
**Dossier de candidature, campagne de repyramidage en section 26 à
l'Université de Bordeaux**

Lisl Weynans
Université de Bordeaux
Institut de Mathématiques de Bordeaux
Equipe-projet Carmen, Centre Inria de l'Université de Bordeaux
IHU-Liryx : Institut des maladies du rythme cardiaque
lisl.weynans@math.u-bordeaux.fr
<http://www.math.u-bordeaux.fr/~lweynans>

Table des matières

1	Carrière	2
2	Thèmes de recherche, publications et diffusion des travaux	2
3	Responsabilités et projets	6
4	Enseignement et encadrement	9
5	Projet d'animation pédagogique et scientifique	13
6	Activités de recherche	14
7	Projet de recherche	22

1 Carrière

Depuis 2017 : Membre de l'équipe-projet Inria [Carmen](#) et de l'[IHU Liryc](#)

2007 - 2017 : Membre des équipes-projet Inria MC2 puis [Memphis](#)

Depuis Septembre 2007 : Maîtresse de Conférences à l'Institut de Mathématiques de Bordeaux, Université de Bordeaux

Février 2007 - Septembre 2007 : Post-doctorante au Laboratoire Jacques-Louis Lions, Université Paris 6

Février 2004 - Février 2007 : Doctorante-contractuelle au CEA DAM Bruyères-le-Châtel

Promue hors classe par le CNU 26 en 2021, titulaire de la PES/PEDR depuis 2012
Congés maternité en 2011 et 2013 suivis de demi-délégations Inria

Formation et diplômes

2018 : Habilitation à diriger des recherches, Université de Bordeaux.

Prise en compte précise de géométries complexes pour l'approximation d'EDP sur grilles cartésiennes et leur simulation en calcul parallèle

Rapporteurs : Christophe Besse, Frédéric Gibou, Florence Hubert

2004 - 2006 : Thèse de doctorat en Mathématiques Appliquées, Université Grenoble 1

Méthode particulière multiniveaux pour la dynamique des gaz, application au calcul d'écoulements multifluides

Rapporteurs : Rémi Abgrall, Serge Huberson

Directeurs : Georges-Henri Cottet (Univ. Grenoble) et Bernard Rebouret (CEA/DAM)

2002 - 2003 : DEA d'Analyse Numérique, Université Paris 6

2000 - 2003 : Diplôme d'ingénieur ENSTA

2 Thèmes de recherche, publications et diffusion des travaux

2.1 Thèmes de recherche

Mes activités de recherche concernent l'analyse numérique, la modélisation et le calcul scientifique. Je m'intéresse au développement de nouvelles méthodes numériques, à leur analyse, leur implémentation et à leur application à des problèmes issus de la physique, la biologie ou la médecine.

Actuellement je travaille sur les sujets suivants :

- **Problèmes inverses en lien avec l'électrophysiologie cardiaque :**

Le but général est d'améliorer les méthodes actuelles d'imagerie non-invasive de l'activité électrique du coeur, dans le cadre de la détection des troubles du rythme cardiaque.

Problème inverse électrocardiographique : reconstruction de l'activité électrique du coeur à partir de mesures non-invasives sur le torse, développement d'une nouvelle méthode dite "Patchwork" sélectionnant localement parmi plusieurs solutions disponibles celle qui présente la meilleure adéquation aux données, couplage avec une équation eikonale pour modéliser le front de propagation électrique sur la surface du coeur, reconstruction des temps d'activation avec une modélisation surfacique du coeur.

Tomographie par impédance électrique : développement de schémas de type frontières immergées sur grilles cartésiennes, identification de conductivités ou de variations de conductivités dans le volume du torse.

- **Écoulements géophysiques :** Imposition de conditions aux limites génératrices dans le but de simuler des écoulements côtiers sans augmenter la taille du domaine de calcul, imposition de conditions de couplage pour l'interaction entre un écoulement et un solide, dans le but de simuler des dispositifs de récupération d'énergie des vagues.

J'ai travaillé au cours des années précédentes sur les sujets suivants :

- **Schémas de type frontières immergées sur grilles cartésiennes pour des écoulements fluides**, dans le but d'améliorer la précision de la simulation, dans le cas d'écoulements compressibles dans des géométries complexes, de suspensions de particules dans un fluide incompressible, d'écoulements incompressibles bifluides type eau-air.
- **Schémas aux différences finies pour des problèmes elliptiques avec interfaces immergées**, dans le but de maintenir une précision d'ordre élevé près de ces interfaces et dans tout le domaine, application à la simulation de l'électroperméabilisation de cellules biologiques et la simulation du comportement de matériaux électrostrictifs.
- **Méthodes particulières avec remailage pour des écoulements compressibles**, pour simuler des phénomènes où le transport joue un rôle prépondérant, application à la simulation d'écoulements multifluides et au transport optimal.

2.2 Publications

Je publie dans des revues de mathématiques appliquées et calcul scientifique. Avant mon changement thématique je publiais également dans des journaux de mécanique des fluides numérique, et depuis ce changement dans des revues ou des proceedings de conférences en ingénierie biomédicale. Tous mes travaux sont accessibles sur ma page web.

Mémoires

1. Habilitation à Diriger des Recherches

[Prise en compte précise de géométries complexes pour l'approximation d'EDP sur grilles cartésiennes et leur simulation en calcul parallèle](#), soutenue à l'Université de Bordeaux en Décembre 2018.

2. Thèse de doctorat

[Méthode particulière multiniveaux pour la dynamique des gaz, application au calcul d'écoulements multifluides](#), soutenue à l'Université de Grenoble 1 en Décembre 2006.

Publications dans des revues à comité de lecture [19]

1. J. Dardé, N. Nasr, L. Weynans, [Immersed Boundary Method for the Complete Electrode Model in Electrical Impedance Tomography](#), *J. Comput. Phys.*, Vol. 487, 112-150, 2023
2. J. Fehrenbach, L. Weynans, [Source and metric estimation in the eikonal equation using optimization on a manifold](#), *Inverse Problems and Imaging*, Vol 17, issue 2, 419-440, 2023
3. O. Bouhamama, M. Potse, L. Bear, L. Weynans, [A Patchwork Method to Improve the Performance of Current Methods for Solving the Inverse Problem of Electrocardiography](#), *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 70, no. 1, pp. 55-66, 2023
4. M. Bergmann, L. Weynans, [A Cartesian method with second-order pressure resolution for incompressible flows with large density ratios](#), *Fluids*, 6(11), 402, 2021
5. D. Lannes, L. Weynans, [Generating boundary conditions for a Boussinesq system](#), *Nonlinearity*, vol 33, p 6868-6889, 2020
6. B. Lambert, M. Bergmann, L. Weynans, [Methodology for Numerical Simulations of Ellipsoidal Particle-Laden Flows](#), *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, vol 92, p 855-873, 2020
7. B. Lambert, M. Bergmann, L. Weynans, [Local lubrication model for spherical particles within an incompressible Navier-Stokes flow](#), *Phys. Rev. E*, vol 97, 033313, 2018

8. L. Weynans, [Super-convergence in maximum norm of the gradient for the Shortley-Weller method](#), *J. Sci. Comput.*, vol 75, pp 625-637, 2018
9. M. Bergmann, F. Luddens, L. Weynans, [Enablers for high order level set methods in fluid mechanics](#), *Int. J. Num. Meth. Fl.*, 79, pp.654-675, 2015
10. A. Bouharguane, A. Iollo, L. Weynans, [Numerical solution of the Monge-Kantorovich problem by Picard iterations](#), *ESAIM : Math. Modell. Numer. Anal.*, 49 (6), pp.1577, 2015
11. M. Leguebe, C. Poinard, L. Weynans, [A second-order Cartesian method for the simulation of electropermeabilization cell models](#), *J. Comput. Phys*, vol 292, pp114-140, 2015
12. O. Kavian, M. Leguebe, C. Poinard, L. Weynans, ["Classical" Electropermeabilization Modeling at the Cell Scale](#), *J. Math. Biol.*, Vol 68, pp 1-31, 2014
13. A. Magni, L. Weynans, [Consistency, accuracy and entropic behaviour of remeshed particle methods](#), *ESAIM : Math. Modell. Numer. Anal.*, Vol. 47, pp 57-81, 2013.
14. Y. Gorsse, A. Iollo, H. Telib, L. WEYNANS, [A simple second order Cartesian scheme for compressible flows](#), *J. Comput. Phys.*, Vol. 231, Issue 23, pp 7780-7794, 2012.
15. M. Cisternino, L. Weynans, [A parallel second order Cartesian method for elliptic interface problems](#), *Commun. Comput. Phys.*, Vol. 12, pp. 1562-1587, 2012.
16. D. Dambrine, P. Hoch, R. Kuate, J. Loheac, J. Metral, B. Rebourcet, L. Weynans, [Robust numerical schemes for anisotropic diffusion problems, a first step for turbulence modeling in Lagrangian hydrodynamics](#), *ESAIM : Proc.*, Vol. 28, p. 80-99, 2009
17. L. Boudin, L. Weynans, [Spray impingement on a wall in the context of the upper airways](#), *ESAIM : Proc.*, Vol. 23, pp. 1-9, 2008
18. S. Hickel, L. Weynans, N.A. Adams, G.-H. Cottet, [Towards implicit Sub-Grid Scale Modeling by Particle Methods](#), *ESAIM : Proc.*, Vol. 16, pp. 77-88, 2007
19. G.-H. Cottet, L. Weynans, [Particle methods revisited: a class of high order finite-difference methods](#), *C. R. Acad. Sci., Paris, Ser. I, Vol 343, No 1, p. 51, 2006.*

Preprints et articles en préparation [3]

1. G. Beck, D. Lannes, L. Weynans, [A second order scheme for waves interacting with floating objects in the Boussinesq regime](#), *soumis à Math Models Methods Appl Sci en 2023*
2. L. Weynans, [Convergence of a cartesian method for elliptic problems with immersed interfaces](#), *soumis à Springer Series en 2024*
3. Y. Bourgault, Y. Coudière, E. Lagracie, L. Weynans, [An interface heart model for the inverse problem of cardiac electrophysiology](#), *en préparation*

Actes de conférences [7]

1. E. Lagracie, L. Weynans, Y. Coudière, [Comparison of Two Formulations for Computing Body Surface Potential Maps](#) *CinC 2023 - Computing in Cardiology, Atlanta*
2. O. Bouhamama, L. Weynans, L. Bear, [Evaluation of the ECGI Patchwork Method Using experimental Data in Sinus Rhythm](#) *CinC 2021 - Computing in Cardiology, Sept. 2021, Brno/virtual*
3. O. Bouhamama, M. Potse, R. Dubois, L. Weynans, L. Bear, [A Patchwork Inverse Method in Combination with the Activation Time Gradient to Detect Regions of Slow Conduction in Sinus Rhythm](#), *CinC 2020 - Computing in Cardiology, Sep 2020, Rimini*
4. M. Bergmann, F. Luddens, L. Weynans, [A sharp Cartesian method for the simulation of air-water interface](#), *Proceedings of ICCFD8, 2014*
5. M. Bergmann, C. Galusinski, I. Iollo, L. Weynans, [Drag and drop simulations : from images to full 3D simulations](#) *Proceedings of ICCFD8, 2014*
6. Y. Gorsse, I. Iollo, L. Weynans, [A simple second order cartesian scheme for compressible flows](#) *FVCA VI, Springer Proceedings in Mathematics, vol 4, Part 1, 543-551, 2011*
7. G.-H. Cottet, B. Rebourcet, L. Weynans, [A multilevel adaptive particle-grid method for gas dynamics](#), *ECCOMAS Thematic Conference on Meshless Methods, B14.1-6, 2005*

2.3 Diffusion des travaux

Conférences internationales [26 dont 5 invitations]

- 2023 : ICIAM Conference (Tokyo, Japon), Computing in Cardiology (Atlanta, USA)
- 2022 : Computing in Cardiology (Tampere/virtual, Finlande)
- 2021 : Computing in Cardiology (Brno/virtual, République Tchèque)
- 2020 : VPH 2020 Conference (Paris), Computing in Cardiology (Rimini/virtual, Italy)
- 2019 : Mini-symposium "Numerical methods for interfacial dynamics", ICIAM 2019 (Valence, Espagne), Hywec 2 : The Hydrodynamics of Wave Energy Convertors" (Talence, France, conférencière invitée)
- 2018 : Fifth International Workshop on "Modeling, Analysis, Simulations, and Applications of Inter-Facial Dynamics and FSI Problems" et son pré-meeting (Académie des Sciences de Chine, Pékin et Sanya, Chine, conférencière invitée aux deux)
- 2017 : 70th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (Denver, Colorado)
- 2016 : International Workshop on Fluid-Structure Interaction Problems (Singapour, conférencière invitée), 7th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (Venise, Italie)
- 2015 : Workshop BIS (Santa Barbara, Etats-Unis, conférencière invitée)
- 2014 : Workshop "Cartels" : "Cartesian grid, Level-set and Immersed boundary Lecture Series" (Bordeaux), ICCFD 2014 (Chengdu, China)
- 2013 : EUROMECH Colloquium "Immersed Boundary Methods : Current Status and Future Research Directions" (Leiden, The Netherlands)
- 2012 : IUTAM Symposium on Particle methods in Fluid Mechanics (Lyngby, Danemark), Gordon Research Conference on Bioelectrochemistry (Barga, Italie)
- 2011 : Mini-Symposium on Fictitious Domain Methods, 16th International Conference on Finite Elements in Flow Problems (Munich, Allemagne), International Symposium on Finite Volumes for Complex Applications 6 (Prague)
- 2010 : International workshop on Immersed Boundaries and Fictitious Domain Methods (CIRM, Marseille), Workshop on "Analytical and Numerical Problems in Fluid Dynamics" (Catane, Italie, conférencière invitée)
- 2009 : Symposium "Current and New Trends in Scientific Computing" (Université du Chili, Santiago)
- 2008 : Congrès ECCOMAS (Venise, Italie)
- 2005 : ECCOMAS Thematic Conference on Meshless Methods (Lisbonne, Portugal)

Conférences nationales et séminaires [37 dont 26 invitations]

- 2024 : Séminaire à l'ICJ (Lyon)
- 2023 : Séminaires à l'IMT (Toulouse) et au LMAP (Pau)
- 2022 : Colloque des Journées Math Bio Santé (Besançon, conférencière invitée), workshop "Méthodes Frontières Immergées en Nouvelle-Aquitaine" Fédération Margaux (Poitiers, conférencière invitée), séminaire ENSTA Paris
- 2021 : Séminaires au LAGA (Paris 13), LMO (Paris-Saclay), LJLL (Sorbonne Université), journée "Calcul et Simulation" de la Fédération Margaux (Arcachon, conférencière invitée), congrès SMAI
- 2021 : Conférence cycle SMAI & Musée des Arts et Métiers (conférencière invitée)
- 2019 : Séminaire à l'Institut de Mathématiques de Toulouse, workshop de l'ANR RheoSUNN (Ecole Polytechnique, Palaiseau, conférencière invitée)
- 2018 : Groupe de travail MathOcéan (Bordeaux), séminaire au LJAD (Nice)
- 2016 : Journées CEA-GAMNI, Paris

- 2015 : Séminaires au LMO (Paris-Saclay), LMA (Poitiers), IMAG (Montpellier) et à l'Ecole Centrale Nantes, Workshop "Boundary conditions" (Bordeaux), séminaire à Optimad Engineering (Turin)
- 2013 : Séminaire de l'équipe Calcul et Modélisation (Bordeaux), Congrès français de mécanique (Bordeaux), Congrès SMAI (Seignosse)
- 2011 : Journée Scientifique : Méthodes numériques innovantes pour l'interaction fluide - structure, IMT (Toulouse, conférencière invitée)
- 2010 : Séminaire du Laboratoire Nicolas Oresme (Caen)
- 2008 : Séminaire du CEMRACS (Marseille), Journées Pau-Bordeaux-Toulouse (conférencière invitée)
- 2007 : Groupe de travail de Mécanique des Fluides, IMT (Toulouse), séminaire du Département d'Ingénierie Civile (Université Catholique de Louvain-la-Neuve, Belgique)
- 2006 : Groupe de travail "Méthodes numériques" du LJLL (Paris 6), séminaire EDP, IRMA (Strasbourg), Journées EDP Rhône-Alpes (St Etienne, conférencière invitée), Groupe de travail "Mécanique des fluides réels" (ENS Cachan), CANUM
- 2005 : Groupe de travail "Autour de la mécanique des fluides" (ENS Cachan)

3 Responsabilités et projets

Responsabilités administratives

- 2023 : Membre élu du CNU 26, élue au bureau en tant qu'assesseuse rang B
- 2023 : Membre de la Commission des Emplois de Recherche du centre Inria de l'Université de Bordeaux
- 2020 - 2023, puis 2023 - : Membre élu du CA de la SMAI
- 2019 - : Membre du Bureau du Comité des Projets du centre Inria de l'Université de Bordeaux, qui a la charge d'assister la direction du centre sur les sujets scientifiques
- 2019 - 2022 : Membre du conseil scientifique de l'IMB
- 2019 - 2022 : Membre de la Commission Consultative de la section 26 de l'IMB
- 2018 - 2022 : Membre élu du conseil de l'UF Mathématiques et Interactions
- 2012 - : Correspondante locale de la SMAI à l'IMB
- 2014 - 2019 : Membre élu du conseil du Département Science et Technologies de l'Université de Bordeaux
- 2010 - 2014 : Membre élu de la Commission Consultative de la section 26 à l'IMB
- 2012 -2014 : Membre élu du collège B du conseil de l'UFR Maths-Info

Implication dans la vie collective

- 2021 - : Création d'un [programme de mentorat](#) pour les personnels de l'IMB
- 2019 : Initiation d'une étude conduite par Laura Chevalier, doctorante en sciences humaines sur le ressenti de carrière des enseignant.e.s-chercheur.e.s et chercheur.es. de l'IMB
- 2018 - : Création de la [mission Parité de l'IMB](#)
- 2017 - 2018 : Membre de la commission Egalité de l'Université de Bordeaux

Animation scientifique

- 2025 : membre de l'équipe organisatrice du congrès SMAI 2025
- 2024 : membre du comité scientifique du CANUM 2024
- 2024 : Participation à l'organisation du colloque "ETES 2024" (Enseigner les Transitions Écologiques et Sociales dans le supérieur)

- Juin 2023 : Organisation du Workshop "Mathematics of electrical imaging : modeling, theory and implementation" à Toulouse
- 2019 - 2020 : Organisation d'un Journal Club bimensuel, équipe Modélisation de l'IHU Liryc
- 2019 : Organisation du groupe de travail "Méthodes Numériques" à l'IMB
- Octobre 2018, Décembre 2016, Janvier 2015 : Organisation de journées scientifiques de l'équipe " Calcul Scientifique Modélisation" de l'IMB
- Juin 2015 : Organisation d'un workshop dans le cadre d'un projet BIS (financé par l'Idex de Bordeaux), Santa Barbara, USA,
- Mars 2014 : Membre de l'équipe organisatrice du Workshop "CartelS" : "Cartesian grid, Level-set and Immersed boundary Lecture Series", Bordeaux
- Septembre 2013 : Membre de l'équipe organisatrice de la Young Investigator Conference ECCOMAS, Bordeaux
- Janvier 2011 : Membre de l'équipe organisatrice de la Journée d'Accueil en Mathématiques à Paris
- 2010 : Membre de l'équipe organisatrice du CANUM (Congrès d'Analyse Numérique)
- 2009 -2013 : Co-responsable du séminaire de l'Equipe Calcul et Modélisation de l'IMB
- 2007 - 2008 : Responsable du groupe de travail de l'équipe Inria MC2

Projets de recherche en tant que PI

- 2024 - 2028 : PI avec J.-R. Li (Paris Saclay) de l'Action Exploratoire Inria "REALPRIOR-REIT". Ce projet vise à développer des méthodes d'inférence bayésienne avec a priori physiologiques réalistes pour la tomographie par impédance électrique.
Financement obtenu : 1 thèse, 2 ans de postdoctorat, 24 Keuros de fonctionnement
- 2023 - 2027 : PI du projet de recherche "TIE-Cardio", co-financé par la Région Nouvelle-Aquitaine, Inria Bordeaux et la Fondation EDF, impliquant l'IMB, le laboratoire de Mathématiques et Applications de Pau et l'IHU-Liryc. Ce projet vise à développer des méthodes numériques pour le couplage tomographie par impédance électrique/imagerie électrocardiographique et les valider expérimentalement.
Financement obtenu : 1 thèse, 2 ans de postdoctorat, 15 Keuros pour l'achat d'équipement expérimental
- 2023 : PI du projet "Tomographie d'impédance électrique pour la détection d'arythmies cardiaques", financé par la Fondation EDF, impliquant Jérémie Dardé (IMT, Toulouse) et Jing-Rebecca Li (Inria Paris Saclay)
Financement obtenu : 20 Keuros pour l'achat d'équipement expérimental, 1 stage de master
- 2018 : PI du projet "Méthodes de Monte Carlo pour la résolution du problème inverse en électrocardiographie" de l'Appel à Projet Interdisciplinaire de l'Université de Bordeaux
Financement obtenu : 1 thèse
- 2014 - 2016 : PI avec Angelo Iollo du projet inter-Labex (CPU-Amadeus) ElectroS, sur la modélisation numérique de matériaux électrostrictifs, en collaboration avec des physiciens-chimistes expérimentateurs de 2 laboratoires bordelais
Financement obtenu : 1 an de postdoctorat

Projets de recherche en tant que participante

- 2020 - 2024 : membre du projet Labex CIMI "Electrical Impedance Tomography for the Inverse Problem of Electrocardiographic Imaging" de l'Université de Toulouse, porté par Jérémie Dardé (IMT, Toulouse)
Financement obtenu : 24 Keuros pour organiser des échanges scientifiques
- 2020 : membre du projet EcosNord / Conacyt "Qualitative and numerical analysis of inverse problems in cardiology" entre l'équipe Inria Carmen et le centre de mathématiques appliquées de la Benemerita Universidad Autonoma de Puebla, Mexico
Financement obtenu : des séjours bilatéraux pour des chercheurs et des étudiants

- 2015 : membre du projet PEPS-Egalité "La théorie du transport optimal de masse", porté par Afaf Bouharguane (IMB, Bordeaux)
Financement obtenu : 5 Keuros
- 2012 - 2014 : membre du projet ANR MEMOVE, porté par Clair Pognard (IMB, Bordeaux) : "Multiscale Electroporation MOdeling Validated by the Experiments".
- 2009 - 2012 : membre du projet ANR CARPEiNTER, porté par Angelo Iollo (IMB, Bordeaux) : "Cartesian grids, penalization and level set for the simulation and optimisation of complex flows"

Participation à des comités de sélection ou jurys de recrutement [20] _____

2024 : Jury CR Inria Bordeaux
 2021 : CNAM Paris, Université Technologique de Compiègne
 2020 : Université de Poitiers, Orsay
 2019 : Jury CR Inria Bordeaux
 2018 : Université de Bordeaux et comité recrutement PRAG, Bordeaux INP
 2017 : Université de Pau et des Pays de l'Adour
 2016 : Université Paris 5, CNAM Paris
 2015 : Ecole Centrale Nantes, ENSEIRB-Matmeca
 2013 : Université Bordeaux 1
 2012 : Université Lille 1, Université Bordeaux 1
 2010 : INSA de Toulouse et Université Toulouse 3
 2009 : INSA de Toulouse et Université Toulouse 3

Jurys de thèse [23] _____

2024 : Benjamin Sulis (Reims), Haibo Liu (Sorbonne Université)
 2023 : Camille Chambon (CNAM Paris), Leila Salomon (Ensta Bretagne), Zheyi Yang (Paris Saclay), Tiffanie Carlier (Bordeaux)
 2022 : Mathias Averseng (Onera Toulouse), Mirco Cialella (Bordeaux), Meriem Zefzouf (Université de Montpellier), Sixtine Michel (Bordeaux)
 2021 : Georis Billo (Aix-Marseille Université)
 2019 : Thibault Xavier (Onera Toulouse), Umberto Bosi (Bordeaux)
 2018 : Alexis Dalmon (IMFT, Toulouse), Pierre-Elliott Becue (Bordeaux), Laurene Hume (Université de Pau et des Pays de l'Adour), Louis Vittoz (Ecole Centrale Nantes)
 2017 : Isabelle Lagrange (Onera Toulouse),
 2016 : Andrea Filippini (Bordeaux)
 2015 : Pierre Bigay (Ecole Centrale Nantes)
 2012 : Marco Cisternino (Politecnico di Torino et Université Bordeaux 1)
 2009 : Gabriele Ottino (Politecnico di Torino et Université Bordeaux 1), Federico Gallizio (Politecnico di Torino et Université Bordeaux 1)

J'ai participé et participe encore à des comités de suivi de thèse à l'Université de Bordeaux ou dans d'autres Universités, au total environ une vingtaine.

Rapports de thèse [7] _____

2024 : Benjamin Sulis (Reims), Haibo Liu (Sorbonne Université)
 2023 : Camille Chambon (CNAM Paris), Leila Salomon (Ensta Bretagne)
 2022 : Meriem Zefzouf (Université de Montpellier)
 2021 : Georis Billo (Aix-Marseille Université)
 2018 : Chiara Stissi (Université de Catane, Italie)

Activité de reviewing et évaluation de dossiers _____

Je suis revieweuse pour différents journaux de mathématiques appliquées, de mécanique des fluides numérique et d'ingénierie bio-médicale : Journal of Computational Physics, Mathematical

Modelling of Natural Phenomena, Nonlinearity, Journal of Computational and Applied Mathematics, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Iranian Journal of Mathematical Sciences and Informatics, Computers in Biology and Medicine, Mathematical Modelling of Natural Phenomena, ...

J'ai évalué des dossiers d'avancement de grade en 2023 et 2024 (promotion hors-classe MCF) et de demande de prime individuelle RIPEC en 2022 et 2023.

Diffusion de la science

Depuis mon arrivée à Bordeaux je me suis très fortement impliquée dans des activités de diffusion de la science, principalement en direction des scolaires et des enseignants.

J'ai co-organisé chaque année entre 2019 et 2023 la semaine MIMM "[Moi Mathématicienne Moi Informaticienne](#)" avec une équipe de collègues mathématiciens et informaticiens. Il s'agit d'une semaine de stage de découverte des formations, de la recherche et des métiers des mathématiques et de l'informatique à destinations d'élèves de 3ème et de 2nde, soutenue financièrement par le programme ACCES de l'Université de Bordeaux, le programme "Les cordées de la réussite", la fondation Blaise Pascal, et l'entreprise Thermofisher. Nous avons reçu en 2022 [le prix "Talents U"](#) de l'Université de Bordeaux pour l'organisation de cette action.

J'ai animé de 2017 à 2019 le groupe IREM "CultureMath", chargé de rédiger des articles de vulgarisation mathématiques pour le site [CultureMath](#). CultureMath est un site expert de l'Education Nationale qui a vocation à présenter des sujets issus de la recherche, des idées importantes des mathématiques et leur histoire, à l'attention des professeurs du second degré et des classes préparatoires, des étudiants et des élèves.

J'ai été de 2014 à 2018 chargée de mission de l'IMB pour les relations avec le secondaire. A ce titre, je coordonnais les différents événements de diffusion scientifique à destination des scolaires et des enseignants du secondaire dans lesquels était impliqué l'Institut de Mathématiques.

Avant la période du covid, je faisais en moyenne entre 5 et 10 exposés par an de diffusion scientifique auprès de collégiens, lycéens, étudiants et enseignants du secondaire dans différents cadres tels que la Fête de la science, la Semaine des Maths, les Labomaths...

J'ai également participé aux événements suivants :

- Mai 2016, Avril 2017, Mars 2018 : organisation avec Chantal Menini d'une journée "[Filles et Maths, une équation lumineuse](#)" à l'Université de Bordeaux. Nous avons accueilli à chaque fois une centaine de jeunes filles.
- Projet "Maths à Modeler" [Paradoxe](#) avec deux classes de 3ème du collège Henri de Navarre à Coutras, Gironde, en 2015-2016. Le but du projet était la création par les élèves d'un sondage sur la violence au collège et l'analyse statistique des résultats.
- Mai 2015 : Participation à l'organisation du "Printemps de la mixité", Université de Bordeaux, une journée destinée à un public lycéen, afin d'améliorer la mixité dans les parcours universitaires
- Marrainage d'une lauréate du Prix de la Vocation Scientifique et Technique des Filles 2010
- 2009, 2014, 2015, 2016, 2018 : Animation d'un stand pour la Fête de la Science
- Coordination en 2007 et 2008 du jeu mathématique en ligne Enigmath (www.enigmath.org)

De ces nombreuses expériences, j'ai retenu que ces activités demandent un vrai investissement en temps, mais en même temps sont très stimulantes, non seulement pour les échanges qu'elles suscitent, mais aussi pour la mise en perspective de nos activités de recherche qu'elles provoquent. Par ailleurs, après avoir expérimenté de nombreux formats, je suis convaincue que les actions comme les stages MIMM sont un moyen particulièrement efficace de convaincre des jeunes femmes de s'orienter vers les mathématiques, en particulier parce qu'elles permettent une imprégnation durable dans le milieu de la recherche en sciences.

4 Enseignement et encadrement

4.1 Activités d'enseignement

J'ai enseigné sous forme de cours/TD/TP et d'encadrement de projets en Licence 1, Licence 2, Licence 3, Master 1 et Master 2, deuxième année de la Prépa des INP, et à l'Enseirb-Matmeca (première, deuxième et troisième année). J'encadre presque chaque année des "Travaux d'Etude et Recherche" ou des "Groupes de Travail Applicatifs" et des stages de la Licence 2 au Master 2.

Les thématiques enseignées concernent majoritairement mais pas exclusivement l'analyse numérique, l'approximation des EDP (éléments finis, volumes finis, différences finies), la programmation pour le calcul scientifique (C++, fortran, scilab, Freefem++). J'ai aussi enseigné des cours/TD d'analyse, d'algèbre linéaire, d'intégration, de probabilités et statistiques et d'EDP. J'ai expérimenté un dispositif de classe inversée dans un cours de master 2 (Eléments Finis Avancés) et dans le cours d'"Integration and differential equations" du parcours International.

Depuis 2013-2014, qui est l'année la plus ancienne accessible sur le site de l'Université de Bordeaux répertoriant les services d'enseignement, j'ai bénéficié de demi-délégations Inria en 2014-2015, 2019-2020 et 2023-2024, la première correspondant à un retour de congé maternité. Les années hors délégation, j'ai effectué un service plein d'enseignant-chercheur, avec en moyenne 35 heures complémentaires chaque année.

Master 2

Eléments Finis Avancés, CM+TP	36h	2019 à 2024	env. 30 étudiants
Méthodes numériques pour la dynamique des populations	17h	2019 à 2022	env. 15 étudiants

Master 1

Approximation des EDP, TD	30h	2019 à 2021	env.10-15 étudiants
Groupe de travail thématique CM et projet	6h + 9h	2019 à 2021	< 10 étudiants

Licence

Outils Mathématiques, L1, CM	24h	2021 à 2024	150 étudiants
Analyse, L2, cours/TD intégré	31h	2020 à 2023	30 étudiants
Groupe de travail applicatif, L3, projet	10h	2020 à 2023	6 étudiants
Programmation avancée pour le calcul scientifique, L3, CM et TP	30h + 30h	2016 à 2019	25 étudiants
Introduction à l'analyse numérique, L2, CM	30h	2015 à 2024	100 étudiants
Introduction à l'analyse numérique, L2, TD	30h	2015 à 2019	25 étudiants
Calcul Scientifique, L3, TD	30h	2007 à 2011	25 étudiants
Initiation au calcul scientifique et symbolique, L2, TD/TP	30h	2007 à 2011	25 étudiants
Approximation numérique, L3, TD	30h	2007 à 2010	25 étudiants
Mathématiques pour physiciens, L1, cours/TD intégré	30h	2007 à 2008	25 étudiants

Licence Internationale, mineure de Mathématiques (cours hybrides en anglais)

Probabilities and Statistics, L2, cours/TD intégré	26h	2020 à 2023	10 étudiants
Linear Algebra, L2, cours/TD intégré	26h	2018 à 2020	10 étudiants
Integration and Differential Equations, L2, cours/TD intégré	26h	2012 à 2024	10 étudiants

Prépa des INP

Intégration, cours	25h	2018 à 2019	85 étudiants
Intégration, TD	53h	2018 à 2019	25 étudiants

ENSEIRB-Matmeca

Eléments Finis Avancés, CM+TP	36h	2019 à 2024	env. 30 étudiants
Programmation Fortran pour le calcul scientifique, TP	20h/40h	2013 à 2020	15 étudiants
Approximation des EDP, TD	30h	2007 à 2008	25 étudiants
Travaux d'Etude et Recherche, projet	16h	2007 à 2018	4-15 étudiants

4.2 Responsabilités pédagogiques

- **Parcours Ingénierie Mathématique : 2021 -**

Depuis 2021 je suis responsable du parcours [Ingénierie Mathématique](#) de la licence de Mathématiques qui comprend le deuxième semestre de la L2 et la L3, ce qui représente environ 70 étudiants. Ce parcours permet une poursuite des études dans des masters variés de mathématiques appliquées et en école d'ingénieurs.

J'ai initié plusieurs changements dans ce parcours : ajout d'une UE de statistiques, d'une remédiation à la programmation, création d'UEs d'"Intégration" et de "Calcul différentiel et Equations différentielles" plus adaptées aux étudiants. Je rencontre régulièrement les étudiants et les enseignants impliqués dans ce parcours afin d'échanger et cerner les éventuelles difficultés. Cette année un deuxième groupe de TD a été créé pour la plupart des UE en raison de l'accroissement du nombre d'étudiants.

- **Bloc Commun de Compétences "Méthodes Numériques" : 2021 -**

Je suis co-responsable du Bloc Commun de Compétences (BCC) "Méthodes Numériques" de la licence de Mathématiques qui a pour objet l'actualisation et l'organisation globale des UE de méthodes numériques.

Dans ce contexte, nous avons obtenu en 2022 un financement du collège Sciences et Technologies pour créer un module de remédiation à la programmation et un tutoriel pour les étudiants de L3 qui y ont des lacunes.

- **Mineure Mathématique du parcours international : 2014 - 2023**

J'ai été responsable de la [mineure Mathématique de la licence internationale](#) de l'Université de Bordeaux, qui offre des cours de mathématiques en anglais pour des étudiants sélectionnés de filières non-mathématiques (par exemple, chimie, physique, informatique). Je suis responsable depuis plusieurs années d'UEs de cette mineure de mathématiques. Il s'agit de cours entièrement en anglais sur un mode hybride distanciel/présentiel. J'ai créé le contenu pédagogique d'un de ces cours (documents de cours, vidéos, forum, wiki).

- **Stages et relations industrielles de la filière MNS du master MAS : 2014 - 2021**

De 2014 à 2021, j'ai été responsable des stages et relations industrielles pour la filière "Modélisation Numérique et Simulation" du Master Mathématiques Appliquées et Statistiques.

4.3 Autres investissements pédagogiques

- **Sensibilisation aux enjeux de la transition environnementale**

Depuis 2022, je m'investis dans l'adaptation des formations aux enjeux environnementaux. J'anime cette thématique au sein de la commission environnement de l'IMB, et participe à plusieurs groupes de travail sur ce sujet (à l'université de Bordeaux ou inter-universités) afin d'avoir une bonne vision de l'état actuel de l'enseignement sur ce sujet. Je participe actuellement à la création de deux UE sur le sujet de la transition environnementale : l'une en L2 ouverte à toutes les licences scientifiques, l'autre en L3 pour la licence de Mathématiques. J'ai encadré en 2023 un stage sur les débouchés des mathématiques en lien avec la transition environnementale. Cette année, dans le cadre d'un projet STEP de l'Université de Bordeaux, je vais encadrer un stage de master pour mesurer l'impact de l'UE de L2 auprès des étudiants.

- **Encadrement d'un stage sur les freins à l'orientation**

De Janvier à Septembre 2021, j'ai encadré avec ma collègue de l'IMB Chantal Menini le stage de M2 d'Elisa Robin-Frandsen, étudiante en psychologie sociale qui a réalisé une [étude](#) sur les freins à l'orientation en mathématiques et informatique chez les étudiantes et les solutions pour y remédier.

- **Journées Emploi Maths à Bordeaux**

J'ai participé à l'organisation de la [Journée Emploi Maths](#) de l'Unité de Formation Mathématiques et Interactions en 2015, 2016 et 2017. Cette journée a pour objectif de réunir localement étudiants en mathématiques (licence, master et doctorat), chercheurs, enseignants-chercheurs, et employeurs de mathématicien.ne.s (stages, CDD, CDI).

- **Echange de services avec le secondaire**

De 2013 à 2018 j'ai participé à l'opération "Echange de services avec le secondaire" organisée par le rectorat de l'académie de Bordeaux. Dans le cadre de cet échange, je suis intervenue dans des classes de terminale S.

- **Financement de projets**

Pour mettre en oeuvre les projets pédagogiques pré-cités, j'ai obtenu des financements auprès de l'association "Maths à Modeler", l'association Blaise Pascal, l'association "Femmes et Maths", le Labex Sysnum, le programme ACCES de l'Université de Bordeaux, les cordées de la réussite et l'entreprise Thermofisher. J'ai participé à trois projets financés par l'AAP du Collège Sciences et Technologies : en tant que porteuse, pour la création d'UEs de remédiation à la programmation et de sensibilisation aux mécanismes environnementaux, et en tant que participante, pour la création de l'UE de L2 sur la transition environnementale.

4.4 Encadrement

Encadrement de thèses et postdoctorats

J'ai dirigé/encadré 5 thèses et 3 postdoctorants, à chaque fois en co-direction ou co-encadrement. Le co-encadrement et la co-direction sont d'un usage très courant dans la communauté de modélisation et calcul scientifique car ils permettent d'associer des connaissances complémentaires.

- Sept 2022 - : Thèse d'Emma Lagracie
"Reconstruction de la séquence d'activation électrique du coeur à partir de mesures non-invasives"
Financée par une bourse de l'école doctorale Mathématiques et Informatique
Co-directrice (50%) avec Y. Coudière (Bordeaux)
- Mars 2022 - Dec 2022 : Postdoctorat de Raul Kazan Cunha
Co-encadrante avec S. Ervedoza
Raul est depuis retourné en postdoctorat au Brésil dans le but d'y obtenir un poste permanent.
- 2020 - 2023 : Thèse de Niami Nasr, Université de Bordeaux
"Méthodes numériques pour la tomographie par impédance électrique dans le cadre de l'électrocardiographie."
Financée par une bourse de l'école doctorale Mathématiques et Informatique
Directrice de thèse, avec pour co-encadrant J. Dardé (IMT Toulouse)
Niami est actuellement ATER à l'Université de Bordeaux
- 2018 - : Thèse d'Oumayma Bouhamama, Université de Bordeaux
"Méthodes numériques pour la résolution du problème inverse en électrocardiographie dans le cas d'anomalies structurelles du tissu cardiaque."
Financée par l'appel à projets interdisciplinaire de l'Université de Bordeaux
Co-directrice (50%) avec L. Bear (IHU Liryc, Bordeaux)
Oumayma a souhaité s'orienter vers l'enseignement une fois sa thèse soutenue.
- 2015 - 2018 : Thèse de Baptiste Lambert, Université de Bordeaux
"Modélisation et simulation de suspensions de particules dans un fluide incompressible"
Financée par une bourse de l'école doctorale Mathématiques et Informatique
Co-directrice (50%) avec M. Bergmann
Actuellement chercheur chez German Aerospace Center (Jena, Allemagne)
- Octobre 2014 - Fev 2016 : Postdoctorat de Marco Cisternino, Université de Bordeaux
"Modélisation numérique de matériaux électrostrictifs"
Financé par un projet inter-Labex de l'Université de Bordeaux
Co-Encadrante (50%) avec A. Iollo
Actuellement ingénieur de recherche à Optimad Engineering, Turin, Italie.

- Oct 2013 - Jan 2015 : Postdoctorat de Francky Luddens, Université de Bordeaux
"Calcul d'une fonction level-set préservant la courbure au cours du temps"
 Financé par Inria
 Co-encadrante (50%) avec M. Bergmann
 Actuellement Maître de Conférences, INSA Rouen.
- 2009 - 2012 : Thèse de Yannick Gorsse, Université de Bordeaux
"Approximation numérique sur maillage cartésien de lois de conservation : écoulements compressibles et élasticité non linéaire"
 Financée par le projet ANR Carpeinter
 Co-encadrante (50%) avec A. Iollo
 Actuellement ingénieur de recherche au CEA, Saclay.

Encadrement de stages

- Février - Août 2024 : Sylvain Fourcade (M2)
- Octobre - Décembre 2023 : Mohamed Ahmane (M1)
- Juin 2023 : Mehdi Yahaoui (L2)
- Avril - Septembre 2022 : Emma Lagracie (M2)
- Janvier - Septembre 2021 : Elisa Robin-Frandsen (M2)
- Mai - Juin 2021 : Félix Dusart (L3)
- Mai - Juin 2020 : Seung Choi (2A prépa intégrée des INP)
- Mars - Septembre 2020 : Niami Nasr (M2)
- Mai - Juin 2019 : Rosalie Cousin (L2)
- Sept - Déc 2018 : Valentin Pannetier (L3)
- Juin - Sept 2017 : Marc Sanjivy (M1) et Julie Pinède (L2)
- Juin - Juillet 2016 : Pierre-Jakez Lebreton (M1) et Jean-Christophe Ricklin (L2)
- Avril - Juillet 2014 : Thi Yen Ngoc Nguyen (M2) et de Vo Duy Trung (M2)
- Juin - Juillet 2014 : Claire Boned (M1)
- Mars - Juillet 2013 : Salahdine Valily (M2)
- Février - Juin 2009 : Yannick Gorsse (M2)

5 Projet d'animation pédagogique et scientifique

Je suis impliquée dans les différents aspects de la vie scientifique et enseignante à l'Université de Bordeaux : responsabilités pédagogiques, participation aux conseils au sein du laboratoire, de l'UF, du département ou du centre Inria, diffusion de la science, ainsi que dans des instances nationales (CNU, SMAI) où je contribue ainsi à la visibilité de l'Université de Bordeaux.

Dans les années à venir, je vais poursuivre cette implication dans le fonctionnement des différentes structures dans lesquelles j'évolue : l'UF Mathématiques et Interactions, le laboratoire de Mathématiques, le centre Inria de l'Université de Bordeaux, et plus largement l'Université de Bordeaux et la communauté mathématique française. Je présente donc ci-après des propositions d'activités. Il s'agit d'un programme sur plusieurs années.

• Responsabilités pédagogiques :

A l'échelle de deux ou trois ans, je souhaite continuer à faire évoluer le parcours de licence d'Ingénierie Mathématique. J'aimerais notamment consolider le contenu des enseignements, continuer à améliorer la visibilité et l'attractivité du parcours et favoriser une dynamique d'implication pédagogique parmi les enseignants qui interviennent dans le parcours.

A plus long terme, je propose de prendre la responsabilité du master MAS (Mathématiques appliquées et Statistiques). Je connais bien la filière "Modélisation numérique et simulation" du master, dont j'ai été pendant plusieurs années responsable des stages. Par ailleurs, je suis particulièrement sensible à l'orientation et aux débouchés professionnels des étudiants, comme le montre ma participation à l'organisation des premières Journées Emploi Maths de l'UF de Mathématiques et Interactions. Dans ce cadre, je pourrai m'attacher à renforcer la liaison entre Licence 3 et master, afin d'attirer davantage d'étudiants vers ce master qui procure d'excellents débouchés, et renforcer le fonctionnement des réseaux d'anciens étudiants.

- **Intégration des enjeux environnementaux et sociétaux :**

La formation aux enjeux environnementaux va devenir obligatoire pour les étudiants de licence. En anticipant cette évolution, j'ai participé à la création d'UEs optionnelles en L2 et L3. Les enjeux de ce type d'enseignement sont complexes, car très différents des enseignements disciplinaires dans lesquels nous intervenons le plus souvent. Ils soulèvent de nombreuses questions de pédagogie. Par ailleurs, les connaissances et les attentes évoluent très vite, en particulier celles des étudiants. Les métiers liés aux mathématiques évolueront aussi dans les prochaines années en fonction de ce contexte. L'université de Bordeaux souhaite devenir une « université des transitions » de référence au cours des prochaines années. Pour attendre cet objectif, il sera nécessaire d'adapter au fur et à mesure les formations, et je suis prête à m'investir dans ce challenge.

- **Animation scientifique :**

Je suis membre depuis 2017 de l'équipe-projet Inria Carmen, dédiée à la modélisation et la simulation pour l'électrophysiologie cardiaque. Mon collègue Yves Coudière, professeur à l'Université de Bordeaux, est responsable de cette équipe depuis 2012. Il souhaiterait qu'une autre personne prenne à moyen terme la responsabilité de l'équipe. Je connais bien l'équipe Carmen, et le contexte général du centre Inria de l'Université de Bordeaux, et pourrai prendre sa relève lorsqu'il décidera de quitter cette responsabilité.

De même, je compte m'impliquer dans l'animation de la vie scientifique de l'Institut de Mathématiques de Bordeaux. Par exemple, ce pourrait être en prenant la responsabilité de l'équipe "Calcul Scientifique et Modélisation", ou bien en m'impliquant dans l'équipe de direction du laboratoire.

6 Activités de recherche

Mes sujets de recherche se situent dans les domaines de la modélisation, de l'analyse numérique et du calcul scientifique. Je m'intéresse particulièrement au développement de méthodes numériques pour des problèmes directs ou inverses, avec des applications variées : mécanique des fluides compressible et incompressible, interactions avec des solides, écoulements côtiers, cellules biologiques, électrophysiologie cardiaque. Je distingue globalement quatre sujets d'étude, que je détaille dans la suite de cette section.

6.1 Résolution de problèmes inverses pour l'électrophysiologie cardiaque

Mots-clés : Résolution numérique de problèmes inverses, électrocardiographie, reconstruction de potentiels électriques sur le coeur

Collaborations : Laura Bear (IHU Liryc), Oumayma Bouhamama (IMB, Bordeaux), Yves Coudière (IMB, Bordeaux), Jérémie Dardé (IMT, Toulouse), Jérôme Fehrenbach (IMT, Toulouse), Niami Nasr (IMB, Bordeaux).

J'ai initié fin 2017 un changement thématique pour m'orienter vers la résolution de problèmes inverses en lien avec l'électrophysiologie cardiaque, et plus précisément avec la reconstruction de l'activité électrique du coeur :

- **l'imagerie électrocardiographique (ECGi pour ElectroCardioGraphic Imaging)** pour caractériser l'activité électrique du coeur de manière non-invasive,
- **la tomographie par impédance électrique (TIE)** pour obtenir des informations complémentaires (conductivités, géométries, mouvements) dans le volume du torse.

L'ECGi est une technologie d'imagerie prometteuse pour caractériser l'activité électrique cardiaque de manière non-invasive mais plus précise que l'électrocardiogramme classique à 12 électrodes. Elle consiste à reconstruire l'activité électrique du coeur à partir de séries denses en espace de mesures électriques sur le torse, couplées avec une reconstruction de la géométrie du torse du patient par IRM ou scanner, en résolvant un problème inverse dans le volume compris entre le torse et le coeur, voir la Figure 1. Ce problème est représenté mathématiquement par un problème de Cauchy pour l'équation de Laplace, qui est notoirement mal-posé et donc très instable numériquement :

$$\begin{cases} \operatorname{div}(\sigma \nabla u) = 0 \text{ dans le volume du torse,} \\ u = u_T \text{ et } \sigma \nabla u \cdot n = 0 \text{ sur la surface du torse,} \\ u = ? \text{ sur la surface du coeur,} \end{cases} \quad (1)$$

avec u le potentiel électrique et σ la conductivité dans le volume du torse. L'approche classique pour le résoudre consiste à minimiser au sens des moindres carrés une fonctionnelle comportant un terme d'adhérence aux données mesurées et un terme de régularisation de forme variable [16].

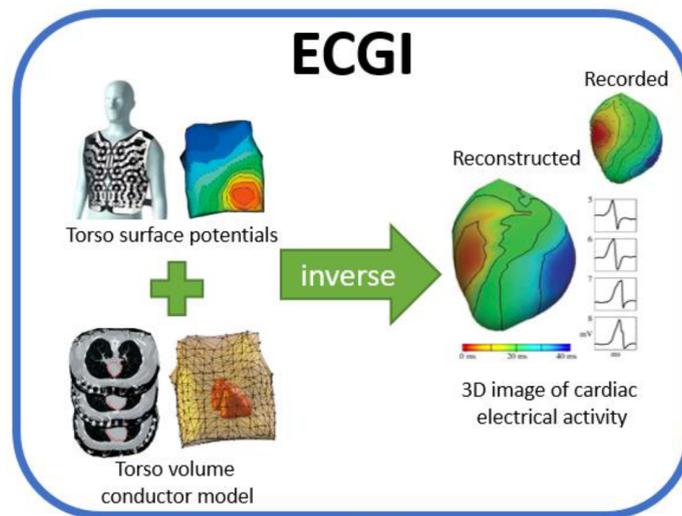


FIGURE 1 – Principe schématisé de l'ECGi, image fournie par Laura Bear.

Lors d'études expérimentales in-vivo, l'ECGi peut reconstruire correctement des motifs d'activation électrique réguliers mais échoue dans le cas de motifs plus complexes, par exemple pour des coeurs présentant des hétérogénéités des tissus [11], ou dans le cas du rythme sinusal, qui est le rythme cardiaque le plus fréquent. **Etant donné ce constat, le but général de mon activité de recherche sur ce sujet est d'améliorer la qualité des reconstructions de l'ECGi**, à travers les approches détaillées ci-dessous.

• **Résolution numérique du problème inverse :**

Dans le cadre de la thèse d'O. Bouhamama, et en collaboration avec Laura Bear de l'IHU, nous avons développé une nouvelle méthode pour l'ECGi, la méthode "Patchwork" qui sélectionne localement, parmi plusieurs solutions numériques disponibles, celle qui minimise l'écart par rapport aux mesures sur le torse [4, 5]. Cette nouvelle méthode a été comparée aux méthodes

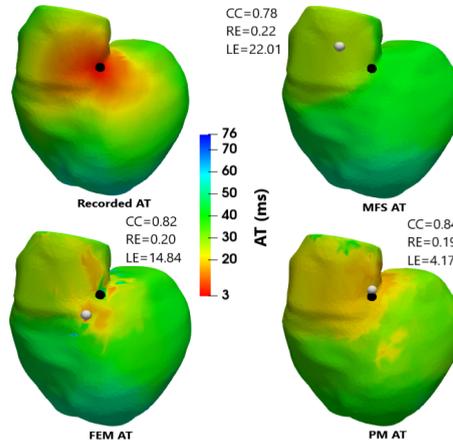


FIGURE 2 – Temps d’activation (AT) simulés et reconstruits avec la méthode Patchwork, la méthode des solutions fondamentales et la méthode des éléments finis, et localisation des sites de stimulation exacts (en noir) et reconstruits (en blanc).

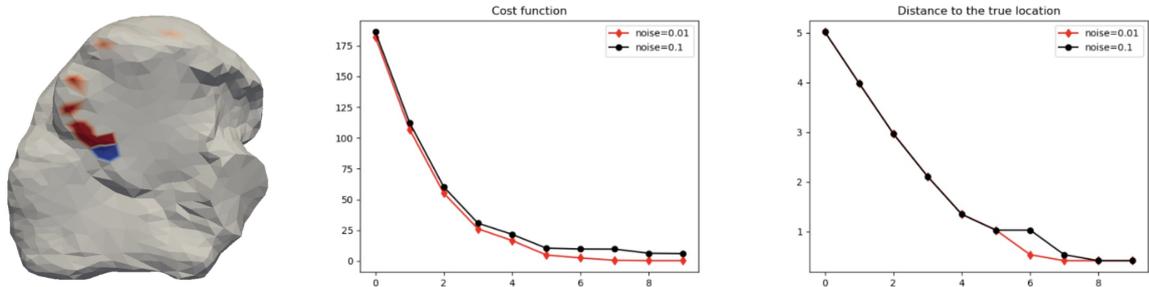


FIGURE 3 – Identification itérative de la source de l’activation électrique modélisée par une équation eikonale : visualisation sur la surface du coeur, évolution de la fonction coût et de la distance à la position exacte.

classiques pour des données issues de simulation ainsi que des données expérimentales ex-vivo. Les résultats montrent qu’elle est systématiquement plus précise et reconstruit mieux certains traits physiologiquement significatifs tels que les points de sortie du front de propagation électrique, voir la Figure 2.

- **Couplage avec un modèle d’activation électrique sur le coeur :**

Les reconstructions classiques de l’ECGi se font à chaque instant indépendamment, sans prendre en compte la temporalité entre un instant et le suivant. Coupler la résolution de l’ECGi avec un modèle de propagation du potentiel électrique à la surface du coeur permet de rajouter cette information temporelle. Dans cette optique, avec Jérôme Fehrenbach [15], nous avons étudié le problème inverse de l’ECGi en ajoutant l’hypothèse que les signaux électriques se propagent à la surface du coeur comme des ondes progressives, l’avancée du front pouvant être décrite en première approximation par une équation eikonale, voir la Figure 3. Avec cette hypothèse, les inconnues (les instants d’arrivée du front) sont déterminées par une condition initiale et une vitesse de propagation en chaque point de la surface, au lieu de constituer des inconnues indépendantes pour chaque point de la surface. De plus la description de la propagation du front par une équation eikonale présente l’avantage de fournir directement des données significatives d’un point de vue physiologique, comme les localisations des points de sortie du front de propagation du potentiel électrique et les temps de sortie correspondants.

- **Ajout d’informations sur les propriétés du volume du torse :**

Lors d’expériences ex-vivo dans des torsos artificiels, où le coeur est immergé dans une solution homogène, l’ECGi donne des reconstructions satisfaisantes de l’activité cardiaque [2].

Cela suggère que, parmi les sources possibles du manque de précision de l’ECGi figurent des carences de modélisation comme l’absence de prise en compte des hétérogénéités de conductivités dans le torse, des mouvements des organes internes et de la déformation du torse sous l’effet de la respiration. **Améliorer la modélisation et la description du problème direct dans le cas in-vivo, et de manière personnalisée, pourrait de ce fait améliorer la qualité des reconstructions de l’ECGi.** Pour cela, j’étudie actuellement la tomographie par impédance électrique (TIE) [23], qui est une technique non-invasive de reconstruction de conductivités à partir de mesures électriques à la surface du corps. Ce sujet est détaillé dans mon projet de recherche dans la section 7.1.

6.2 Ecoulements géophysiques : conditions aux limites génératrices

Mots-clés : Equations dispersives, modèle de Boussinesq, couche limite dispersive, flux non-local, conditions aux limites numériques

Collaboration : David Lannes (IMB, Bordeaux)

Les équations de Saint-Venant non-linéaire font partie des modèles les plus utilisés pour décrire l’évolution de vagues à la surface d’un fluide en eaux peu profondes. Elles peuvent s’écrire sous la forme

$$\begin{cases} \partial_t \zeta + \partial_x q = 0, \\ \partial_t q + \partial_x \left(\frac{1}{2} g h^2 + \frac{1}{h} q^2 \right) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

avec ζ l’élévation de la surface et q la décharge horizontale ou intégrale verticale de la vitesse horizontale, $h = H_0 + \zeta$ la profondeur totale de l’eau (H_0 étant la profondeur au repos) et g l’accélération de la pesanteur.

Pour de nombreuses applications, l’élévation de la surface est connue à l’entrée du domaine de simulation

$$\zeta(t, x = 0) = f(t), \quad \text{pour tout } t \geq 0, \quad (3)$$

ainsi que les valeurs initiales de q et ζ dans le domaine,

$$(\zeta, q)(t = 0, x) = (\zeta^0, q^0)(x), \quad \text{pour tout } x \geq 0; \quad (4)$$

ce type de condition aux limites est souvent appelé condition aux limites génératrice. Le problème consistant à résoudre (2) assorti de (3) et (4) est un problème hyperbolique, il peut être résolu numériquement en utilisant la décomposition de la solution en invariants de Riemann.

Les équations de Saint-Venant non-linéaires fournissent une approximation des équations d’Euler à surface libre avec une précision $O(\mu)$, avec $\mu = H_0^2/L^2$ le paramètre de faible profondeur [14, 19] (L représentant l’échelle horizontale typique des vagues). Elles négligent cependant les effets dispersifs qui jouent un rôle important dans les zones côtières. Les modèles de Boussinesq, parmi lesquels le modèle de Boussinesq-Abbott [1] :

$$\begin{cases} \partial_t \zeta + \partial_x q = 0, \\ \left(1 - \frac{H_0^2}{3} \partial_x^2\right) \partial_t q + \partial_x \left(\frac{1}{2} g h^2 + \frac{1}{h} q^2 \right) = 0, \quad (h = H_0 + \zeta) \end{cases} \quad (5)$$

sont les modèles les plus simples qui prennent en compte ces effets, en gardant les termes en $O(\mu^2)$ dans l’approximation des équations d’Euler.

Le système (3)-(5) n’est plus hyperbolique, ce qui complique le traitement de conditions aux limites génératrices. Des travaux ont été menés ces dernières années pour traiter numériquement ce problème de conditions aux limites [17] [25], mais au prix d’une augmentation significative soit de la taille du domaine de calcul, soit du temps de calcul lui-même.

Nous avons proposé une nouvelle approche pour traiter (3)-(5), très facile à implémenter et **qui n’occasionne aucune augmentation de la taille du domaine ou du temps de calcul** [21]. Cette approche est basée sur une reformulation du problème comme un système de lois de conservation non-homogène pour ζ et q avec un flux non-local et avec un

terme source prenant en compte la couche limite dispersive :

$$\begin{cases} \partial_t \zeta + \partial_x q = 0, \\ \partial_t q + \partial_x R_1 \left(\frac{1}{2} g (h^2 - H_0^2) + \frac{1}{h} q^2 \right) = \underline{\mathcal{Q}}(q, f, \ddot{f}, \zeta, q) \exp \left(-\sqrt{3} \frac{x}{H_0} \right), \end{cases} \quad (6)$$

avec \underline{q} la trace de q en $x = 0$, $\underline{\mathcal{Q}}$ exprimé en fonction des valeurs de \underline{q} , f , \ddot{f} , ζ et q grâce à une conversion de dérivées spatiales en dérivées temporelles. Le nouveau schéma basé sur cette approche a été validé sur plusieurs tests faisant intervenir des effets non-linéaires et dispersifs, voir par exemple la Figure 4.

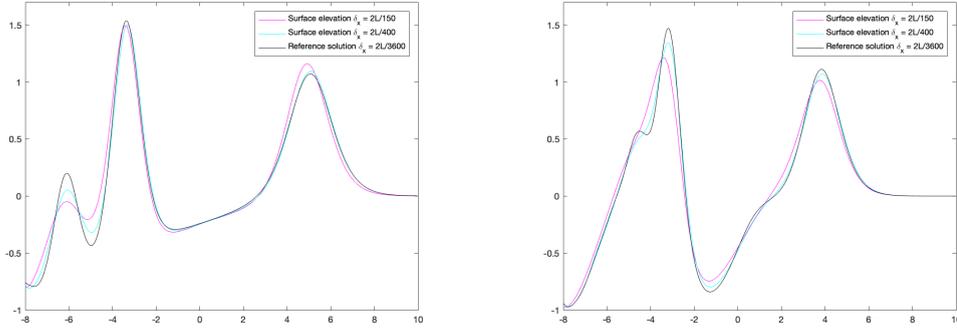


FIGURE 4 – Condition aux limites génératrice sinusoidale : comparaison entre une solution de référence et les résultats numériques pour ζ imposé dans un petit domaine, au temps $T_f = 15$, $\delta_x = 2L/150, 2L/400, 2L/3600$ avec $L = 10$, gauche : $\mu = \varepsilon = 0.3$, droite : $\mu = \varepsilon = 0.1$.

6.3 Méthodes de frontières immergées sur grilles cartésiennes

Mots clés : Modélisation, analyse numérique, calcul parallèle, level-set, discrétisation adaptée près des interfaces, applications à la mécanique des fluides et à des phénomènes électriques

Collaborations : Angelo Iollo (IMB, Bordeaux) Yannick Gorsse (IMB, Bordeaux), Haysam Telib (Optimad Engineering, Turin), Marco Cisternino (IMB, Bordeaux), Clair Poignard (IMB, Bordeaux), Otared Kavian (Versailles), Michael Leguebe (IMB, Bordeaux), Michel Bergmann (IMB, Bordeaux), Baptiste Lambert (IMB, Bordeaux)

Jusqu'en 2017, mon sujet de recherche principal a été le développement de schémas numériques sur grilles cartésiennes, pour simuler des problèmes modélisés par des équations aux dérivées partielles, avec des termes de type transport et/ou diffusion, issus de la mécanique des fluides et de la biologie. Ces problèmes avaient pour point commun d'être formulés dans des géométries complexes : avec des interfaces ou frontières de forme quelconque, comme par exemple l'interface entre un fluide et un solide ou entre une cellule biologique et le milieu extérieur.

La discrétisation sur grille cartésienne présente l'avantage d'autoriser une parallélisation aisée et l'utilisation de bibliothèques de calcul efficaces. Les frontières ou interfaces sont représentées implicitement par l'isoligne zéro de fonctions level-set, ce qui permet de traiter naturellement de fortes déformations comme des changements de topologie. Par contre, les géométries considérées ne coïncident pas forcément avec la discrétisation sur grilles cartésiennes. Or il est nécessaire de prendre en compte les conditions aux limites ou les conditions de couplage imposées par les modèles physiques sur les frontières de ces géométries, sans quoi des problèmes de stabilité ou de perte de précision apparaissent.

Le but de mes travaux était donc de concevoir des méthodes numériques qui tiennent compte de ces conditions aux limites ou de couplage, afin de maintenir près de ces frontières ou interfaces une précision suffisante. En pratique, nous avons la plupart du temps cherché à obtenir une précision d'ordre deux, qui était pour les applications considérées un bon

compromis entre précision et complexité des schémas. Les schémas ainsi développés ont été implémentés en 2D et/ou en 3D et parfois en parallèle en utilisant la librairie de calcul parallèle PETSc.

Mes travaux sur cette thématique concernent :

- **des applications en mécanique des fluides (problèmes hyperboliques, paraboliques)** : écoulements compressibles en présence d'obstacles solides, écoulements incompressibles bifluides de type eau-air, calcul d'une fonction level-set préservant la précision de la courbure au cours du temps, modélisation et simulation de suspensions de particules,
- **et des applications faisant intervenir des phénomènes électriques (problèmes elliptiques)** : électroporation de cellules biologiques et matériaux électrostrictifs.

Suivant le type d'équations considéré, les stratégies de discrétisation sont différentes. En effet l'influence de l'erreur locale d'approximation sur le résultat est qualitativement différente :

- **Pour les problèmes elliptiques** il y a dans une certaine mesure compensation d'une erreur d'approximation plus grossière si celle-ci est pratiquée seulement tout autour de l'interface ou de la frontière.

Par exemple, **pour les problèmes elliptiques avec une interface immergée** [7, 13, 22], qui interviennent dans la modélisation de l'électroporation de cellules biologiques et dans la résolution de la pression pour des écoulements bifluides, on utilise des inconnues supplémentaires sur l'interface, qui permettent de discrétiser les flux au travers de cette interface. On obtient ainsi une erreur de troncature d'ordre un pour l'opérateur elliptique près de l'interface et d'ordre deux pour les flux. Cette approximation moins précise est compensée par celle d'ordre deux dans tout le reste du domaine, et on obtient donc de l'ordre deux en norme L^∞ dans tout le domaine.

- **Dans le cas des problèmes de transport**, l'erreur se propage le long des caractéristiques, ce qui la rend plus difficile à contrôler et requiert souvent de décentrer les schémas pour utiliser une information provenant de la bonne direction.

Par exemple, **dans le cas des équations d'Euler compressibles** [12], nous avons utilisé des états fictifs prenant en compte la condition de non-glissement à l'ordre deux, et en utilisant parfois une extrapolation décentrée "upwind" pour tenir compte de la physique de l'écoulement, voir la Figure 5 pour des résultats obtenus avec cette méthode dans le cas d'un écoulement transonique autour d'un profil d'aile d'avion NACA0012.

Pour la procédure de ré-initialisation de la fonction level-set qui décrit l'interface [3], nous avons utilisé un schéma d'ordre trois décentré près de l'isoligne zéro, afin de respecter le sens de propagation de l'information, et seulement quand la déformation devient trop forte. Nous sommes ainsi parvenu à obtenir une convergence à l'ordre trois nécessaire pour calculer une quantité telle que la courbure à l'interface, ce que ne parviennent pas à faire les schémas numériques usuels.

Je me suis intéressée à **la convergence théorique des méthodes de différences finies pour des problèmes elliptiques avec des interfaces immergées**. La plupart des études dans la littérature analysent ces méthodes en utilisant le formalisme des éléments finis ou des volumes finis, ce qui n'est pas très commode car cela implique de les reformuler complètement. J'ai développé des techniques d'étude de convergence pour ce type de méthodes, qui utilisent le formalisme des différences finies et permettent d'obtenir des estimations précises des coefficients de la matrice à inverser, en utilisant des fonctions de Green discrètes et un principe du maximum discret. Ces estimations permettent d'expliquer les effets d'erreurs d'approximation différentes dans différentes zones et leur compensation éventuelle. Ces effets mènent parfois à un phénomène de superconvergence, c'est-à-dire que le schéma numérique converge à un ordre plus élevé que celui attendu. Par exemple, dans le cas du schéma de Shortley-Weller qui est un schéma classique de résolution d'un problème elliptique dans un domaine de forme quelconque discrétisé sur grille cartésienne, la convergence est d'ordre deux à pour la solution et son gradient, malgré une erreur de troncature d'ordre un sur la frontière [26].

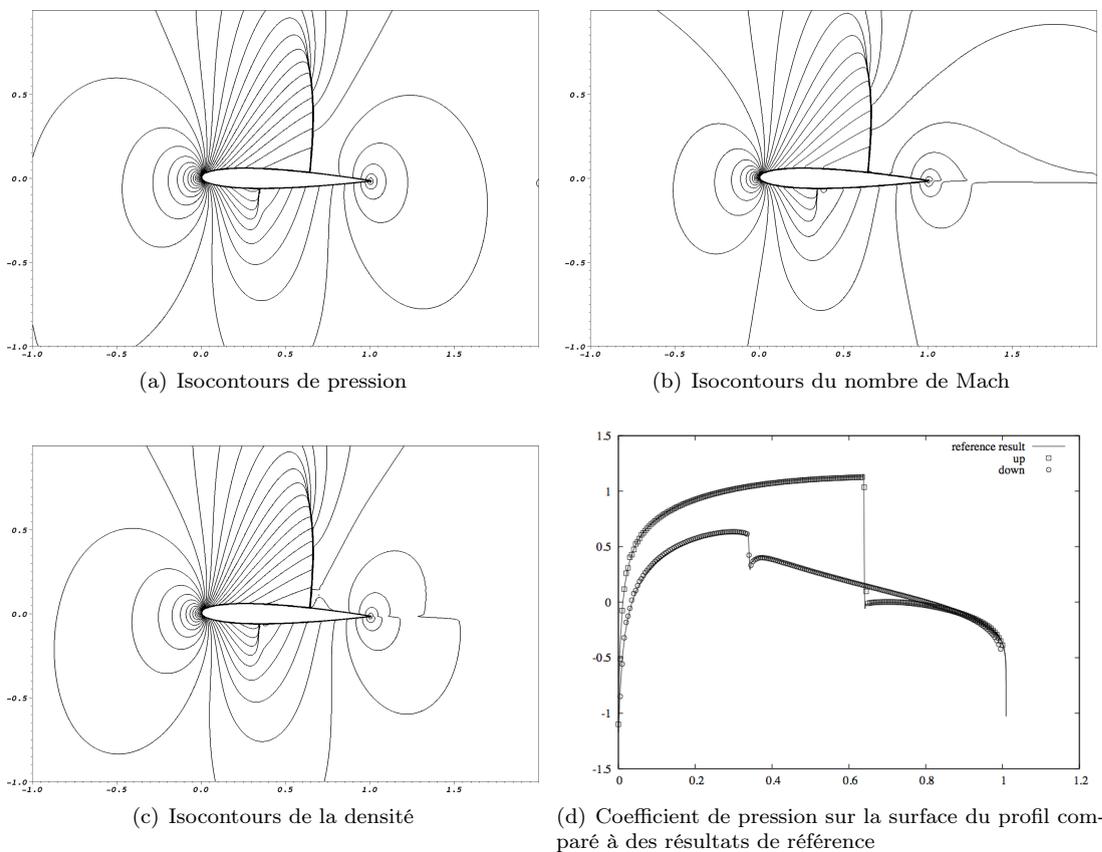


FIGURE 5 – Écoulement compressible non-visqueux autour d'un profil de NACA0012.

6.4 Méthodes particulières avec remaillage

Mots clés : Analyse numérique, calcul scientifique, transport lagrangien, écoulements compressibles, transport optimal

Collaborations : Georges-Henri Cottet et Adrien Magni (LJK, Grenoble), Angelo Iollo et Afaf Bouharguane (IMB, Bordeaux)

J'ai travaillé pendant mon doctorat et les premières années à Bordeaux sur des méthodes numériques pour résoudre des écoulements compressibles bifluïdes sujets à des instabilités hydrodynamiques telles que rencontrées dans les processus de fusion nucléaire. Ces écoulements sont décrits par les équations d'Euler compressibles. Les méthodes étudiées étaient des méthodes particulières : c'est à dire où les quantités conservatives telles que la masse, la quantité de mouvement ou l'énergie totale sont discrétisées sur des points, les particules, qui se déplacent de manière lagrangienne, à la vitesse de l'écoulement. Pour éviter que la distribution spatiale des particules ne devienne trop irrégulière, un remaillage, c'est à dire une interpolation conservative des valeurs portées par les particules, est effectué régulièrement. Les méthodes particulières présentent l'avantage de bien traiter les écoulements avec de fortes déformations, car la condition de stabilité sur le transport, qui revient à imposer que les trajectoires des particules ne se croisent pas, est beaucoup moins restrictive que celle de méthodes plus classiques où le déplacement n'est pas traité de manière lagrangienne.

Avec Adrien Magni, nous avons notamment montré que pour une loi de conservation scalaire non-linéaire, les méthodes particulières avec remaillage TVD (Total Variation Diminishing) convergeaient bien vers l'unique solution entropique de la loi de conservation [27]. Cette preuve est à ma connaissance, la seule de la littérature pour des méthodes particulières avec remaillage appliquées à des lois de conservation scalaires non-linéaires.

Ces travaux ont trouvé une autre application quand avec Afaf Bouharguane et Angelo Iollo

nous avons développé une méthode itérative basée sur une linéarisation pour résoudre un problème de transport optimal [6]. La résolution numérique de ce problème faisait appel à une méthode particulière pour résoudre les itérations successives de transport, avec l'avantage de ne pas nécessiter de remaillage tant que les trajectoires des particules ne se croisaient pas, ce qui limite beaucoup la diffusion numérique par rapport à des schémas numériques traitant le transport de manière eulérienne. Un des avantages de cette méthode est son faible temps de calcul comparatif dans le cas d'un transport entre deux densités assez proches, ce qui rend cette méthode attrayante par exemple dans le cas de traitement d'images.

6.5 Développement de programmes informatiques pour le calcul scientifique

- **Méthodes particulières avec remaillage**
 - Développement et validation d'un code Fortran 2D multifluide avec raffinement de grilles adaptatif (≈ 3000 lignes), utilisé pour simuler la formation d'instabilités hydrodynamiques.
 - Implémentation dans un code Fortran 3D (incompressible, ≈ 5000 lignes) de modèles sous-maillages implicites, simulation d'un vortex de Taylor-Green et de l'expérience de Comte-Bellot-Corrsin.
 - Développement et validation d'un code Fortran 3D multifluide (≈ 1500 lignes) avec utilisation de limiteurs TVD pour le remaillage, utilisé pour un cas-test astrophysique (formation de l'instabilité de Kelvin-Helmholtz).
- **Méthodes de frontières immergées pour des écoulements compressibles (thèse de Yannick Gorsse)**
 - Développement d'un code Fortran 2D et 3D (≈ 2500 lignes) séquentiels
 - Code Fortran 3D parallèle (≈ 7000 lignes) développé avec la bibliothèque PETSc.
- **Méthodes cartésiennes pour des problèmes elliptiques avec interfaces immergées**
 - Développement et validation d'un code Fortran 2D (≈ 2000 lignes) et 3D (≈ 2000 lignes) séquentiels.
 - Développement et validation d'un code 2D (≈ 5000 lignes) et 3D (≈ 5000 lignes) parallèles, avec la bibliothèque PETSc (thèse de Marco Cisternino, dans laquelle j'ai été fortement impliquée)
- **Simulation de l'électroperméabilisation de cellules biologiques**
Développement et validation d'un code Fortran 2D instationnaire (≈ 2000 lignes)
- **Simulation d'écoulements bifluides incompressibles**
Développement à partir d'une version Fortran 2D du code "NasCar" développé par Michel Bergmann (IMB, Bordeaux) (≈ 2000 lignes de code ajoutées)
- **Outils pour le calcul de l'évolution d'une fonction level-set (postdoctorat de Francky Luddens)**
Développement et validation d'un code Fortran 2D (≈ 5000 lignes)
- **Simulation de suspensions (thèse de Baptiste Lambert)**
Développement dans le code C++ "NasCar" de M. Bergmann, en 3D parallèle
- **Tomographie par impédance électrique**

- Développement et validation d'un code Fortran 2D (\approx 2000 lignes)
- Développement d'un code C++ 2D séquentiel (thèse de Niami Nasr)
- Développement d'un code C++ 2D parallèle (thèse de Niami Nasr)
- **Imagerie électrocardiographique**
 - Développement et validation d'un code matlab 3D : résolution de l'ECGi avec une méthode d'éléments finis
 - Développement d'un code python 3D en éléments finis pour le problème inverse ECGi avec une équation eikonale
 - Développement d'un code python 2D pour la résolution du modèle bidomaine avec des volumes finis DDFV (thèse d'Emma Lagracie)

7 Projet de recherche

Mon projet de recherche concerne le développement des directions scientifiques des sections 6.1 et 6.2 : la résolution du problème inverse électrocardiographique, et l'étude de conditions aux limites génératrices ou de couplage pour des écoulements côtiers, en lien avec les équipes CSM et EDP de l'Institut de Mathématique de Bordeaux, le centre Inria de l'Université de Bordeaux et l'IHU-Liryc.

7.1 Problème inverse électrocardiographique (ECGi)

- **Couplage de la résolution de l'ECGi avec un modèle sur la surface du coeur**

Mots clés : problème inverse, équation eikonale, assimilation de données variationnelle

Collaborations : Yves Bourgault (Ottawa), Yves Coudière (IMB, Bordeaux), Jérôme Fehrenbach (IMT, Toulouse), Emma Lagracie (IMB, Bordeaux)

Avec Jérôme Fehrenbach, nous avons étudié le couplage du problème de l'ECGi avec un modèle simple pour la propagation des signaux électriques sur la surface du coeur : une équation eikonale. Nous souhaitons poursuivre la validation de notre approche en l'appliquant à des signaux produits avec un modèle plus réaliste d'activation électrique : le modèle bidomaine, et en tenant compte de l'orientation et de la structure anisotrope des fibres cardiaques.

Avec Yves Coudière, nous encadrons depuis Septembre 2022 la thèse d'Emma Lagracie, qui porte sur la reconstruction de la séquence d'activation électrique du coeur à partir de mesures non-invasives, et plus particulièrement, sur l'étude de la manière dont le signal d'activation sur le coeur peut se modéliser et se propager sur la surface du torse. En collaboration avec Yves Bourgault, nous avons développé un modèle surfacique moyenné des potentiels électriques du coeur. Ce modèle relie à chaque instant le potentiel transmembranaire sur le coeur au potentiel à la surface du torse. Il est bien posé et permet de résoudre le problème inverse de l'ECGi en tenant compte de l'intérieur du coeur, avec un coût numérique réduit. De plus, il permet de reconstruire une quantité, le potentiel transmembranaire, peu utilisée dans la littérature mais qui semble particulièrement utile pour le calcul des temps d'activation. Dans la suite, nous souhaitons étendre ce modèle à des géométries réalistes en 3D et étudier de nouvelles méthodes pour calculer les temps d'activation.

- **Tomographie par Impédance Electrique (TIE)**

Mots clés : développement et analyse de méthodes de frontières immergées, problème inverse, calcul scientifique, techniques d'inférence Bayésienne, comparaison à des données expérimentales

Collaborations : Laura Bear (IHU Liryc, Bordeaux), Marc Dambrine (LMAP, Pau), Jérôme Dardé (IMT, Toulouse), Agnès Lagnoux (IMT, Toulouse), Jing-Rebecca Li (Inria Paris Saclay), Niami Nasr (IMB, Bordeaux), Charles Pierre (LMAP, Pau), Bénédicte Puig (LMAP, Pau).

La tomographie par impédance électrique (TIE) [23] est une technique non-invasive de reconstruction de conductivités à partir de mesures électriques à la surface du corps : un (faible) courant alternatif est injecté au travers d'électrodes et le potentiel électrique qui en résulte est mesuré sur ces mêmes électrodes. ECGi et TIE utilisent donc des dispositifs expérimentaux proches, mais ne sont pourtant pas actuellement utilisés conjointement. Le problème direct de la TIE consiste à calculer le potentiel électrique dans le domaine en fonction du courant injecté et de la distribution des conductivités dans le domaine :

$$\begin{cases} \operatorname{div}(\sigma \nabla u) = 0 \text{ dans le volume du torse,} \\ \sigma \nabla u \cdot n = 0 \text{ sur la surface du torse,} \\ u + z_m \sigma \nabla u \cdot n = U_m \text{ sur chaque électrode,} \\ \int_{E_m} \sigma \nabla u \cdot n dS = I_m \text{ pour chaque électrode,} \end{cases} \quad (7)$$

avec I_m le courant électrique injecté dans l'électrode E_m , U_m le voltage mesuré et z_m l'impédance de contact de l'électrode E_m .

Le problème inverse consiste à **estimer les conductivités, ou les variations temporelles de ces conductivités, à partir des mesures électriques à la surface du corps**. Des études récentes reconstruisent à la fois la géométrie et les conductivités, sans réduire pour autant la qualité de la reconstruction [9].

Dans le cadre de la thèse de Niami Nasr, co-encadrée avec Jérémie Dardé (Toulouse), nous avons développé des méthodes numériques de frontières immergées sur grille cartésienne, inspirées de mes travaux précédents [7], pour résoudre le problème direct de la TIE, puis le problème inverse qui lui est associé. **Les estimations des conductivités ainsi obtenues, ou éventuellement les informations sur la localisation et/ou le mouvement des organes dérivant des variations temporelles des conductivités, seront utilisées pour améliorer la résolution du problème inverse de l'ECGi**. L'utilisation de grilles cartésiennes plutôt que de maillages non-structurés a pour avantage de prendre en compte facilement les géométries mobiles, par exemple en cas d'incertitudes géométriques ou de mouvement des organes.

Actuellement, la méthode numérique pour le problème direct a été développée et validée en 2D. On observe numériquement une convergence à l'ordre 1 en norme L^∞ pour la solution et son gradient. On peut montrer avec les techniques d'estimations des coefficients de la matrice inverse évoquées dans la section 6.3 que la solution numérique avec la méthode ainsi développée converge à l'ordre un en norme L^∞ . Nous aimerions adapter ces techniques pour démontrer aussi la convergence du gradient à l'ordre un. L'approche de résolution du problème inverse initialement choisie consiste à résoudre le problème de minimisation par moindres carrés suivant par une descente de gradient classique :

$$F(\sigma) = \frac{1}{2} \|U(I_{input}, \sigma) - U_{meas}\|_{\mathbb{R}^M}^2 + \frac{\varepsilon}{2} \|\sigma - \sigma_*\|_{H^1(\Omega)}^2.$$

U_{meas} représentant les données mesurées, I_{input} les courants injectés et σ_* une conductivité de référence. Des résultats de reconstruction de conductivités sont présentés sur la figure 6. Les reconstructions sont de qualité similaire à celles des méthodes classiques d'éléments finis sur maillage adapté. Nous travaillons actuellement sur la **reconstruction simultanée de la géométrie et des conductivités** en nous inspirant des méthodes de [9].

L'étape suivante est de programmer cette méthode en 3D, ce qui nécessite de faire appel à des techniques de calcul parallèle. Dans ce contexte, il sera probablement nécessaire de chercher à optimiser le temps de résolution des systèmes linéaires, étant donné que la matrice considérée est non-symétrique, creuse, et que pour le traitement du problème inverse de nombreuses résolutions successives sont nécessaires avec de petites variations de conductivité d'une étape à l'autre.

Pour obtenir des reconstructions plus précises, il est nécessaire de contraindre la résolution du problème inverse en ajoutant des connaissances sur les propriétés des solutions recherchées. Avec Jing-Rebecca Li (Inria Paris Saclay) nous souhaitons résoudre le problème inverse de la TIE en utilisant des **techniques d'inférence bayésienne**. La formulation bayésienne permet d'incorporer des informations a priori sur les paramètres à estimer, par exemple des

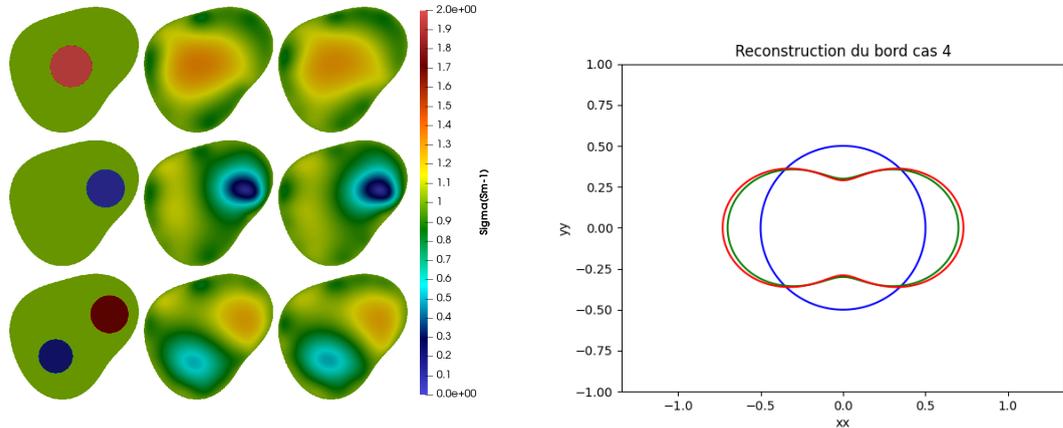


FIGURE 6 – Gauche : reconstructions de conductivités : gauche : référence, milieu : reconstruction sans bruit ($\delta = 0$), droite : reconstruction avec bruit ($\delta = 2.0\%$) droite : reconstruction itérative de formes avec 8 électrodes : géométrie initiale en bleu, géométrie désirée en rouge, géométrie reconstruite en vert

géométries d'organes dans le torse obtenues par des IRM ou des scanners, ou des valeurs typiques des conductivités, puis de calculer les estimations de ces paramètres. Utiliser cette formulation permettrait de traiter de manière unifiée les incertitudes introduites par des données incomplètes et bruitées ainsi que par les paramètres inconnus intervenant dans la modélisation. Le résultat obtenu est une distribution a posteriori des quantités d'intérêt au lieu d'estimations uniques. Dans le cas où les différentes solutions possibles diffèrent beaucoup les unes des autres, cette distribution a posteriori pourrait aider à analyser quelles informations manquent pour pouvoir sélectionner ou éliminer certaines de ces solutions possibles du problème inverse.

Par ailleurs, j'ai initié très récemment une collaboration avec Marc Dambrine, Charles Pierre et Bénédicte Puig, de l'Université de Pau, dans le cadre d'un projet Recherche de la Région Nouvelle Aquitaine. Il s'agit d'une part de développer des méthodes plus sophistiquées et efficaces pour la résolution du problème inverse de la TIE, d'autre part d'ajouter un modèle de bruit dans la résolution du problème inverse afin de le rendre plus robuste [8].

Enfin, depuis l'encadrement de la thèse d'O. Bouhamama, je collabore avec Laura Bear, chercheuse en traitement du signal à l'IHU Liryc sur la thématique de l'ECGi. Nous souhaitons étendre notre collaboration sur le sujet de la TIE. Dans le cadre du projet Région Nouvelle Aquitaine, nous avons obtenu un financement pour l'achat **d'un dispositif expérimental d'électrodes actives pour la TIE**. Laura développe actuellement le couplage de ce dispositif avec ceux qu'elle utilise habituellement pour l'ECGi. Dans un premier temps elle souhaite coupler la TIE au dispositif expérimental de torse artificiel qui permet d'étudier l'ECGi sur des coeurs explantés, puis dans un deuxième temps faire des expériences in-vivo sur des animaux. Ce dispositif expérimental nous permettra de tester les méthodes numériques ainsi développées sur des cas concrets.

7.2 Conditions aux limites pour des modèles d'écoulements côtiers

Mots-clés : Equations dispersives, modèle de Green-Naghdi, condition génératrice, condition sortante, interaction fluide-solide

Collaborations : Geoffrey Beck (IRMAR, Rennes), David Lannes (IMB, Bordeaux)

- Dans la prolongation des travaux effectués sur des conditions génératrices pour les équations de Boussinesq, il serait intéressant de concevoir des **conditions génératrices**

pour les équations de Green-Naghdi :

$$\begin{cases} \partial_t \zeta + \partial_x q = 0, \\ (1 + \mu \mathbf{T})[\partial_t q + \partial_x(\frac{1}{h}q^2)] + \partial_x \mathcal{F}(\zeta, q) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

avec

$$\mathbf{T} = -\frac{1}{3}\partial_x(h^3\partial_x(\frac{1}{h}\cdot)) \quad \text{et} \quad \mathcal{F}(\zeta, u) = \frac{h^2 - 1}{2} + \mu\frac{2}{3}h^3(\partial_x(\frac{q}{h}))^2. \quad (9)$$

qui décrivent un écoulement où les effets non-linéaires sont plus forts que dans les modèles de Boussinesq. Je souhaiterais utiliser la même idée de couche limite dispersive que celle utilisée pour la condition génératrice pour le modèle de Boussinesq [21]. En effet, actuellement le traitement numérique de conditions génératrices pour les équations de Green-Naghdi fait majoritairement appel à des techniques de type couche absorbante, qui complexifient la résolution numérique de ces équations. Cependant, dans ce cas, une difficulté supplémentaire provient du fait que l'opérateur $(1 + \mu \mathbf{T})$ qui prend en compte les effets dispersifs ne s'applique plus juste à $\partial_t q$ mais à $\partial_t q + \partial_x(\frac{1}{h}q^2)$, ce qui rend plus difficile le calcul de cette couche limite dispersive.

- Par ailleurs, de même que nous avons traité des conditions génératrices, il serait intéressant de pouvoir **traiter des conditions sortantes**, aussi bien pour les équations de Boussinesq que pour celles de Green-Naghdi.
- Une application actuelle de la modélisation des écoulements côtiers concerne la modélisation du **couplage entre un fluide et une structure solide** en interaction avec le fluide. Ce type de modèle permettrait par exemple de faire des simulations de dispositifs simplifiés de récupération d'énergie marine bien moins coûteuses en temps de calcul que des simulations réalisées avec des modèles basés sur les équations de Navier-Stokes incompressible en interaction avec des solides. Avec David Lannes et Geoffrey Beck, nous travaillons sur les conditions aux limites à imposer pour un modèle de couplage d'une structure solide avec un fluide, dans le cas des équations de Boussinesq. Nous avons développé un schéma numérique d'ordre 2, qui a été validé dans le cas particulier d'un retour à l'équilibre pour lequel des solutions de référence peuvent être calculées. Nous validons actuellement le cas général d'une transmission entre les deux côtés de la structure, sans retour à l'équilibre.

Références

- [1] M. B. ABBOTT, H. M. PETERSEN, O. SKOVGAARD, *Computations of shortwaves in shallow water*, Coast. Eng. Proc. (1978), 414-433.
- [2] L. BEAR ET AL, *Cardiac electrical dyssynchrony is accurately detected by noninvasive electrocardiographic imaging*, Heart Rhythm (2018), vol 15, 1058-1069.
- [3] BERGMANN M., LUDDENS F., WEYNANS L., *Enablers for high order level set methods in fluid mechanics*, Int. J. Numer. Meth. Fluids (2015), vol 79, 654-675.
- [4] O. BOUHAMAMA, M. POTSE, L. WEYNANS AND L BEAR, *A Patchwork Inverse Method in Combination with the Activation Time Gradient to Detect Regions of Slow Conduction in Sinus Rhythmn*, Computing in Cardiology, Rimini (2020)
- [5] O. BOUHAMAMA, M. POTSE, L. WEYNANS AND L. BEAR, *A Patchwork Method to Improve the Performance of Current Methods for Solving the Inverse Problem of Electrocardiography*, en révision pour Computers in Biology and Medicine (2020)
- [6] A. BOUHARGUANE, A. IOLLO, L. WEYNANS, *Numerical solution of the Monge-Kantorovich problem by density lift-up continuation*, ESAIM : M2AN (2015), vol 49, 1577-1592.
- [7] M. CISTERNINO, L. WEYNANS, *A parallel second order cartesian method for elliptic interface problems*, Commun. Comput. Phys. (2012), vol 12, 1562-1587.

- [8] M. DAMBRINE, H. HARBRECHT, B. PUIG, *Incorporating knowledge on the measurement noise in electrical impedance tomography*, ESAIM Control Optim. Calc. (2019), vol 25.
- [9] DARDÉ, J. AND HYVÖNEN, N. AND SEPPÄNEN, A. AND STABOULIS, S., *Simultaneous reconstruction of outer boundary shape and admittivity distribution in electrical impedance tomography*, SIAM J. Imaging Sci., (2013), vol 6, 176-198.
- [10] DARDÉ, J. AND STABOULIS, S., *Electrode modelling : The effect of contact impedance*, ESAIM : M2AN, (2016), vol 50, 415-431.
- [11] J. DUCHATEAU ET AL. , *Performance and limitations of noninvasive cardiac activation mapping*, Heart Rhythm, (2019), vol 16, 435-442.
- [12] Y. GORSSE, A. IOLLO, H. TELIB, L. WEYNANS , *A simple second order cartesian scheme for compressible Euler flows*, J. Comput. Phys., (2012), vol 231, 7780-7794.
- [13] O. KAVIAN, M. LEGUEBE, C. POIGNARD, L. WEYNANS, *Classical Electropemabilization Modeling at the Cell Scale*, J. Math. Biol., (2014), vol 231, 1-31.
- [14] T. IGUCHI, *A shallow water approximation for water waves*, J. Math. Kyoto Univ. **49** (2009), 13-55.
- [15] J. FEHRENBACH, L. WEYNANS, *Source and metric estimation in the eikonal equation using optimization on a manifold*, Inverse Problems and Imaging **17** (2023), 419-440.
- [16] KAROUÏ A., BEAR L., MIGERDITICHAN P., ZEMZEMI N., *Evaluation of Fifteen Algorithms for the Resolution of the Electrocardiography Imaging Inverse Problem Using ex-vivo and in-silico Data s*, Frontiers in Physiology **9** (2018), 1708
- [17] M. KAZAKOVA, *Dispersive models of ocean waves propagation : Numerical issues and modelling*, PhD thesis, Université de Toulouse, 2018.
- [18] D. KELLER AND F. WEBER AND G. SEEMANN AND O. DOSSEL, *Ranking the Influence of Tissue Conductivities on Forward-Calculated ECGs*, IEEE Trans. Biomed. Eng., (2010), vol 77, 1-39.
- [19] D. LANNES, *Modeling shallow water waves*, Nonlinearity **33** (2020).
- [20] D. LANNES, F. MARCHE, *A new class of fully nonlinear and weakly dispersive green-naghdi models for efficient 2d simulations*, J. Comput. Phys **282** (2015), 238-268.
- [21] LANNES D., WEYNANS L., *Generating boundary conditions for a Boussinesq system*, Nonlinearity **33** (2020), 6868-6889.
- [22] M. LEGUEBE, C. POIGNARD, L. WEYNANS, *A second-order Cartesian method for the simulation of electropemabilization cell models*, J. Comput. Phys **292** (2015), 114-140.
- [23] T. DE CASTRO MARTINS ET AL., *A review of electrical impedance tomography in lung applications : Theory and algorithms for absolute images*, Annual Reviews in Control **48** (2019), 1367-5788.
- [24] WANG Y, RUDY Y, *Application of the method of fundamental solutions to potential-based inverse electrocardiography*, Ann Biomed Eng., (2006), vol 34, 1272-88.
- [25] G. WEI, J. T. KIRBY, A. SINHA, *Generation of waves in boussinesq models using a source function method*, Coastal Engineering **36** (1999), 271-299.
- [26] WEYNANS, L., *Super-convergence in maximum norm of the gradient for the Shortley-Weller method*, J. Sci. Comput. **75** (2018), 625-637.
- [27] L. WEYNANS, A MAGNI, *Consistency, accuracy and entropic behaviour of remeshed particle methods*, ESAIM : M2AN **47** (2013), 57-81.