Rémi Imbach

Curriculum vitae détaillé

État civil : Rémi Imbach, né le 7 décembre 1985 à Strasbourg, de nationalité française

Adresse professionnelle :
CIMS, New York University
251 Mercer street
New York, NY 10012,
USA

Adresse Personnelle :
2 Washington Square Village
APT 3G
New York, NY 10012,
USA

Adresse de courriel : `remi.imbach@nyu.edu`

Page personnelle : `https://cims.nyu.edu/~imbach/`

Table des matières

1. Exposé factuel

1.1 Parcours professionnel et formation

Parcours professionnel

depuis mai 2018	**Post-doctorat (assistant professor)**, New York University (NYU), Courant institute of Mathematical Sciences (CIMS) Recherches en collaboration avec Chee Yap, Victor Pan, Gleb Pogudin Enseignement en Master d'informatique
2017 - 2018 (10 mois)	**Post-doctorat (scientific assistant)** à Technische Univ. Kaiserslautern (TUK), Allemagne. Équipe AGAG [1], membre du projet open-dreamkit [2] Recherches en collaboration avec Chee Yap, William Hart, Victor Pan
2014 - 2016 (24 mois)	**Post-doctorat** à l'INRIA [3] Nancy - Grand Est, équipe VEGAS [4] Recherches en collaboration avec G. Moroz et M. Pouget
2013 - 2014 (11 mois)	**ATER** [5] à l'Université de Strasbourg (Unistra), laboratoire ICube [6], équipe IGG [7] Recherches en collaboration avec P. Mathis et P. Schreck Enseignements à l'UFR Mathématique et Informatique (MAI), 180h équ. TD
2010 - 2013 (36 mois)	**Doctorat** à l'Unistra, laboratoire ICube, équipe IGG Assorti de trois missions d'enseignements à l'UFR MAI de 64h équivalent TD Directeur de thèse : P. Schreck, co-encadrant : P. Mathis
Jan. - Juin 2010	**Stage de recherche**, Unistra, laboratoire LSIIT [8], équipe IGG. *Méthodes de continuation pour la résolution de contraintes en géométrie* Encadrants : P. Mathis, P. Schreck
Été 2007	**Stage de recherche**, Unistra, laboratoire LSIIT, équipe MIV [9]. *Extension des algorithmes de reconstruction tomographiques des convexes discrets à deux couleurs* Encadrant : A. Daurat

1. Algebra, Geometry and Computer Algebra
2. http://opendreamkit.org
3. Institut National de Recherche en Informatique et Automatique
4. Algorithmes géométriques effectifs pour la visibilité et les surfaces, maintenant GAMBLE pour Géométrie, Algorithmes et Modèles Bien au-delà du Linéaire et de l'Euclidien
5. Attaché Temporaire d'Enseignements de de Recherches
6. Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie
7. Informatique Géométrique et Graphique
8. devenu ICube
9. Mouvements, Images, Vision

Cursus Universitaire

Octobre 2013	**Doctorat** de l'Université de Strasbourg, spécialité Informatique. *Résolution de contraintes géométriques en guidant une méthode homotopique par la géométrie* Thèse soutenue le 08 Octobre 2013 devant le jury : Mohamed Tajine (Pr. à l'Unistra), président du Jury, Dominique Michelucci (Pr. à l'Université de Bourgogne), rapporteur, Bernard Mourrain (DR à l'INRIA Sophia Antipolis), rapporteur, Philippe Serré, (MdC à l'institut SUPMECA), examinateur, Pascal Mathis, (MdC à l'Unistra), examinateur et co-encadrant, Pascal Schreck, (Pr. à l'Unistra), directeur de thèse.
Juin 2010	**Master 2** d'Informatique à l'Unistra, avec mention bien. Mention : Informatique et Sciences de l'Image (ISI)
Septembre 2008	**Master 2** de Mathématiques, Unistra, avec mention bien. Mention : mathématiques discrètes
Juin 2002	**Baccalauréat** Général Scientifique, à Thonon les bains (74).

Développement de logiciels

Juin 2018	`Ccluster` [10] : implémentation d'un algorithme presque optimal pour calculer des clusters de racines complexes de polynômes. Disponible comme programme autonome, ou comme paquet [11] pour `Julia` [12]. Bientôt intégré au logiciel de calcul formel `Singular` [13].
Mars 2016	`subdivision_solver` [14] : solver par subdivision, multi-precision, pour résoudre des systèmes bien déterminés (autant d'équations que de variables) d'équations polynomiales. Conçu spécifiquement pour les systèmes dont les équations sont des gros polynômes en terme de degrés, bit-size et nombre de monomes. Paquet pout `SageMath` [15].

Chercheur invité

Mars 2019 1 semaine	Équipe AGAG, TUK, Allemagne. Intégration de `tcluster` dans le logiciel de calcul formel `Singular`
Novembre 2016 2 semaines	Équipe OGRE [16], Département Automatique, Productique et Informatique, École des Mines de Nantes. *Approximation certifiée de variétés de dimensions positives.* Recherches en collaboration avec A. Goldstejn, C. Jermann et G. Chabert

10. `https://github.com/rimbach/Ccluster`
11. `https://github.com/rimbach/Ccluster.jl`
12. `https://julialang.org/`
13. `https://www.singular.uni-kl.de/`
14. `http://subdiv-solver.gforge.inria.fr/`
15. `http://www.sagemath.org/`
16. Optimisation Globale et Résolution Ensembliste

1.2 Liste des publications

Mes publications sont disponibles sur ma page personnelle :
`https://cims.nyu.edu/~imbach/`.

Note sur l'ordre des noms des auteurs

Les articles [IMS11, IMS12, MSI12, IMS14, IMS16] sont destinés à la communauté d'informatique graphique, où l'usage est de faire apparaître les noms des auteurs dans l'ordre décroissant de l'importance des contributions.

Les articles [IMP15, IMP16, IMP17, IMP18, IPY18] sont destinés à la communauté de calcul symbolique où l'usage est de faire apparaître les noms des auteurs dans l'ordre alphabétique.

Journaux Internationaux

[IMP18] Rémi Imbach, Guillaume Moroz, and Marc Pouget. Reliable location with respect to the projection of a smooth space curve. *Reliable Computing*, 26 :13 – 55, 2018.

[IMP17] Rémi Imbach, Guillaume Moroz, and Marc Pouget. A certified numerical algorithm for the topology of resultant and discriminant curves. *Journal of Symbolic Computation*, 80, Part 2 :285 – 306, 2017.

[IMS16] Rémi Imbach, Pascal Mathis, and Pascal Schreck. A robust and efficient method for solving point distance problems by homotopy. *Mathematical Programming*, pages 1–30, 2016.

[ISM14] Rémi Imbach, Pascal Schreck, and Pascal Mathis. Leading a continuation method by geometry for solving geometric constraints. *Computer-Aided Design*, 46 :138–147, 2014.

Articles en conférences internationales avec comité de lecture

[IPY18] Rémi Imbach, Victor Y. Pan, and Chee Yap. Implementation of a near-optimal complex root clustering algorithm. Dans James H. Davenport, Manuel Kauers, George Labahn, and Josef Urban, editors, *Mathematical Software – ICMS 2018*, pages 235–244, Cham, 2018. Springer International Publishing.

[IMP16] Rémi Imbach, Guillaume Moroz, and Marc Pouget. *Numeric and Certified Isolation of the Singularities of the Projection of a Smooth Space Curve*, pages 78–92. Springer International Publishing, Cham, 2016.

[MSI12] Pascal Mathis, Pascal Schreck, and Rémi Imbach. Decomposition of geometrical constraint systems with reparameterization. Dans *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on Applied Computing*, pages 102–108. ACM, 2012.

[IMS11] Rémi Imbach, Pascal Mathis, and Pascal Schreck. Tracking method for reparametrized geometrical constraint systems. Dans *2011 13th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing*, pages 31–38. IEEE, 2011.

Rapport technique

[Imb16] Rémi Imbach. A Subdivision Solver for Systems of Large Dense Polynomials. Technical Report RT-0476, INRIA Nancy, March 2016.

Articles en conférences nationales

[IMP15] Rémi Imbach, Guillaume Moroz, and Marc Pouget. A certified numerical approach to describe the topology of projected curves. Dans *Journées de l'Association Française d'Informatique Graphique*, 2015.

[IMS12] Rémi Imbach, Pascal Mathis, and Pascal Schreck. Une approche par décomposition et reparamétrisation de systèmes de contraintes géométriques. Dans *Journées du Groupe de Travail en Modélisation Géométrique*, 2012.

Thèse de doctorat

[Imb13] Rémi Imbach. *Résolution de contraintes géométriques en guidant une méthode homotopique par la géométrie*. PhD thesis, Université de Strasbourg, 2013.

1.3 Liste des communications

Certains de mes supports de présentation sont disponibles sur ma page personnelle :
`https://cims.nyu.edu/~imbach/`.

Séminaires

Janvier 2019	*Complex roots/solutions clustering algorithms* Séminaires de l'équipe OGRE, Nantes
Mai 2018	*Numerical and certified computation of the topology of projected curves.* Séminaire CUNY [17] Graduate Center - CIMS de calcul numérique-symbolique [18], CUNY Graduate Center, New York
Juillet 2017	*Certified numerical tools for computing the topology of projected curves.* Séminaires de l'équipe AGAG, TUK, Kaiserslautern, Allemagne
Septembre 2016	*Certified numerical tools for computing the topology of projected curves.* Séminaires AriC [19], Lyon

Conférences internationales et workshops

Juillet 2018	*Implementation of a near-optimal complex root clustering algorithm.* ICMS (International Congress of Mathematical Software), Notre-Dame, USA
Juin 2016	*Interval tools for computing the topology of projected curves*. SWIM 2016 (Summer Workshop on Interval Methods) Lyon, France
Novembre 2015	*Numeric and Certified Isolation of the Singularities of the Projection of a Smooth Space Curve*. MACIS 2015 (Sixth International Conference on Mathematical Aspects of Computer and Information Sciences), Berlin, Germany
Novembre 2013	*Leading a continuation method by geometry for solving geometric constraints*. GD/SPM 13 (Geometric and Physical Modeling), Denver, Colorado, USA
Septembre 2011	*Tracking method for reparametrized geometrical constraint systems*. SYNASC 11 (Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing), Timisoara, Roumanie

Conférences nationales

Novembre 2015	*A Certified Numerical Approach to Describe the Topology of Projected Curves*. Journées de l'Association Française d'Informatique Graphique 2015, Lyon
Octobre 2015	*Numeric certified algorithm for computing the topology of projections of real spatial curves*. Journées Informatique et Géométrie 2015, ESIEE Parie, Marne-la-Vallée, Lyon
Mars 2012	*Une approche par décomposition et reparamétrisation de systèmes de contraintes géométriques*. Journées du Groupe de Travail en Modélisation Géométrique, Strasbourg, France

17. City University of New York
18. `http://qcpages.qc.cuny.edu/~aovchinnikov/seminar.html`
19. `http://www.ens-lyon.fr/LIP/AriC/seminar`

2. Exposé de mes activités d'enseignement

J'ai depuis le début de mon apprentissage du métier d'enseignant chercheur donné une grande importance à l'enseignement en y investissant temps et volonté. Voici un récapitulatif des volumes horaires de mes activités d'enseignement.

2019	**Assistant Professor**, NYU, CIMS, 30h de cours
2018	**Assistant Professor**, NYU, CIMS, 64.4h de cours
2013 - 2014	**ATER**, Unistra, UFR MAI ; service de 180h équivalent TD
2010 - 2013	**Missions d'enseignement**, Unistra, UFR MAI ; service de 64h éq. TD. chaque année.

J'ai eu l'occasion, à mon initiative, d'intervenir dans des enseignements divers par nature. Actuellement à New York, je suis le responsable et l'enseignant d'un cours de mathématiques appliquées à l'informatique (voir une description de cette expérience en sous-section 2.3). Pour ce cours, je coordonne une petite équipe pédagogique, enseigne et organise les évaluations.

À Strasbourg, je suis intervenu comme chargé de TDs et TPs pour des matières classiques du tronc commun de L2/L3 : Architecture des Ordinateurs (cours dispensé par Pascal Mathis), Fondements des Systèmes d'Exploitation (cours dispensé par Vincent Loechner), Graphe (cours dispensé par Nicolas Passat), Structures de Données et Algorithmes (cours dispensé par Nicolas Magaud).

J'ai aussi dispensé des enseignements d'informatiques (surtout de programmation) à l'attention d'étudiants non informaticiens, et ait été responsable de l'unité d'enseignement Informatique 4 en L2 Math/Physique/Chimie pendant mon année d'ATER. La responsable de la filière était alors Marguerite Barzoukas. Cette expérience est décrite en sous-section 2.2.

Pour les cours/TDs/TPs dont j'ai eu la responsabilité, j'ai élaboré mes propres supports de cours, fiches d'exercices et évaluations.

Suit une énumération, matière par matière, de mes services.

2.1 Mes services d'enseignement

printemps 2019	Responsable de l'enseignement *Mathematical Techniques for Computer Science Applications* (MTCSA), Master d'Informatique, 30.8h de cours.
aut. 2018	Responsable de l'enseignement MTCSA, Master d'Informatique, 30.8h de cours.
été 2018	Responsable de l'enseignement MTCSA, Master d'Informatique, 33.6h de cours.
2013 - 2014	Responsable de l'enseignement Informatique 4 en L2 Math/Physique/Chimie, 8h de CI et 24 heures de TP : intro. à la programmation pour résoudre des problèmes scientifiques
2012 - 2014	Architecture des ordinateurs, L2 Informatique (Info), 18h de TD et 12h de TP par promotion ; représentation des entiers et des flottants, fonctions booléennes, circuits logiques et séquentiels, langage d'assemblage, mémoires caches.

2013 - 2014 et 2010 - 2012	Graphes et Recherche Opérationnelle et Graphe, L2 Info, 14h de TD par promotion ; graphes non-orientés, orientés, recherche de plus courts chemins, arbres, flots, recherche de flot maximal (minimal).
2013 - 2014	Enseignements d'informatique pour L2/L3 chimie et sciences physiques : 70h de TP
2013 - 2014	Culture et pratique de l'informatique, L1 Math-Info : 28h de TP
2012 - 2013	Fondements des Systèmes d'Exploitation, L3 Info, 11h de TD et 12h de TP : ordonnancement, systèmes de fichiers, pagination mémoire, mémoire virtuelle, multithreading.
2011 - 2012	Structures de Données et Algorithmes, L3 Mathématique, 24h de TD et 16h de TP : structures de données (tableaux, listes chaînées, arbres,. . .) et algorithmes s'y rapportant (tris, parcours d'arbres, équilibrage d'arbres binaires,. . .).
2010 - 2012	Méthodologie du Travail Universitaire, L1 Math-Info, 12h de TD par promotion : bases de la logique et du raisonnement pour primo-rentrants.
2010 - 2011	Informatique, L3 Electronique, Signaux et Automatique, 24h de TP : Bases du développement (compilation, édition de liens, makefiles) et de la programmation en C (types simples et composés, tableaux, listes, tris).
2010 - 2011	Préparation au C2i, L2 Sciences de la Vie, 16h de TP : Bureautique.

2.2 Expérience de responsable d'enseignement à Strasbourg

J'ai pendant mon année d'ATER été particulièrement impliqué dans la formation en informatique des étudiants de la licence Math/Physique/Chimie et ai eu la chance d'être responsable de l'enseignement intitulé *informatique 4* en deuxième année de cette licence. Cet enseignement était composé de 8 heures de Cours Intégrés (CI) que j'ai assurées et de deux fois 24 heures de TPs (le public étant scindé en deux groupes) assurées pour moitié par un autre enseignant et moitié par moi-même. Cette formule étant une nouveauté par rapports aux années précédentes, nous avons partiellement refondu son contenu pour l'adapter.

Pour décrire brièvement ce contenu, les étudiants ayant eu une introduction à l'algorithmique et au langage `octave` lors du semestre précédent (enseignement auquel j'ai participé en tant que chargé de TP), il s'agissait d'approfondir les notions basiques d'algorithmique et de structures de données dans le but d'aborder la modélisation et la résolution de problèmes simples issus des mathématiques ou de la physique : résolution numérique d'équations différentielles, manipulation symbolique de polynômes à coefficients rationnels ou encore simulation d'ondes 2D.

J'ai également élaboré les épreuves d'évaluations en accord avec les modalités d'évaluation spécifiées par la responsable de filière (Marguerite Barzoukas) et en collaboration avec l'enseignant intervenant en TPs.

Cette expérience m'a donc permis d'appréhender dans son ensemble le processus pédagogique guidant un enseignement (conception du contenu, adaptation au public en cours de semestre et évaluation des étudiants) ainsi que sa mise en pratique (élaboration des plannings, direction d'une équipe pédagogique, etc).

2.3 Expérience de responsable d'enseignement à New York

J'enseigne depuis l'été 2018 le module *Mathematical Techniques for Computer Science Applications* (MTCSA) pour des étudiants en Master d'Informatique à la NYU. Ce module se décompose en deux parties : algèbre linéaire (calcul matriciel, espaces vectoriels, espaces affines, géométrie affine) et calcul des probabilités (espaces probabilisés, variables aléatoires discrètes et continues, modèles de Markov, théorème central limite, loi des grands nombres) et leur applications en traitement du signal, informatique graphique, *Machine learning*, et une introduction aux méthodes de calcul numérique. Le cours est illustré en `matlab`.

Pour expliquer la raison d'être de cet enseignement en Master, il faut expliquer brièvement le fonctionnement d'un Master à la NYU : un étudiant choisi ses enseignements dans un bouquet pour obtenir un certain nombre de crédits ; l'ensemble des enseignements choisis donne une coloration au Master quand il est obtenu. Certaines matières nécessitent des prérequis en mathématiques et les étudiants n'ayant pas ces prérequis ou ne pouvant le justifier peuvent suivre l'enseignement MTCSA. Une autre particularité de MTCSA est de donner ces bases mathématiques dans l'optique de leur application en informatique (en informatique graphique, *Machine learning* et méthodes numériques).

La principale difficulté de cet enseignement est l'hétérogenéité du public : certains de mes étudiants ont besoin de ces bases (c'est le cas des étudiants américains travaillant à temps plein et souhaitant obtenir un master pour améliorer leur situation professionnelle) d'autres les ont mais souhaitent voir comment les appliquer (c'est le cas des étudiants étrangers venus faire un master aux États Unis après avoir obtenu une licence de mathématiques ou d'informatique dans leur pays d'origine). Pour gérer cette difficulté, j'ai choisi de répartir le temps de cours à égale proportion entre contenu mathématique et application en informatique.

Je dirige pour cet enseignement une petite équipe pédagogique (un assistant et un *grader* en été 2018, un *grader* en automne 2018 et au printemps 2019). Je mets également à disposition des étudiants des fiches d'éxercices pour chaque cours, et j'organise les évaluations de contrôle continu (deux devoirs rédigés à la maison, quatre petits projets de programmation, dont un consistant en l'implémentation d'un algorithme de lancé de rayons pour construire une image 2D à partir d'une scène 3D) et final (deux devoirs sur table d'une heure et demi).

Le site web du cours met à disposition des étudiants mon support de cours, des fiches d'exercices et les épreuves de contrôles continus. Celui-ci n'est accessible que par la communauté NYU, vous en trouverez une copie à l'adresse : `https://cims.nyu.edu/~imbach/mtcsa/index.html`

Vous trouverez jointe à mon dossier une lettre de recommandation de Ernest Davis, le directeur du Master d'informatique du dépatement d'informatique du CIMS, concernant cette expérience.

3. Exposé de mes activités de recherche

Mon premier contact avec la recherche en informatique a eu lieu lors d'un stage encadré par Alain Daurat, dans le cadre de mon master de mathématiques discrètes, au sein du laboratoire LSIIT. Il portait sur l'étude et l'extension d'algorithmes de tomographie discrète et m'a incité à orienter mes études vers l'informatique géométrique et graphique.

J'ai ensuite obtenu une bourse du ministère pour un doctorat sous la direction de Pascal Schreck, avec comme co-encadrant Pascal Mathis, au sein de l'équipe IGG du laboratoire ICube dans le domaine de la résolution de Systèmes de Contraintes Géométriques (SCG). L'enjeu de ces recherches, poursuivies grâce à une position d'ATER à Strasbourg, a été de mêler raisonnement géométrique et méthode numérique, plus précisémment par continuation (ou homotopie).

Entre Novembre 2014 et 2016, j'ai effectué un post-doctorat à l'INRIA Nancy-Grand Est dans l'équipe VEGAS en collaboration avec Guillaume Moroz et Marc Pouget portant sur l'étude, la caractérisation et la représentation de la topologie de courbes et surfaces avec singularités, avec des approches numériques et certifiées.

Depuis Mai 2017, j'effectue des recherches en collaborations avec Chee Yap, Victor Pan, William B. Hart et Gleb Pogudin ; j'ai occupé pendant 10 mois un poste de *scientific assistant* à la TU Kaiserslautern, dans l'équipe AGAG, et depuis Mai 2018, j'ai une position d'*assistant professor* au CIMS à la NYU. Mes recherches portent sur l'utilisation de méthodes par subdivision pour la résolution de systèmes d'équations polynomiales.

Mes domaines de recherches sont les méthodes numériques et symboliques appliquées à la géométrie algébrique, le calcul numérique et par intervalles, la topologie des courbes et surfaces et la résolution de systèmes de contraintes géométriques. J'ai toujours accompagné les résultats théorique auxquelles mes recherches ont donné lieu par des preuves de concepts logiciels, dont certains sont disponibles pour la communauté.

3.1 Mes recherches à Kaiserslautern et New York

Le but du projet dans lequel s'inscrivent mes recherches depuis mai 2017 est de fournir des outils numériques, certifiés et si-possible avec une complexitée prouvée pour isoler des clusters de racines réelles ou complexes de polynômes, et des clusters de solutions pour des systèmes algébriques. L'état de l'art actuel dans ce domaine est le fruit de décennies de recherche, mais ses enjeux sont actuels, puisqu'ils interviennent en robotique, en calcul scientifique, en vision par ordinateurs, etc.

Jusqu'à récemment, les méthodes de résolution étaient soit rapides mais sensible aux cas non-génériques et non-certifiées, ou symbolique, robustes mais souffrant d'une complexité exponentielle (mais prouvée). Récemment des techniques mêlant calcul symbolique et numérique ont montré leur intérêt ; des récentes contributions concernant les méthodes par homotopie proposent des algorithmes avec des complexités bornées et des résultats certifiés grâce à la théorie de Smale. Les méthodes par subdivision aussi ont fait l'objet de récentes améliorations. Elles permettent en particulier d'obtenir des résultats certifiés mêmes si les équations du problème à résoudre sont connues par approximations. Elles permettent aussi de rechercher localement des solutions, au contraire des autres méthodes qui recherchent intrinsèquement toutes les solutions.

Ma première contribution à ce projet a été l'implémentation, en collaboration avec Chee Yap et Victor Pan, d'un algorithme presque optimal utilisant de la subdivision pour calculer des clusters de racines complexes d'un polynôme. Le résultat est le logiciel `Ccluster`[20] et son

20. `https://github.com/rimbach/Ccluster`

wrapper pour `Julia` [21] mis à la disposition de la communauté. Outre ses aspects techniques, cette implémentation a nécessité des optimisations bas et haut niveau de l'algorithme ; elle est décrite dans [IPY18].

Nos travaux actuels portent d'une part sur l'amélioration pratique de cet algorithme en utilisant une approche “diviser pour régner”, sur son utilisation pour résoudre des systèmes triangulaires et plus généralement son extension au cas multivarié.

3.2 Mes recherches à Nancy

Mon travail à Nancy a porté sur l'étude et la caractérisation de la topologie de courbes singulières obtenues par projection grâce à des méthodes symboliques et numériques.

Les singularités engendrées par projections interviennent naturellement dans létude de la cinématique des robots parallèles ; elles correspondent à des configurations dans lesquelles un tel robot peut s'endommager (et il est plus que souhaitable d'éviter de telles configurations), ou se reconfigurer ; la détection certifiée de telles singularités est donc un problème ayant des applications pratiques. Nous (Guillaume Moroz, Marc Pouget et moi) avons collaboré avec les chercheurs de l'équipe OGRE [22] du LS2N [23] à Nantes, spécialisée dans l'étude des méthodes numériques appliquées à la robotique.

Le calcul d'ensembles contenant des points singuliers passe en premier lieu par le calcul de ces points singuliers. Les approches de l'état de l'art proposent de les caractériser comme les solutions, en général non régulières, d'un systèmes d'équations ; l'utilisation directe d'une méthode numérique pour résoudre ces systèmes est rendue difficile par la non-régularité des solutions cherchées.

Dans le cas de courbes provenant de la projection de courbes algébriques réelles, on a proposé un nouveau système dont les solutions sont régulières et sont les singularités de la projection. On a montré qu'une approche numérique certifiée par subdivision d'intervalles spécialisée à ces systèmes (développé pendant mon post-doctorat, voir [Imb16]) permettait d'isoler ces singularités plus efficacement qu'avec les méthodes de l'état de l'art. Dans le cas de la projection de courbes analytiques, on a proposé une caractérisation géométrique des singularités, scalable en dimension, se traduisant par un système d'équations appelé système des sommes et des différences, dont les solutions sont régulières. Cette caractérisation est à notre connaissance la premiére permettant d'isoler les singularités d'une courbe projetée dans le cas analytique (voir [IMP16]).

Nous avons également proposé une méthode locale et géométrique, utilisant un suivi certifié de la courbe avant projection, pour calculer la topologie plongée dans le plan de la courbe projetée ; le résultat d'une telle méthode est un graphe planaire et un de ses plongements, ce dernier étant isotope à la courbe projetée. Cette méthode a été publié dans la revue *Reliable Computing* (voir [IMP17]). *Reliable Computing* est un journal libre spécialisée dans le calcul certifié.

3.3 Mes recherches à Strasbourg

Le but de la résolution de SCG est de produire des figures dans le plan ou l'espace satisfaisant un ensemble de contraintes géométriques (distances, coplanarités, ...). Ces systèmes

21. `https://github.com/rimbach/Ccluster.jl`
22. Optimisation Globale et Résolution Ensembliste
23. Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes

peuvent être écrits sous forme de systèmes d'équations, dont la résolution par continuation revient à déformer un système structurellement proche (dans notre cas, identique à des paramètres près) en le système à résoudre. La déformation correspond à une fonction d'homotopie et les composantes connexes de l'ensemble de ses zéros forment des courbes ; lors d'une homotopie dans le domaine réel, ces courbes peuvent présenter des singularités. Nous (mes encadrants de thèse et moi) avons d'abord mis en évidence le lien entre ces singularités et des configurations géométriques particulières de solutions du SCG, et montré comment construire la fonction d'homotopie de manière à si possible éviter ces singularités, et à défaut prévoir leur présence sur un chemin. Établir ce lien entre la géométrie et la topologie a permis de définir une méthode de résoltion de SCG rapide et robuste, permettant d'obtenir plusieurs solutions (voir [ISM14]).

Les problèmes de résolution de SCG interviennent en Conception assistée par ordinateur, en chimie moléculaires ou encore en robotique ; dans ces deux premiers domaines d'application, le but est de construire des figures en 3D impliquant de nombreuses contraintes et la méthode décrite plus haut revient à suivre des chemins d'homotopie dans des espaces de grande dimension. Les systèmes d'équations correspondant sont en revanche presque triangulaires ; plus précisément, il suffit en général de modifier quelques contraintes pour obtenir un système triangulaire par blocs, qui peut être résolu très facilement par une méthode *ad hoc*, en ajoutant de nouveaux paramètres au système (on obtient alors un système dit *reparamétré*) ; il s'agit alors de trouver les valeurs de ces paramètres permettant d'obtenir des solutions du système original. Nous avons proposé une méthode par homotopie pour trouver ces paramètres, et montrer que les courbes d'homotopie obtenues sont des projections des courbes d'homotopie du problème original ; les singularités de ces projections correspondent à des figures géométriques particulières liées à la reparamétrisation choisie. Nous avons aussi montré comment changer la reparamétrisation pendant le suivi du chemin pour éviter les singularités. L'un dans l'autre, nous avons proposé une méthode complexe mais robuste mêlant raisonnement géométrique et résolution numérique, dont l'implémentation a montré l'efficacité (voir [IMS16]).

Références

[IPY18] Rémi Imbach, Victor Y. Pan, and Chee Yap. Implementation of a near-optimal complex root clustering algorithm. Dans James H. Davenport, Manuel Kauers, George Labahn, and Josef Urban, editors, *Mathematical Software – ICMS 2018*, pages 235–244, Cham, 2018. Springer International Publishing.

[Imb16] Rémi Imbach. A Subdivision Solver for Systems of Large Dense Polynomials. Technical Report RT-0476, INRIA Nancy, March 2016.

[IMP16] Rémi Imbach, Guillaume Moroz, and Marc Pouget. *Numeric and Certified Isolation of the Singularities of the Projection of a Smooth Space Curve*, pages 78–92. Springer International Publishing, Cham, 2016.

[IMP17] Rémi Imbach, Guillaume Moroz, and Marc Pouget. A certified numerical algorithm for the topology of resultant and discriminant curves. *Journal of Symbolic Computation*, 80, Part 2 :285 – 306, 2017.

[ISM14] Rémi Imbach, Pascal Schreck, and Pascal Mathis. Leading a continuation method by geometry for solving geometric constraints. *Computer-Aided Design*, 46 :138–147, 2014.

[IMS16] Rémi Imbach, Pascal Mathis, and Pascal Schreck. A robust and efficient method for solving point distance problems by homotopy. *Mathematical Programming*, pages 1–30, 2016.