par trois types d'informations génomiques qui sont extraites des séquences brutes par trois méthodes dédiées : la spécificité nucléotidique du site de fixation, le contenu nucléotidique autour du site de fixation, et la présence et la position de sites de fixation potentiels d'autres facteurs de transcription coopérants. Toutes ces caractéristiques sont utilisées dans un modèle de régression logistique entraîné avec une vraisemblance pénalisée sur différents problèmes de classification associant un TF dans deux tissus différents. Dans chaque expérience, le modèle est utilisé pour identifier les éléments régulateurs qui sont les plus importants pour les différences entre types cellulaires. Nos expériences montrent qu'il est possible de distinguer les sites de fixation spécifiques aux cellules sur la base de la séquence uniquement. De plus, une analyse globale des résultats montre que l'importance relative des trois types d'information dépend fortement du TF et des types cellulaires.

▸ *Thèse soutenue par :* **Giorgi RUKHAIA**

▸ *Sous la direction de :* Jean-David Benamou (INRIA, université Paris Dauphine).

Application du transport optimal entropique à l'optique anidolique

Soutenue le 23 novembre 2021
Université Paris Dauphine

Résumé :
Dans ce travail, nous abordons un problème inverse en optique anidolique consistant à déterminer une surface capable de réflechir une distribution de lumière source à une distribution cible en champ lointain, toutes deux prescrites. La source lumineuse peut être ponctuelle ou étendue. Lorsque la source est une source ponctuelle , la distribution est supportée uniquement sur les directions des rayons optiques. Dans ce contexte, le problème inverse est bien posé pour des distributions de probabilité source et cible arbitraires. Il peut être reformulé comme un problème de transport optimal et constitue un exemple célèbre de transport optimal sous un coût de déplacement non euclidien. Nous explorons l'utilisation du transport optimal entropique et de l'algorithme Sinkhorn associé pour le résoudre numériquement. La modélisation du réflecteur étant basée sur les potentiels de Kantorovich, plusieurs questions se posent. Premièrement, sur la convergence de l'approximation entropique discrète et nous suivons ici les travaux récents de Berman et en particulier les exigences de discrétisation qui y sont imposées. Deuxièmement, nous montrons que la correction du biais induit par le transport entropique Optimal peut être atteinte en utilisant la notion récente de divergences Sinkhorn. Pour le problème de source ponctuelle, nous discutons des outils mathématiques et numériques nécessaires pour produire et analyser les résultats numériques obtenus. Nous trouvons que l'algorithme Sinkhorn peut être adapté à la résolution du problème de la source ponctuelle au réflecteur en champ lointain. Nous ne connaissons pas de formulation mathématique similaire dans le cas de la source étendue : la distribution de lumière source a support sur l'espace produit : domaine physique-directions des rayons. Nous proposons de tirer parti de la formulation variationnelle bien posée du problème de source ponctuelle pour construire une paramétrisation lisse du réflecteur et de l'application modélisant la réflexion. Sous cette paramétrisation, nous pouvons construire une fonction de coût lisse à optimiser pour trouver la meilleure solution dans cette classe de réflecteurs. Les deux étapes, la paramétrisation et la fonction de coût, sont liées à

des distances de transport entropiques optimales. Nous profitons également des progrès récents des techniques d'optimisation et des implémentations efficaces de l'algorithme Sinkhorn pour réaliser une étude numérique.

▸ *Thèse soutenue par* : **Ousmane SACKO**

▸ *Sous la direction de* : Fabienne Comte (université de Paris), Céline Duval (université de Lille).

Estimation par projection pour des problèmes inverses sur des espaces de Laguerre et d'Hermite

Soutenue le 15 novembre 2021
MAP5, Université de Paris

Résumé :
Dans cette thèse, nous développons des procédures d'estimation non paramétrique pour divers problèmes inverses sur des espaces de Laguerre et d'Hermite. La première partie est consacrée à l'estimation des dérivées d'une fonction de densité en base de Laguerre et d'Hermite. La deuxième partie est dédiée à l'estimation d'une densité et d'une fonction de régression dans un modèle de convolution en base d'Hermite. Différentes méthodes d'estimation sont présentées : méthode de projection fondée sur un développement de la fonction d'intérêt (densité, dérivée d'une densité, fonction de régression) en base de Laguerre ou d'Hermite; mixte *déconvolution-projection* basée sur un développement en base d'Hermite et une transformation de Fourier inverse. Pour chacune de ces méthodes, nous établissons des bornes pour le risque quadratique.
Pour des choix adéquats des paramètres (dimension de l'espace de projection ou cut-off), nous obtenons des vitesses de convergence de nos estimateurs. Ces paramètres dépendent cependant de quantités inconnues. Ainsi, nous proposons des procédures adaptatives pour les choisir de façon pertinente en s'inspirant des critères de sélection de modèles par pénalisation du type Birgé & Massart (1997) ou des méthodes de Goldenshluger & Lepski (2011) et nous démontrons des inégalités oracles non asymptotiques en utilisant des inégalités de concentration. Des études numériques et des comparaisons avec d'autres stratégies sont exposées pour illustrer les bonnes performances des méthodes proposées.

▸ *Thèse soutenue par* : **Zaineb SMIDA**

▸ *Sous la direction de* : Ali Gannoun (IMAG, Montpellier) et Lionel Cucala (IMAG, Montpellier).

Tests de comparaison de deux populations et statistiques de balayage spatial pour données fonctionnelles

Soutenue le 30 novembre 2021
IMAG, Montpellier

Résumé :
Dans cette thèse, nous nous focalisons d'un côté sur les tests statistiques de comparaison de deux échantillons basés sur les rangs et d'un autre côté sur la méthode de détection d'agrégats basée sur les statistiques de balayage spatial. Dans les deux cas, le travail a été effectué en utilisant des données fonctionnelles. L'objectif est d'étendre les méthodes développées dans le cadre univarié c'est-à-dire à destination des variables aléatoires à valeurs dans $\mathbb{R}$ au cadre fonctionnel c'est-à-dire en utilisant des variables aléatoires à valeurs dans un espace fonctionnel. Dans la première partie, nous étudions le test de la médiane basé sur les rangs dans le cadre univarié. Nous proposons ensuite une extension de ce dernier pour des données fonctionnelles. Puis, nous étudions le comportement asymptotique de sa statistique sous l'hypothèse nulle. Cette extension est comparée à d'autres statistiques paramétriques et non paramétriques existantes en utilisant des données simulées et des données réelles pour étudier sa puissance. Dans la deuxième partie, nous introduisons une statistique de balayage spatial non paramétrique pour des données fonctionnelles. Cette statistique est dérivée de celle de Wilcoxon-Mann-Whitney définie dans un espace de Hilbert. La méthode de balayage proposée est appliquée sur des données simulées pour évaluer sa performance, ensuite sur des données réelles pour extraire des caractéristiques de l'évolution démographique de la population espagnole. Dans la dernière partie, nous développons un package R intitulé HDSpatialScan. Il permet d'appliquer les statistiques de balayage spatial récemment développées pour des données fonctionnelles, y compris la statistique de balayage introduite dans cette thèse. Ce package facilite l'utilisation des méthodes de balayage et permet de visualiser les agrégats détectés d'une manière simple et rapide.

▸ *Thèse soutenue par* : **Gabriele TODESCHI**

▸ *Sous la direction de* : Jean-David Benamou (INRIA, université Paris Dauphine).

**Perturbation aléatoire de certains systèmes de particules en interaction,
liés à la mécanique quantique**

Soutenue le 13 décembre 2021
Université Paris Dauphine

Résumé :
Cette thèse a pour objet la construction de schémas numériques localement conservatif et préservant la structure pour des flots de gradient Wasserstein, c'est à dire des courbes de descente maximale dans l'espace de Wasserstein. Les discrétisations en temps reposent sur des formulations variationnelles imitant au niveau discret ce comportement de courbes de descente maximale. Ces discrétisation font intervenir le calcul de la distance de Wasserstein, un exemple de problèmes de transport optimal. Les discrétisations en espaces sont basées sur des approximations volumes finis avec reconstructions à deux points des flux, également appelés schémas TPFA. Ces méthodes sont bien connues et particulièrement adaptées pour discrétiser des équations conservatives. Afin de conserver les structures variationnelles au niveau discret, notre approche est de d'abord discrétiser puis optimiser. Dans une première partie nous présentons des discrétisations TPFA pour la distance de Wasserstein, basées sur la formulation dynamique de Benamou-Brenier du transport optimal. Nous montrons des problèmes de stabilité liés à ces discrétisations et proposons une méthode permettant de les surmonter. Nous dérivons des estimations quantitatives de convergence pour ce model discret. Afin de résoudre le problème d'optimisation discret, nous introduisons une stratégie de point intérieur. Ensuite nous proposons des schémas d'ordre un puis deux pour des flots de gradients Wasserstein. Afin de réduire la complexité numérique des problèmes étudiés nous utilisons une linéarisation implicite de la distance de Wasserstein. En exploitant la monotonie de la reconstruction upwind, nous proposons un schéma d'ordre un que l'on peut résoudre efficacement avec une méthode de Newton et nous montrons sa convergence vers des solutions faibles de l'équation de Fokker-Planck. Pour augmenter l'ordre de convergence en espace, nous utilisons une reconstruction centrée qui nécessite une technique d'optimisation différente. Nous utilisons à nouveau la stratégie du point intérieur

pour cela. Finalement, pour monter en ordre en temps, nous proposons une version modifiée de la discrétisation variationnelle BDF2 pour laquelle nous prouvons la convergence vers des flots de gradient Wasserstein. À l'aide de ces nouvelles discrétisations, nous construisons un schéma d'ordre deux en espace et en temps. Tous les schémas proposés sont accompagnés de nombreux résultats numériques.

- *Thèse soutenue par* : **Credo VOVOR-DASSU**
- *Sous la direction de* : Gilles Ducharme (IMAG, Montpellier).

Tests d'adéquation à la loi de Newcomb-Benford comme outil de détection de fraudes

Soutenue le 6 décembre 2021
IMAG, Montpellier

Résumé :
Je vous propose le pari suivant : Ouvrons le journal, choisissons une page au hasard et notons le premier nombre que nous rencontrons; si le premier chiffre significatif de ce nombre est supérieur à 3, je vous donnerai 100 euros, sinon c'est vous qui me donnerez 100 euros. La proposition vous est, semble-t-il, nettement favorable : il n'y a en effet que trois chiffres qui me font gagner (1,2,3), alors qu'il y en a six pour vous (4,5,6,7,8,9); le 0 ne compte pas, car il ne peut pas être un premier chiffre significatif. Vous pensez donc gagner environ deux fois sur trois. Serais-je idiot de vous proposer un tel pari ? Eh bien non : si vous acceptez, je gagnerai dans plus de 60 pour cent des cas. Aussi étonnant que cela paraisse, le premier chiffre significatif d'un nombre rencontré dans un article de journal n'a pas autant de chances d'être un 1, un 2, un 3, ..., ou un 9 (la probabilité serait alors 1/9, ou 11,11 pour cent). La loi de Newcomb-Benford indique que, dans un contexte général comme celui d'un article de journal, les probabilités p de rencontrer les différents chiffres comme premier chiffre significatif sont, exprimées en pourcentage : p(1)=30,1; p(2)=17,6;p(3)=12,5; p(4)=9,7;p(5)=7,9;p(6)=6,7;p(7)=5,8; p(8)=5,1;p(9)=4,6. Puisque 30,1+17,6+2,5=60,2, je gagnerai mon pari dans 60,2 pour cent des cas. Comment tester la qualité de l'ajustement des données à cette loi si contraire à l'intuition ? Wong (2010) apporta des réponses à cette question en utilisant le premier et deuxième chiffre significatif basée

sur les travaux de Lesperance et al. (2016) sur le premier chiffre significatif. Mais Cerioli et al. (2018) fournissent une motivation pour de nouveaux tests de conformité à la loi de Newcomb-Benford. Le but de ce travail est donc de proposer de nouveaux tests d'adéquation basés sur les tests lisses de Neyman (1937). Nous étudions la puissance de nos tests sous différentes alternatives et nous arrivons à la conclusion que notre test est globalement préférable aux tests existants. Nous mettons à disposition un package R pour pouvoir exploiter nos résultats.

▸ *Thèse soutenue par* : **Mengchen WANG**

▸ *Sous la direction de* : Frédéric Magoulès (MICS, CentraleSupélec, université Paris-Saclay), Patrick Bourdot (LISN, CNRS, université Paris-Saclay), Nicolas Férey (LISN, CNRS, université Paris-Saclay).

Modèle distribué et asynchrone pour la simulation interactive en mécanique des fluides : vers une plateforme de jeu sérieux pour l'aide à la prise de décision

Soutenue le 20 décembre 2021
CentraleSupélec, Université Paris-Saclay

Résumé :
C'est en grande partie grâce au jeu sérieux Fold'It, que les approches par simulation interactive et par jeu sérieux ont pu convaincre de leur pertinence dans le domaine de la biologie moléculaire. Ce jeu sérieux a été conçu pour adresser de manière ludique et collaborative la problématique du repliement de protéine. Au-delà de l'énorme potentiel pédagogique, un groupe de joueurs de Fold'It a réussi le challenge de trouver la structure d'une protéine du virus du VIH, démontrant l'utilité et l'efficacité d'une telle méthodologie centrée utilisateur.
Inspiré par cette avancée méthodologique en biologie moléculaire en matière de simulation interactive, et convaincu de son potentiel pour de nombreuses applications en mécanique des fluides, ce travail de thèse fut consacré à étudier dans quelles mesures et dans quelles conditions une approche par simulation interactive par jeu sérieux pouvait être appliquée au domaine de la mécanique des fluides. La progression des méthodes numériques en mécanique des fluides alliée à la puissance de calcul toujours plus importante permettent en effet d'envisager un transfert méthodologique par la

construction d'une plateforme de la simulation des fluides interactives incluant des fonctionnalités de conception de modèles avec conditions initiales, de visualisation et de contrôle interactif du fluide et de son environnement pendant une simulation en cours.
Ce travail de thèse a donc eu pour objectif de concevoir et d'évaluer une approche par simulation interactive et par jeux sérieux consacrés à la mécanique des fluides. La première étape de ce travail fut donc d'implémenter une plateforme dédiée, conjointement à une étude bibliographique continue sur l'usage des simulations interactives et des jeux sérieux en général et en mécanique des fluides. Au-delà de l'aspect technologique et du challenge sous-jacent, différentes pistes ont été explorées pour aboutir à une architecture matérielle et logicielle très contraintes.
Il s'agit en effet d'offrir les performances requises par l'interactivité, de s'assurer de la conservation de la pertinence physique d'un phénomène simulé lors de son édition interactive, de respecter les usages pour que cette approche puisse susciter l'adhésion de la communauté. Ce travail a abouti à la proposition d'une architecture modulaire basée sur l'outil de conception de jeu vidéo Unity 3D, offrant une grande flexibilité pour la conception de fonctionnalités de visualisation et d'interaction, associé à une infrastructure permettant de coupler cet outil avec n'importe quel code de simulation de fluide opensource. Cette approche a été appliquée à une méthode de calcul de type Lattice-Boltzmann, fortement parallélisable et peu sensible aux perturbations interactives durant une simulation en cours avec l'adaptation de Palabos. Enfin, l'usage de nouvelles méthodologies par calcul asynchrone a été exploré, étant susceptibles de compléter le besoin de performances déjà fournies par les approches fortement parallèles.
Sur cette base ont été menées trois expérimentations pour mesurer l'intérêt de méthodologie interactives et par jeux sérieux. La première expérimentation fut de comparer la performance entre la simulation conventionnelle et la simulation interactive. Une seconde expérimentation a été menée afin de mesurer la plus-value de l'immersion en termes d'expérience utilisateur et de performance. Enfin, la troisième expérimentation a cherché à mesurer l'impact du niveau de dégradation des résultats induit par les calculs asynchrones, sur la prise de décision, pour anticiper l'usage de ce type de méthodologies pour adresser les problématiques de performance relative au contexte interactif.

▸ *Thèse soutenue par* : **Agustin YABO**

▸ *Sous la direction de* : Jean-Baptiste Caillau (université Côte d'Azur), Jean-Luc Gouzé (INRIA Sophia Antipolis).

Allocation optimale de ressources en croissance bactérienne : étude théorique et application à la production de métabolite

Soutenue le 9 décembre 2021
INRIA Sophia Antipolis, Université Côte d'Azur

Résumé :
Les micro-organismes évoluent sous la pression de la sélection naturelle, améliorant leur capacité à proliférer dans leur environnement en développant des réseaux métaboliques optimisés. Des études ont montré que les populations bactériennes peuvent atteindre un taux de croissance presque maximal dans certaines conditions, ce qui leur permet de supplanter les espèces concurrentes. Considérer l'auto-réplication microbienne comme un problème d'allocation de ressources est une nouvelle approche qui a répondu avec succès à certaines des questions sous-jacentes dans le domaine. Dans cette approche, les ressources cellulaires disponibles sont affectées dynamiquement à différentes fonctions comme le métabolisme ou la synthèse des protéines. Ce cadre a également motivé de nombreuses applications à la production artificielle de métabolites d'intérêt ; l'objectif principal est alors de détourner les ressources cellulaires des voies natives vers une voie hétérologue dans le but de synthétiser efficacement un composé spécifique (par exemple des agents antitumoraux, des antibiotiques, de l'insuline, des agents immunosuppresseurs, etc.) À cette fin, des techniques biotechnologiques récentes permettent de contrôler de manière externe la croissance bactérienne en interrompant l'expression de l'ARN polymérase. Cette thèse se concentre sur les aspects mathématiques d'une certaine classe de modèles d'auto-réplicateurs basés sur les principes d'allocation des ressources susmentionnées. Ces modèles, basés sur des hypothèses minimales, sont étonnamment efficaces pour rendre compte des lois de croissance empiriques bien étudiées des cultures microbiennes. Tout au long du manuscrit, nous revisitons certains des cadres industriels les plus pertinents pour la croissance bactérienne parmi lesquels la culture par lots et les bioréacteurs continus, ainsi que d'autres modèles simplifiés où la concentration en nutriments reste constante. L'idée est de comparer les stratégies d'allocation des ressources évoluant naturellement, où l'objectif est de maximiser la biomasse de la population bactérienne, avec les stratégies artificielles visant à

maximiser la production d'un métabolite voulu. L'étude implique une analyse dynamique et une optimisation des modèles proposés, et nous avons recours à la théorie du contrôle optimal pour déterminer les stratégies d'allocation conformes à ces objectifs, tant d'un point de vue analytique que numérique. Ces stratégies optimales constituent des références de choix pour le développement de stratégies de rétroaction basées sur la mesure en temps réel des processus industriels.
Mots-clés : biologie des systèmes, croissance bactérienne, contrôle optimal, biotechnologie, systèmes dynamiques non linéaires.

Annonces de colloques

par :

Thomas Haberkorn[1] *– Université d'Orléans,*
Responsable de la rubrique « Annonces de colloques »

Mars 2022

▸ MASCOT-NUM Workshop on "Optimal Sampling for Approximation"
le 10 Mars 2022, à l'IHP, Paris
https://www.gdr-mascotnum.fr/mar22.html

▸ Colloque sur "Quantization, location, sampling and matching" au Centre Lagrange
du 14 au 15 Mars 2022, à Paris
https://sites.google.com/view/ot-lagrange/quantization-2022

▸ Branching and persistence
du 14 au 16 Mars 2022, à Angers
https://site-branpers2022.apps.math.cnrs.fr/

Avril 2022

▸ Conference on "Diffusive Systems" - Pattern Formation, Bifurcations, and Biological Applications (Hausdorff School)
du 4 au 8 Avril 2022, à Bonn (Allemagne)

1. thomas.haberkorn@univ-orleans.fr

https://www.hcm.uni-bonn.de/events/eventpages/hausdorff-school/hausdorff-schools-2022/diffusivesystems2022/

Mai 2022

▸ Research School "High-Dimensional Approximation and Deep Learning"
du 16 au 20 Mai 2022, à Nantes
https://www.lebesgue.fr/en/HiDADeeL

▸ emrsim2022 : Simulation et Optimisation pour les Énergies Marines Renouvelables
du 29 Mai au 30 Juin 2022, à Roscoff
https://emrsim2022.sciencesconf.org

Juin 2022

▸ Conference Scale Invariance and Randomness
du 7 au 10 Juin 2022, à Lille
https://indico.math.cnrs.fr/event/7228/

▸ Shape Optimization, related Topics and Applications (SHAPO 2022)
du 13 au 17 Juin 2022, à Roscoff
https://indico.math.cnrs.fr/event/7371/

▸ Conference "From Individual to Collective Behaviour in Biological and Robotic Systems," ICMS
du 27 Juin au 1er Juillet 2022, à Edinburgh (UK)
https://sites.google.com/view/collectivebehaviourworkshop

▸ International Conference for Mesoscopic Methods in Engineering and Science (ICMMES-22)
du 27 Juin au 1er Juillet 2022, à La Rochelle
http://www.icmmes.org

▸ THE 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIFFERENTIAL AND FUNCTIONAL DIFFERENTIAL EQUATIONS
du 28 Juin au 5 Juillet 2022, à Moscou (Russie)
https://dfde2022.mi-ras.ru/

▸ CONFÉRENCE « INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET SANTÉ : APPROCHES INTERDISCIPLINAIRES »
du 29 Juin au 1er Juillet 2022, à Nantes
https://www.lebesgue.fr/fr/conf_IA_sante2022

JUILLET 2022

▸ INTERNATIONAL CONFERENCE ON BAYESIAN AND MAXIMUM ENTROPY METHODS IN SCIENCE AND ENGINEERING MAXENT'22
du 18 au 22 Juillet 2022, à l'IHP Paris
https://maxent22.see.asso.fr/

▸ INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIFFERENCE EQUATIONS AND APPLICATIONS (ICDEA 2022, SATELLITE CONFERENCE OF ICM)
du 18 au 22 Juillet 2022, à Gif-sur-Yvette (Paris-Saclay)
https://icdea2022.sciencesconf.org/

▸ INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATHEMATICAL AND NUMERICAL ASPECTS OF WAVE PROPAGATION (WAVES 2022)
du 25 au 29 Juillet 2022, à l'ENSTA, Palaiseau
https://waves2022.apps.math.cnrs.fr

▸ CONFERENCE ON SINGULARITIES, BLOW-UP, AND NON-CLASSICAL PROBLEMS IN NONLINEAR PDES (CONFÉRENCE SATELLITE DE L'ICM)
du 25 au 30 Juillet 2022, à Moscou (Russie)
http://sing2019moscow.rudn.ru/rudn/www/home_eng.php

EMRSim 2022 - Simulation & Optimization For Renwable Marine Energies

par :
Julien Salomon[2] — Inria Paris
Mireille Bossy[3] — Inria Sophia-antipolis
Martin Parisot[4] — Inria Bordeaux
Antoine Rousseau[5] — Inria & IMAG, Université de Montpellier

The international conference EMRSim 2022 will take from 29 mai to 3 June 2022 in Roscoff (France).

Aims and scope

The aim of EMRsim is to promote exchanges between researchers in scientific computing and mechanics and industrialists specializing in marine renewable energy. The covered topics will be related to the simulation and numerical optimization of marine energy extraction devices such as tidal turbines, offshore wind turbines or wave-engine systems. This event follows a first edition in January 2018 in Paris, and a second edition in June 2019 in Roscoff.

The list of pleany speakers is available at the EMRsim2022 website https://emrsim2022.sciencesconf.org

Call for Contributions

Proposition of talks are welcome by sending an abstract (800 characters max) to emrSim22 Organisation Committee emrsim22_organisationcommittee@inria.fr before April 15 2022.

2. julien.salomon@inria.fr
3. mireille.bossy@inria.fr
4. martin.parisot@inria.fr
5. antoine.rousseau@inria.fr

Registration and Accomodation

Registration will be open soon. The registration fee will be around 400 euros, including accommodation, breakfasts, lunches, coffee breaks, and dinners. Financial support will be proposed for junior researchers.

Intelligence Artificielle et Santé : Approches Interdisciplinaires

par :
Anaïs Crestetto — Université de Nantes

La conférence « *Intelligence Artificielle et Santé : Approches Interdisciplinaires* » (https://www.lebesgue.fr/fr/conf_IA_sante2022) se tiendra à Nantes du 29 juin au 1er juillet 2022 sur le site de la MSH Ange Guépin [2].

Résumé

Cette rencontre scientifique se déroule dans le cadre du semestre thématique 2022 « Machine Learning / Intelligence Artificielle » organisé par le Centre de mathématiques Henri Lebesgue [4]. Elle a lieu en partenariat avec le programme Data Santé [5] et le GdR « Statistiques et Santé » [6] et est parrainée par la SFdS [7]. Elle offrira une occasion unique d'échanger des connaissances, de partager des idées et des bonnes pratiques autour du thème "IA et Santé", en privilégiant les approches interdisciplinaires. Elle réunira des chercheurs et praticiens, issus des instituts publics ou du secteur privé, qui contribuent ou mettent en œuvre des approches d'IA dans le domaine de la santé.

Liste des conférenciers invités

- Stéphanie Allassonnière [8] (Université Paris Descartes & Ecole Polytechnique)
- Basile Chaix [9] (iPLesp Sorbonne Université)
- Hannah Frick [10] (Tidymodels [11] team, Rstudio)
- Raphaëlle Momal [12] (entreprise Owkin [13])
- Grégory Nuel [14] (LPSM-CNRS 8001, Sorbonne Université)
- Rodophe Thiebaut [15] (INRIA - INSERM – CHU de Bordeaux - Université de Bordeaux - ISPED)

Thèmes

Vous pouvez dès à présent soumettre vos PROPOSITIONS DE COMMUNICATION ORALE. Les conseils aux auteurs et les modalités de soumission sont disponibles en suivant ce lien [16].

Le comité scientifique a décidé d'apporter une attention particulière aux THÈMES suivants :

- Apprentissage statistique
- e-Santé
- Science des données et santé
- Épidémiologie digitale
- Big data et santé publique
- Statistique et médecine personnalisée
- Économie de la santé
- Santé et SHS
- Modélisation des maladies infectieuses
- Recherche clinique en grande dimension- Intégration de données omiques
- Recherche clinique en grande dimension- Intégration de données d'imagerie
- Drug target

Au plaisir de vous accueillir nombreux à Nantes !

Le comité organisateur et le comité scientifique

Dates importantes

- 20 janvier 2022 : appel à communications
- 31 mars 2022 : date limite de soumission des communications
- 15 mai 2022 : réponse aux auteurs
- 29 juin 2022 : début de la conférence

Liens

[1] http://www.math.sciences.univ-nantes.fr/~bellanger/

[2] https://msh-ange-guepin.univ-nantes.fr/

[3] https://www.lebesgue.fr/fr/conf_IA_sante2022

[4] https://www.lebesgue.fr/fr/

[5] https://www.data-sante.fr/

[6] http://gdr-stat-sante.math.cnrs.fr/spip/spip.php?rubrique1

[7] https://www.sfds.asso.fr/

[8] https://sites.google.com/site/stephanieallassonniere/

[9] https://www.iplesp.upmc.fr/fr/team/NEMESIS

[10] https://www.frick.ws/

[11] https://www.tidymodels.org/

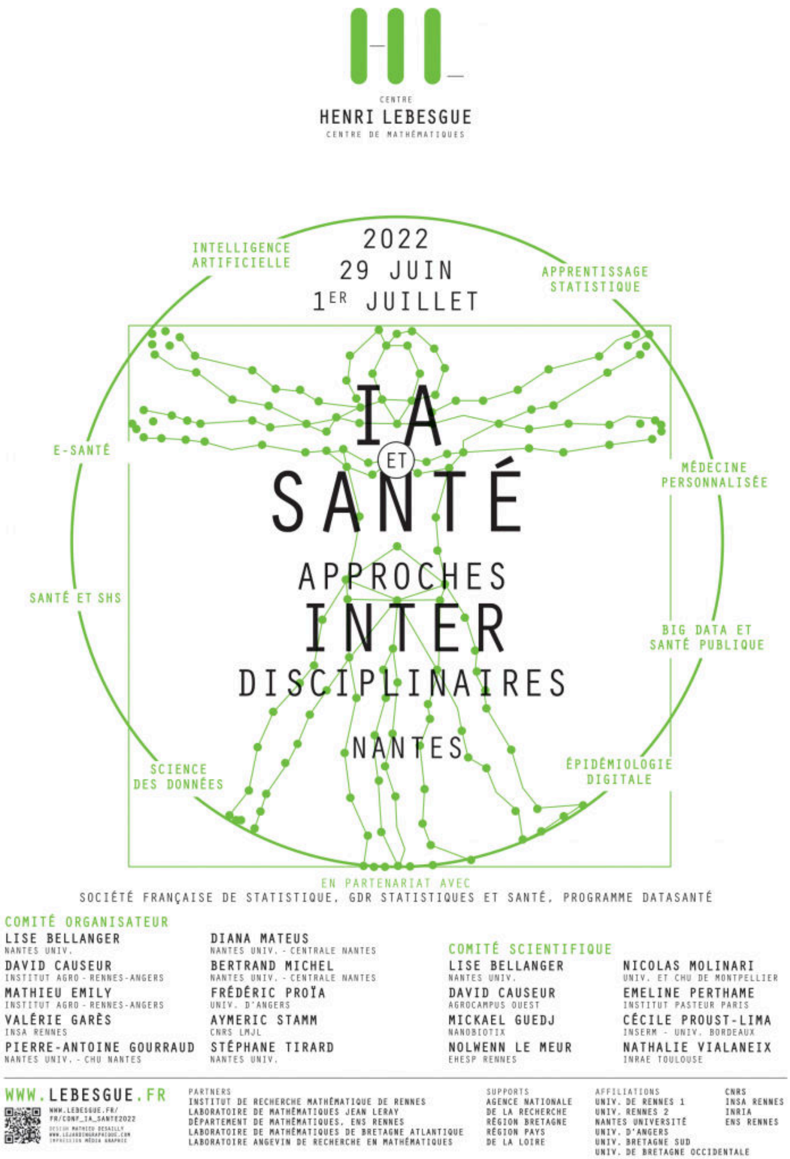
[12] https://rmomal.github.io/

[13] https://owkin.com/

[14] http://nuel.perso.math.cnrs.fr/

[15] https://www.bordeaux-population-health.center/profile/rodolphe-thiebaut/

[16] https://www.lebesgue.fr/fr/conf_IA_sante2022/soumission-de-resume


CENTRE
HENRI LEBESGUE
CENTRE DE MATHÉMATIQUES
2022
29 JUIN
1ER JUILLET
INTELLIGENCE ARTIFICIELLE
APPRENTISSAGE STATISTIQUE
E-SANTÉ
MÉDECINE PERSONNALISÉE
SANTÉ ET SHS
BIG DATA ET SANTÉ PUBLIQUE
SCIENCE DES DONNÉES
ÉPIDÉMIOLOGIE DIGITALE
IA ET SANTÉ
APPROCHES INTER DISCIPLINAIRES
NANTES
EN PARTENARIAT AVEC
SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE STATISTIQUE, GDR STATISTIQUES ET SANTÉ, PROGRAMME DATASANTÉ
COMITÉ ORGANISATEUR
LISE BELLANGER
NANTES UNIV.
DAVID CAUSEUR
INSTITUT AGRO - RENNES-ANGERS
MATHIEU EMILY
INSTITUT AGRO - RENNES-ANGERS
VALÉRIE GARÈS
INSA RENNES
PIERRE-ANTOINE GOURRAUD
NANTES UNIV. - CHU NANTES
DIANA MATEUS
NANTES UNIV. - CENTRALE NANTES
BERTRAND MICHEL
NANTES UNIV. - CENTRALE NANTES
FRÉDÉRIC PROÏA
UNIV. D'ANGERS
AYMERIC STAMM
CNRS LMJL
STÉPHANE TIRARD
NANTES UNIV.
COMITÉ SCIENTIFIQUE
LISE BELLANGER
NANTES UNIV.
DAVID CAUSEUR
AGROCAMPUS OUEST
MICKAEL GUEDJ
NANOBIOTIX
NOLWENN LE MEUR
EHESP RENNES
NICOLAS MOLINARI
UNIV. ET CHU DE MONTPELLIER
EMELINE PERTHAME
INSTITUT PASTEUR PARIS
CÉCILE PROUST-LIMA
INSERM - UNIV. BORDEAUX
NATHALIE VIALANEIX
INRAE TOULOUSE
WWW.LEBESGUE.FR
WWW.LEBESGUE.FR/FR/CONF_IA_SANTE2022
PARTNERS
INSTITUT DE RECHERCHE MATHÉMATIQUE DE RENNES
LABORATOIRE DE MATHÉMATIQUES JEAN LERAY
DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES, ENS RENNES
LABORATOIRE DE MATHÉMATIQUES DE BRETAGNE ATLANTIQUE
LABORATOIRE ANGEVIN DE RECHERCHE EN MATHÉMATIQUES
SUPPORTS
AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
RÉGION BRETAGNE
RÉGION PAYS DE LA LOIRE
AFFILIATIONS
UNIV. DE RENNES 1
UNIV. RENNES 2
NANTES UNIVERSITÉ
UNIV. D'ANGERS
UNIV. BRETAGNE SUD
UNIV. DE BRETAGNE OCCIDENTALE
CNRS
INSA RENNES
INRIA
ENS RENNES

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 Proïa*
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 *Terence Bayen*
Dépt de Mathématiques
Univ. d'Avignon
33 rue Louis Pasteur
84000 Avignon

terence.bayen@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 Bretagne 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 MICS, 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 *Aline Lefebvre-Lepot*
CMAP, École Polytechnique
91128 Palaiseau
☎ 01 69 33 45 61 – 🖷 01 69 33 46 46
aline.lefebvre@polytechnique.edu

ENS Cachan *Laure Quivy*
CMLA, ENS Cachan
61 av. du Président Wilson
94235 Cachan CEDEX
☎ 01 47 40 59 12
quivy@clma.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*
LPMA, 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 Mathematiques Appliquees
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^{d} du 11 novembre 1918
69622 Villeurbanne CEDEX
fabreges@math.univ-lyon1.fr

Marne la Vallée *Alain Prignet*
Univ. de Marne-la-Vallée, Cité Descartes
5 b^{d} 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^{d} 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*
I3M, Dép. de Mathématiques,
Univ. Montpellier II, CC51
Pl. Eugène Bataillon
34095 Montpellier CEDEX 5
☎ 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
Anais.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 *Cécile Louchet*
Institut Denis Poisson
Univ. d'Orléans
BP 6759
45067 Orléans CEDEX 2
☎ 02 38 49 27 57 – 🖷 02 38 41 71 93
Cecile.Louchet@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 *David Gontier*
CEREMADE
Univ. Paris-Dauphine
Pl du M^{al} de Lattre de Tassigny
75775 Paris CEDEX 16
☎ 01 44 05 47 26 – 🖷 01 44 05 45 99
gontier@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 Institut Galilée
99, Avenue Jean-Baptiste Clément
93430 Villetaneuse
☎ 01 45 17 16 52
dhersin@math.univ-paris13.fr

Pau *Brahim Amaziane*
Lab. de Math. Appliquées, IPRA,
Univ. de Pau
av. de l'Université
64000 Pau
☎ 05 59 92 31 68/30 47 – 📠 05 59 92 32 00
brahim.amaziane@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^{d} 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 *Nina Aguillon*
Lab. Jacques-Louis Lions
Boîte courrier 187
Sorbonne Université
4 place Jussieu
75252 Paris CEDEX 05
☎ 01 44 27 91 67 – 📠 01 44 27 72 00
aguillon@ann.jussieu.fr

Sorbonne Université *Noufel Frikha*
LPMA, Sorbonne Université
4 place Jussieu
75252 Paris CEDEX 05
☎ 01 57 27 91 33
frikha.noufel@gmail.com

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