



# Hammou El-Otmany

Résidence Les Acacias  
Étage 04, Appartement 17  
25, Cours Léon Bérard, 64000 Pau  
☎ +33(0)7.62.47.22.65  
✉ hamou.elotmany@gmail.com  
🌐 hamoelotmany.github.io

## Dossier de candidature au poste d'Enseignant Chercheur

Section n°26 - Mathématiques Appliquées  
et Application des Mathématiques

### Table des matières

1	Formations et synthèse des activités . . . . .	2
2	Curriculum vitæ . . . . .	3
3	Publications et pré-publications . . . . .	7
4	Activités d'enseignement . . . . .	8
5	Activités de recherche . . . . .	12
6	Rapport de recherche . . . . .	15
7	Projet de recherche . . . . .	25
8	Responsabilités administratives et animations scientifiques . . . . .	27
9	Bibliographie . . . . .	28
10	Annexes . . . . .	30

### Mots clés

Équations aux dérivées partielles, Analyse numérique, analyse d'erreur, modélisation mathématique des écoulements multiphasique, modélisation stochastique, analyse asymptotique, problèmes inverses, calcul scientifique, mécanique des fluides, cristallisation et stockage d'énergie.





# 1. Formations et synthèse des activités

## Carrières et Formations

2021- ?	<b>Enseignant vacataire, IPSA</b> , Paris, France.
2020- ?	<b>Professeur indépendant (auto-entrepreneur)</b> , Pau, France.
2019-2021	<b>Enseignant-Formateur</b> , Centre <b>ETUD'Plus</b> , Morlaàs, France.
2015-2019	<b>Chercheur associé non-permanent</b> , Laboratoire de Mathématiques et leurs Applications de Pau, Université de Pau, France.
2017-2019	<b>Post-Doctorat</b> , Centre Scientifique et Technique de Jean Féger de TOTAL en cotutelle avec l'Université de Pau.
2015-2017	<b>Post-Doctorat</b> , Organisme Pétrolier de Recherche Appliquée, Pau, France.
2012-2015	<b>Doctorat</b> de Mathématiques Appliquées, Université de Pau, Pau, France.
2011-2012	<b>Master de Recherche en Mathématiques Appliquées parcours Finance</b> , Université Gustav-Eiffel et École des Ponts, Champs sur Marne, France.
2009-2011	<b>Ingénierie en Actuariat Finance</b> , FST, Marrakech, Maroc.
2008-2009	<b>Licence en mathématiques appliquées</b> , FST, Errachidia, Maroc.
2006-2008	<b>DEUST en Math.-Info.-Physique</b> , FST, Errachidia, Maroc.

## Activités de recherche

- 7 publications acceptées dans des revues internationales.
- 2 articles soumis (disponibles sur demande).
- 5 communications internationales avec comité de lecture et une communication nationale.
- 6 exposés dans des séminaires et groupes de travail, 4 exposés dans des journées et 2 posters.
- 2 mémoires de recherche (Master 2, Doctorat) et 2 rapports techniques (contrats post-doctoraux).

## Activités d'enseignement

	Unité d'exercice	Type	Niveau	Intitulé	Heures
2020-2021	IPSA	Cours/TD	Bac+2 (Aéro 2 <sup>ème</sup> )	Intégrales multiples et curvilignes	42
		Colles	BAC+2 (Aéro 2 <sup>ème</sup> )	Analyse et probabilités	36
2019-2021	Centre Etud'Plus	Cours/TD	BAC+1 (IUT-STID)	Suites	23
		Cours/TD	BAC+1 (IUT-STID)	Probabilités et statistiques	37
		Cours/TD	BAC+1 (IUT-STID)	Fonctions d'une variable réelle et intégrales	19
		Cours/TD	BAC+1 (IUT-STID)	Séries chronologiques	27
		Cours/TD	BAC+1 (IUT-STID)	Algèbre linéaire	24
		Cours/TD	BAC+1 (IUT-STID)	Algèbre linéaire	24
2014-2015	Université de Pau	TD	L1 MIASH	Algèbre élémentaire	19.5
		TD	L1 Maths	Suites et fonctions	19.5
		TD/TP	L1 Maths	Statistiques descriptives	33.5
2013-2014	Université de Pau	TD	L2 Maths	Analyse	19.5
		TD	L1 Maths	Algèbre linéaire 1	19.5
		TD	L1 Maths	Fonctions de deux variables	19.5

## Activités administratives

Depuis avril 2019, je suis responsable des cours intensifs et de soutien en mathématiques au **centre ETUD'Plus**. Ainsi, pendant mes trois années de thèse, je me suis occupé avec l'aide d'un autre doctorant en mathématiques de **l'organisation du séminaire des doctorants** du LMAP. J'ai eu l'occasion d'être élu **membre non permanent** au sein du conseil de LMAP et d'être élu **membre non permanent** de la fédération pluridisciplinaire de recherche appliquée (IPRA).

## 2. Curriculum vitæ

Nom : **Hammou El-Otmany.**  
 Date de naissance : 15/08/1987.  
 Nationalité : Marocaine.  
 État civil : Marié, 1 enfant.  
 Titres : Docteur en mathématiques Appliquées,  
 Ingénieur de la faculté des sciences et Techniques de Marrakech, Maroc,  
 Qualifié en sections 26 et 62 du CNU.

### Situation actuelle

**2021-Présent** **Enseignant vacataire** à l'IPSA - Ecole d'ingénieurs aéronautique et spatiale, Paris, France.  
**2020-Présent** **Professeur indépendant** dans des établissements d'enseignement technique et professionnel (Auto-entrepreneur, début d'activité le 07/11/2020).

### Cursus universitaires

**2012-2015** **PhD en Mathématiques Appliquées**, Laboratoire de Mathématiques et leurs Applications-Pau (LMAP), Université de Pau, France.  
**2011-2012** **Master de recherche de Mathématiques Appliquée parcours Finance**, Université Gustav-Eifel /Ecole des Paris-Tech, Champs sur Marne, France.  
**2009-2011** **Diplôme d'ingénieur en Actuariat-Finance** et Calcul Scientifique, Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech, Maroc.  
**2006-2009** **Licence en Mathématiques Appliquées**, Faculté des Sciences et Techniques d'Errachidia, Maroc.  
**2006-2008** **DEUST en Mathématique-Informatique-Physique**, Faculté des Sciences et Techniques, Errachidia, Maroc.  
**2006** **Baccalauréat en Sciences Expérimentales**, Lycée moulay-ali-Chérif d'Errich, Maroc.

### Expériences académiques et professionnelles

**2020-2021** **Chercheur Associé** au Laboratoire des sciences de l'ingénieur, Faculté polydisciplinaire de Taza, Univeristé Sidi Mohamed Ben-Abdellah Fès, Maroc.  
**2019-2021** **Enseignant-Formateur** au centre ETUD'+, Morlaàs, France.  
**2015-2019** **Chercheur Associé** au Laboratoire de Mathématiques et leurs Applications de Pau (LMAP), Université de Pau, France.  
**2017-2019** **Chercheur Postdoctoral** au Centre Scientifique et Technique de Jean Féger de TOTAL en cotutelle avec l'Université de Pau, Pau, France.  
**Projet confidentiel** : *Inverse problem for random field conditioning under connectivity constraints.*  
**Directeur** : Philippe PONCET.  
**2015-2017** **Chercheur Postdoctoral** à l'Organisme Pétrolier de Recherche Appliquée (OPERA) affilié l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau, France.  
**Projet confidentiel** : *Méthode d'inversion stochastique pour la tomographie sismique.*  
**Directeur** : Reda BAINA.

- 2013-2015** **Moniteur d'initiation à l'enseignement supérieur**, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau, France.
- 2012-2015** **Thèse de Doctorat** de Mathématiques Appliquées au sein du Laboratoire de Mathématiques et de leurs Applications de Pau (LMAP, UMR CNRS 5251) sous la direction de Daniela Capatina (LMAP) et Didier Graebing (IPREM) de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour.  
**Sujet** : *Approximation par la méthode NXFEM des problèmes d'interface et d'interphase en mécanique des fluides.*  
**Mention** : Très honorable.  
**Soutenance** : 9 novembre 2015 devant un jury composé de  
 BLOUZA Adel Maître de conférence HDR, Université de Rouen (Rapp.),  
 CAPATINA Daniela Maître de conférences HDR, Université de Pau (Dir.),  
 EYMARD Robert Professeur, Université Marne-la-Vallée (Prés.),  
 GRAEBLING Didier Professeur, Université de Pau (Dir.),  
 HILD Patrick Professeur, Université de Toulouse 3 (Rapp.),  
 LUCE Robert Maître de conférence HDR, Université de Pau (Exam.)
- 2011-2012** **Mémoire de Master** au Laboratoire CERMICS de l'École des Ponts, France.  
**Sujet de mémoire** : *Équations différentielles stochastique de deuxième ordre et applications en finance.*  
**Directeurs** : Aurélien ALFONSI et Damien LAMBERTON.
- 2010-2011** **Stage d'ingénierie** (Mars-Septembre) à Optima Finance Consulting (OFC), Casablanca, Maroc.  
**Sujet du PFE** : *Gestion ALM : développement d'une stratégie de financement.*  
**Directeurs** : Lahcen DOUGE et Ali ALAMI IDRISSE.
- 2009-2010** **Stage (Juillet-Septembre)** à la Ministère de l'économie et des finances (MEF), Rabat, Maroc.  
**Sujet de stage** : *Prévision statistique du produit immobilier FOGARIM.*  
**Directeurs** : Hicham SOLHI.
- 2009-2010** **Stage (Mars-Avril)** à la société OPTIMFX, Casablanca, Maroc.  
**Sujet de stage** : *Implémentation et Calibration de modèle de Heston "attendu" et les modèles de diffusion.*  
**Directeurs** : Said NASSIM.

## Expériences d'encadrement

- Mars-Juin 2020** Adel GAADAD ; Étudiant en M2, "Ingénierie des Energies Renouvelables et Efficacité Énergétique" à l'Université de Pau.  
**Sujet de stage** : *Deep Learning pour l'optimisation d'un système hybride du stockage d'énergie.*  
**Collaborateurs** : Tarik KOUSKSOU (Prof. à l'Université de Pau), Tarik El-Rhafiki (Prof. à l'Université de Taza), Khaled ZADOUK (Prof. à l'Université de Sultan Moulay Slimane).
- Mars-Juin 2019** Said OUHAMOU ; Étudiant en M2, "Mathématiques Appliquées" à l'Université Moulay Ismail, Meknès, Maroc.  
**Sujet de stage** : *Représentation probabiliste de Feynman-Kac pour les équations aux dérivées partielles non-linéaires en mécanique des fluides.*  
**Collaborateur** : Mounir THAMI (Professeur assistant).

**Mars-Juin 2017** Ilyes OHMICHACHA ; Étudiant en L3, "Mathématiques" à l'Université Moulay Ismail, Meknès, Maroc.  
**Sujet de stage :** *Algorithme génétique pour la résolution d'écoulement et d'infiltration de l'eau suivant la méthode Green et Ampt.*  
**Collaborateur :** Mounir THAMI (Professeur assistant).

### Visites et collaborations

**Juin 2019** **Séjour d'une semaine** à l'Université Moulay Ismail, Meknès, Maroc.  
**Activités :** *Stochastic modelling and Feynman-Kac probabilistic representations of non-linear partial differential equations.*  
**Invité par :** Mounir THAMI (Professeur assistant).

**Juin-Juillet 2017** **Séjour de deux semaines** à la Faculté des Sciences, Tetouan, Maroc.  
**Activités :** *Stochastic modelling and Feynman-Kac probabilistic representations of non-linear partial differential equations.*  
**Invité par :** Abdellah TAZI (Professeur).

### Prix et Certificats

**Juin 2011** **Prix des "Lauréat d'ingénieurs"**, Faculté des Sciences et Techniques-Guéliz, Marrakech, Maroc.

**2011-2012** **Bourse d'excellence** du Laboratoire d'excellence Bézout (**LaBEX**), Université Gustav-Eiffel et École des Ponts Paris-Tech.

**2011-2012** **Certificat de Master de LaBEX**, Université Gustav-Eiffel et Ecole des Ponts, Champs sur Marne, France.

### Activités de vulgarisation

**Septembre 2019** **Mini-cours (3h)**, "Introduction à Machine Learning via Python", Centre Etud'Plus, Morlaàs, France.

**Juin 2019** **Mini-course (3h)**, "Approche bayésienne pour les problèmes inverses et applications", Séminaire pour les étudiants de Master 2 d'Analyse numérique des équations aux dérivées partielles, Université Moulay Ismail de Meknès, Maroc.

### Compétences en calcul scientifique et informatiques

#### Développement de code de calcul

- Durant ma thèse, j'ai développé un code de calcul permettant de traiter l'interface dans un milieu multi-phasique basé sur la méthode NXFEM en utilisant les éléments finis non-conformes.
- Durant mes projets post-doctoraux, j'ai implémenté des codes intégrés dans les logiciels industriels de l'organisme Pétrolier de Recherche Appliquée.
- J'ai également commencé une collaboration avec **T. El-Rhafiki** (Université pluridisciplinaire de Taza, Maroc), **T. Kouskou** et **Y. Zeraouli** (Université de Pau) avec eux je traite les problèmes inverses en systèmes énergétiques et matériaux à changement de phase.

<b>Environnements de calcul</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Langages compilés : maîtrise de Fortran et C++, Java.</li> <li>• Langages interprétés : bonne maîtrise de Python.</li> <li>• Visualisations : Gnuplot, Paraview, TecPlot.</li> <li>• Statistiques : R, SPSS, Eviews.</li> </ul>
<b>Éléments finis</b>	CONCHA C++, deal.II.
<b>Systèmes d'exploitation</b>	Linux, Mac Os, Windows.
<b>Outils</b>	Cmake, Git, Tikz, L <sup>A</sup> T <sub>E</sub> X, Beamer

## Thèmes de Recherche

- **Modélisation numérique en mécanique des fluides et en rhéologie** : schémas aux différences finies, volumes finis et éléments finis, NXFEM, Galerkin discontinue, analyse et estimation d'erreur, maillage adaptatif. Simulation numérique d'écoulement sanguin, application aux globules rouges.
- **Problème inverse, algorithme et applications** : étude du caractère bien posé (existence, unicité, stabilité), méthode de régularisation, méthodes déterministes (Newton, gradient conjugué, ...), méthodes stochastiques (Méthodes bayésiennes, Inversion par réseaux de neurones), algorithme génétique, algorithme de Metropolis-Hasting. Applications : géophysique (Tomographie sismique), énergies (fluxmètre, détermination de la capacité calorifique apparente, matériaux à changement de phase), génie pétrolier (réservoir).
- **Modélisation stochastique dans les milieux dispersés** : modèle du transfert avec changement de phase (liquide/solide), température de surfusion (caractère stochastique), construction de modèle stochastique, analyse mathématique (existence et unicité de solutions), étude de la sensibilité des paramètres, simulations numériques et validations.

## Langues

<b>Tamazighte</b>	Langue maternelle
<b>Français</b>	Niveau avancé
<b>Anglais</b>	Niveau professionnel. Titulaire de Cambridge English Certificate.
<b>Arabe</b>	Niveau avancé

## Centre d'intérêts

- Football
- Dessin
- Lectures (Livres techniques et management)
- Agriculture organique



### 3. Publications et pré-publications

#### Articles publiés dans des revues internationales à comité de lecture

1. H. El-Otmany. *A virtual class of nonconforming finite elements and its applications*. accepté pour publication dans IJMMNO, disponible sur ma page web. [☞](#)
2. M.A. Bentaher, H. El-Otmany, T. Kousksou, T. El Rhafiki, Y. Zerouali. *Inverse method to describe crystallization of undercooled water in cold storage tank*. *Journal of energy storage*, **36**, April 2021, 102404. [☞](#)
3. H. El-Otmany, T. Kousksou, T. El Rhafiki, Y. Zerouali. *A Brownian motion model to describe a random crystallization of undercooled water dispersed within emulsions*. *Journal of energy storage*, **35**, March 2021, 102273. [☞](#)
4. Y.Khattari, H. El-Otmany, T. El Rhafiki, T. Kousksou, A. Ahmed, E. BenGhoula. *Physical models to evaluate the performance of impure PCM dispersed in building materials*. *Journal of energy storage*, **31**, 1016612020, 2020. [☞](#)
5. D. Capatina, H. El-Otmany, D. Graebing, R. Luce. *An extension of NXFEM to nonconforming finite elements*. *Math. and Computers in Simulation*, **137**, 226-245, 2017. [☞](#)
6. D. Capatina, S.D. Santacreu, H. El-Otmany, D. Graebing. *Nonconforming finite element approximation for an elliptic interface problem with NXFEM method*. *Monografías matemáticas Garcia de Galdeano*, **40**, pp. 43-52, 2015. [☞](#)
7. D. Capatina, N. Barrau, H. El-Otmany, R. Luce. *Nitsche's Extended Finite Element Method for a Fracture Model in Porous Media*. *Applicable Analysis*, **95**, pp. 24-42, 2015. [☞](#)

#### Actes de conférences avec comité de lecture

8. D. Capatina, S.D. Santacreu, H. El-Otmany, D. Graebing. *Robust NXFEM method for a nonconforming approximation of an elliptic problem*. *Proceedings of WCCM XI*, 2014.

#### Articles soumis et en préparation

9. H. El-Otmany. *Investigation of a new stochastic viral infection model with general functional response*. Under reviewer in Chaos, Solitons & Fractals, disponible sur ma page web. [☞](#)
10. H. El-Otmany, T. El Rhafiki, T. Kousksou. *Stochastic modelling for describing crystallization droplets in water emulsion*. En révision dans le journal SPA, disponible sur ma page web. [☞](#)

#### Rapports et mémoires de recherche

11. H. El-Otmany, T. Chugunova, P. Poncet, *Méthode inverse pour conditionner les champs aléatoires avec les contraintes de connectivités*. Rapport technique **confidentiel**, Université de Pau, 20 décembre 2018.
12. H. El-Otmany, R. Baina, *Méthodes d'inversion stochastique pour les problèmes inverses non-linéaires en imagerie sismique*. Rapport technique **confidentiel**, OPERA, 07 février 2017.
13. H. El-Otmany, *Approximation par la méthode NXFEM des problèmes d'interface et d'interphase en mécanique des fluides*. Thèse de doctorat, Laboratoire de Mathématiques et leurs Applications de Pau, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 09 novembre 2015. [☞](#)
14. H. El-Otmany, *Équations différentielles stochastique rétrogrades du deuxième ordre et applications en finance*. Mémoire de Master 2 réalisé sous la direction de Damien LAMBERTON et Aurélien ALFONSI, Centre de CERMICS, École des Ponts, 2012.

Les travaux 1-10 et 14-15 pourront être adressés aux rapporteurs sur simple demande, ou certains pourront être présentés lors de l'audition et ils sont aussi accessibles sur la page :

☞ [hamoelotmany.github.io](https://hamoelotmany.github.io)

## 4. Activités d'enseignement

J'ai effectué l'ensemble de mes enseignements au sein respectivement de l'**Institut polytechnique des sciences avancées (IPSA)- Ecole d'ingénieurs aéronautique et spatiale** à Paris (France), le **Centre de formation ETUD'Plus** à Morlaàs (France), l'**Université Moulay-Ismaïl** à Meknès (Maroc), l'**École de National de Commerce et Gestion** à Kenitra (Maroc) et de l'**Université de Pau et des Pays de l'Adour** à Pau (France), pour un total de **377 heures**. J'ai enseigné à des publics variés, allant du niveau L1 au niveau M2 et comportant de 12 à 35 étudiants. Vous trouverez ici le tableau qui résume toutes mes activités d'enseignement et ses détails. Les support de cours et TD sont accessibles sur ma page web [hamoelotmany.github.io](https://hamoelotmany.github.io).

	Unité d'exercice	Type	Niveau	Intitulé	Heures
2020-2021	IPSA	Cours/TD	Bac+2 (Aéro 2 <sup>ème</sup> )	Intégrales multiples et curvilignes	42
		Colles	BAC+2 (Aéro 2 <sup>ème</sup> )	Analyse et probabilités	36
2019-2021	Centre Etud'Plus	Cours/TD	BAC+1 (IUT-STID)	Suites	23
		Cours/TD	BAC+1 (IUT-STID)	Probabilités et statistiques	37
		Cours/TD	BAC+1 (IUT-STID)	Fonctions d'une variable réelle et intégrales	19
		Cours/TD	BAC+1 (IUT-STID)	Séries chronologiques	27
		Cours/TD	BAC+1 (IUT-STID)	Algèbre linéaire	24
2014-2015	Université de Pau	TD	L1 MIASH	Algèbre élémentaire	19.5
		TD	L1 Maths	Suites et fonctions	19.5
		TD/TP	L1 Maths	Statistiques descriptives	33.5
2013-2014	Université de Pau	TD	L2 Maths	Analyse	19.5
		TD	L1 Maths	Algèbre linéaire 1	19.5
		TD	L1 Maths	Fonctions de deux variables	19.5

**2021-Présent**      **Enseignant-Vacataire à l'IPSA- Ecole d'ingénieurs aéronautique et spatiale (78h ), Paris, France**

- Chargé de cours et des travaux dirigés de "**Analyse : intégrales multiples et curvilignes**".

*Niveau* : 2<sup>ème</sup> année, classes préparatoires (Aéro 2)

*Programme* : Quadrillage d'un rectangle, rectangle élémentaire, quadrillage régulier, Intégrales doubles, intégrales triples, théorèmes de Fubini, Formule de Green-Riemann, jacobien, formule de changement de variables, coordonnées polaires, coordonnées elliptiques et coordonnées sphériques.

*Volume horaire* : 42 heures.

- Chargé des colles d"**analyses et probabilités**".

*Niveau* : 2<sup>ème</sup> année, classes préparatoires (Aéro 2)

*Programme* : suites numériques, séries numériques, critères de convergence, convergence des séries, séries de Fourier.

*Volume horaire* : 36 heures.

- Chargé de cours intensif et des exercices supplémentaires de **"Suites"**.

*Niveau* : IUT-STID des Pays de l'Adour.

*Programme* : définitions, suites explicites, suites récurrentes, suites arithmétiques et géométriques, monotonie des suites, critère de Cauchy, convergence et divergence, limites.

*Volume horaire* : 23 heures.

- Chargé de cours intensif et des exercices de **"Séries chronologiques"**.

*Niveau* : IUT-STID des Pays de l'Adour.

*Programme* : définitions et exemples, ajustement linéaire, tendance, saisonnalité, stationnarité, lissages et propriétés de filtrage, processus AR, moyennes mobiles (MA), composantes saisonnières, aides à la rédaction des projets proposés par les enseignants de IUT-STID.

*Volume horaire* : 27 heures.

- Chargé de cours intensif et des exercices supplémentaires d'**"Probabilités et statistiques descriptives"**.

*Niveau* : IUT-STID des Pays de l'Adour.

*Programme* : Probabilités : probabilité discrète, événements, calcul des probabilités, variables aléatoires discrètes, probabilité conditionnelle, indépendance, formule de Bayes, variables aléatoires continues, fonction de répartition, densité de probabilité, espérance, variance. Statistiques : analyse uni-variée (définitions, types de variables, représentation graphique, médiane, variance, écart-type). Analyse bi-variée (table de contingence, indépendance, régression, covariance, coefficient de corrélation)

*Volume horaire* : 21 heures (Probabilités) et 26 heures (Statistiques).

- Chargé de cours intensif et des exercices supplémentaires d'**"Algèbre linéaire"**.

*Niveau* : L1 de l'Université de Pau et IUT-STID des Pays de l'Adour.

*Programme* : Matrices et système d'équations linéaires, méthode de Gauss, méthode de substitution, espace vectoriel, sous espace vectoriel, combinaison linéaire, déterminants, inverse d'une matrice, valeurs et vecteurs propres.

*Volume horaire* : 24 heures.

- Chargé de cours intensif et des exercices supplémentaires de **"Fonctions d'une variable réelle et intégrales"**.

*Niveau* : IUT-STID des Pays de l'Adour.

*Programme* : Définitions, domaine de définitions, notions de limites et de continuité, fonctions inverses et réciproques, fonctions exponentielles et logarithmiques, dérivées, définitions d'intégrale, familles de fonctions intégrables, monotonie, continuité, dérivabilités, relation de Chales, intégration par parties, changement de variables.

*Volume horaire* : 19 heures.

- 2018-2019     Enseignant invité à la Faculté des Sciences (12h), Tetouan (Maroc)**
- Chargé de cours intensif d'"**Optimisation stochastique et déterministe**".
- Niveau* : Master de mathématiques appliquées à la finance.
- Programme* : Introduction au problème inverse, problèmes de moindres carrés linéaires et non-linéaires, méthodes déterministes (Newton, gradient conjugué, ...), BFGS, méthodes stochastiques (méthode bayésienne, Inversion par réseaux de neurones), algorithme génétique, quantification d'incertitude, exemples d'applications.
- Volume horaire* : 12 heures.
- 2017-2018     Enseignant invité à l'École Nationale De Gestion et de Commerce (25h), Kenitra (Maroc)**
- Chargé de cours intensif d'"**Optimisation et Calibration des modèles à volatilités**".
- Niveau* : Master 2 en Finance.
- Programme* : Rappel sur les modèles financiers (Heston, Bates, NIG-CIR), Pricing des options avec les fonctions caractéristiques. Calibration et optimisation : Gradient conjugué, algorithme génétique, régularisation de problème par Tikhonov. Calibration de modèle de Heston.
- Volume horaire* : 13 heures.
- Chargé de cours intensif d'"**Introduction au calcul stochastique pour la finance**".
- Niveau* : Master 2 en Finance.
- Programme* : Introduction au processus stochastique, Mouvement Brownien, Intégrale stochastique et formule d'Itô, Modèle de Black-Scholes, Martingales et martingales locales, Formule de Feynman-Kac.
- Volume horaire* : 12 heures.
- 2014-2015     Moniteur d'initiation à l'enseignement supérieur à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour (128h), Pau, France**
- Chargé de Travaux Dirigés et Exercices Supplémentaires pour le cours d'"**Algèbre élémentaire**" de MCF M. Laurent LEVI.
- Niveau* : Licence 1 de Mathématiques et Informatique Appliquées aux Sciences Humaines et Sociales (MIASH).
- Programme* : nombres complexes, espaces vectoriels, division euclidienne des polynômes, pgcd, multiplicité des racines, factorisation des polynômes, décomposition en éléments simples, notions des bases orthonormales.
- Volume horaire* : 19.5 heures équivalent TD.
- Chargé de Travaux Dirigés et Exercices Supplémentaires pour le cours d'"**Suites et Fonctions**" de MCF Mme Catherine MARQUET.
- Niveau* : Licence 1 de Mathématiques.
- Programme* : Suites : définitions, suites géométriques et arithmétiques, calcul des limites. Fonctions : définitions et exemples, domaine de définition, surjectivité et injectivité, théorème de Rôle, accroissements finis, continuités, dérivabilités, calcul des limites, étude des fonctions.
- Volume horaire* : 19.5 heures équivalent TD.

- Chargé de Travaux Dirigés et Travaux pratiques pour le cours d'"**Statistiques descriptives**" d'ATER M. Vincent DARRIGRAND.

*Réalisations* : rédaction de la moitié des travaux dirigés, travaux pratiques et la correction des contrôles continus et d'examen final.

*Niveau* : Licence 1 de Mathématiques et Informatique Appliquées aux Sciences Humaines et Sociales (MIASH).

*Programme* : Analyse uni-variée : introduction, types de variables, représentation graphique, paramètres de position, paramètres de dispersion, paramètres de forme. Analyse bivariable : table de contingence, Indépendance, Régression linéaire, Coefficients de corrélation de Bravais-Pearson et de Spearman. Travaux pratiques sous Excel (TP en classe et des projets par binôme).

*Volume horaire* : 19.5 heures équivalent TD et 14 heures équivalent TP.

#### 2013-2014 **Moniteur d'initiation à l'enseignement supérieur à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau, France.**

- Chargé de Travaux Dirigés et Exercices Supplémentaires pour le cours d'"**Analyse**" du Prof. M. Allal GUESSAB.

*Niveau* : Licence 2 de Mathématiques.

*Programme* : suites et séries numériques, suites et séries de fonctions, séries entières, convergences (simple, uniforme, normale, absolue), critère de convergence, relation entre les intégrales généralisées et les séries, séries de Fourier et leurs propriétés.

*Volume horaire* : 19.5 heures équivalent TD.

- Chargé de Travaux Dirigés pour le cours d'"**Algèbre linéaire 1**" de MCF M. Vincent FLORENS et MCF Mme Isabelle GREFF.

*Niveau* : Licence 1 de Mathématiques.

*Programme* : espaces vectoriels, applications linéaires, diagonalisation et puissance des matrices, fonction caractéristique, valeurs et vecteurs propres, systèmes d'équations, pivot de Gauss espace des polynômes.

*Volume horaire* : 19.5 heures équivalent TD.

- Chargé de Travaux Dirigés et Exercices Supplémentaires pour le cours de "**Fonctions de deux variables**" de MCF M. David TRUJILLO.

*Niveau* : Licence 1 de Mathématiques.

*Programme* : définitions et exemples de fonctions de deux variables, limites et continuités, fonctions et dérivées partielles, fonctions homogènes, développements limités polynomiaux, courbes de niveau, représentation graphique, points critiques, extremums.

*Volume horaire* : 19.5 heures équivalent TD.

## 5. Activités de recherche

### Communications dans des conférences, colloques internationaux et nationaux

- Sept. 2019**    **CIMMAN, Meknès (Maroc) 16-18 septembre 2019**  
H. El-Otmany. *A Nitsche's Extended Stochastic Finite Element Method for solving elliptic problem on random domains in porous media.*
- Juin 2015**    **CANUM2015, Savoie (France), 8-12 juin 2015**  
D. Capatina, S.D. Santacreu, H. El-Otmany, D. Graebing. *Approximation par éléments finis non-conformes et NXFEM d'un problème d'interface de Stokes.*
- Juin 2015**    **MAMERN VI 2015, Pau (France), 1-5 juin 2015**  
D. Capatina, H. El-Otmany, D. Graebing, R. Luce. *NXFEM for Darcy and Stokes interface problems with nonconforming finite elements.*
- Oct. 2014**    **Conference on Numerical and Mathematical Modeling of Flow and Transport in Porous Media, Dubrovnik (Croatia), 29 sep.-03 oct. 2014**  
D. Capatina, N. Barreau, H. El-Otmany, R. Luce. *NXFEM for solving non-standard transmission problems.*
- Sept. 2014**    **13th. International Conference Zaragoza-Pau on Applied Mathematics, Jaca (Espagne), 15-18 sep. 2014.**  
D. Capatina, S.D. Santacreu, H. El-Otmany, D. Graebing. *Nonconforming finite element approximation for an elliptic interface problem with NXFEM method.*
- Juil. 2014**    **WCCM XI, 11th. World Congress on Computational Mechanics (mini-symposium), Barcelone (Espagne), 20-25 juillet 2014**  
D. Capatina, S.D. Santacreu, H. El-Otmany, D. Graebing. *Robust NXFEM method for a nonconforming approximation for an elliptic problem.*
- Mai 2014**    **Workshop International sur le Calcul Stochastique et Ses Applications 2014, Saida (Algérie), 28-30 mai 2014**  
M. Eddahbi, H. El-Otmany. *Approche asymptotique d'une edp issue d'une équation différentielle stochastique rétrograde du second ordre.*

### Posters

- 16.09.2019**    **Congrès International sur la Modélisation Mathématique et Analyse Numérique, 16-18 septembre 2019, Meknès, Maroc.**  
H. El-Otmany, *A Nitsche's Extended Stochastic Finite Element Method for solving elliptic problem on random domains in porous media.* Accessible ici [☐](#).
- 06.06.2013**    **Workshop des doctorants de l'école doctorale des sciences exactes ED211, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 05-06 juin 2013, Pau.**  
D. Capatina, H. El-Otmany, D. Graebing. *Numerical simulation of blood flow.* Accessible ici [☐](#).

## Journées

- 24.10.2018** **Journées OPERA**, Pau, 24-28 octobre 2018.  
H. El-Otmany, R. Baina  
*Uncertainty quantification for inverse problem in seismic tomography.*
- 19.06.2015** **Semaine d'analyse numérique de Besançon : XFEM, Nitsche FEM, conditions aux limites artificielles**, Besançon, 15-19 juin 2015.  
D. Capatina, H. El-Otmany, R. Luce  
*NXFEM for fracture model in porous media.*
- 19.11.2014** **Journées du GDR Metice : Mathématiques Appliquées aux espèces, tissus et cellules, MAP5**, Paris, 19-20 novembre 2014.  
D. Capatina, S. D. Santacreu, H. El-Otmany, D. Graebing.  
*Modélisation des globules rouges.*
- 20.09.2013** **Journées Bordeaux-Pau-Toulouse**, Anglet, 19-20 septembre 2013.  
D. Capatina, S.D. Santacreu, H. El-Otmany, D. Graebing. *Modélisation du comportement de globules rouges dans un écoulement sanguin.*

## Exposés dans des séminaires ou groupes de travail

- 12.11.2020** **Séminaire virtuel**, Équipe de collaboration, Taza (Maroc) - Pau (France).  
H. El-Otmany, *Analysis of stochastic model for crystallization in dispersed media with emulsion.*
- 28.01.2017** **Séminaire de la cellule OPERA**, Pau.  
H. El-Otmany, R. Baina. *Bayesian inversion applied to inverse problem in seismic tomography.*
- 09.09.2014** **Séminaire des doctorants du LMAP**, Université de Pau, Pau.  
D. Capatina, S.D. Santacreu, H. El-Otmany, D.Graebing. *Nonconforming finite element approximation for an elliptic interface problem with NXFEM method.*
- 15.07.2014** **Séminaire des doctorants du LMAP**, Université de Pau, Pau.  
D. Capatina, S.D. Santacreu, H. El-Otmany, D.Graebing. *Robust NXFEM method for a nonconforming approximation for an elliptic problem.*
- 03.07.2014** **Journées des doctorants du LMAP**, Université de Pau, Pau.  
D. Capatina, H. El-Otmany, D.Graebing. *Simulation numérique d'écoulement des fluides biologiques.*
- 05.06.2014** **Journées de l'école doctorale de sciences ED211**, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau.  
D. Capatina, H. El-Otmany, D.Graebing. *Numerical simulation of blood flow.*
- 26.03.2013** **Séminaire des doctorants du LMAP**, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau.  
D. Capatina, H. El-Otmany, D.Graebing. *Nitsche Extended Finite Element Method (NXFEM) for an interface elliptic problem.*

### Participation régulière à des groupes de travail ou séminaires (auditeur)

- 2012-2015**     **Groupe de travail CONCHA** ("Complex Flow Simulation Codes based on High-order and Adaptive methods"), Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- 2012-2015**     **Séminaire du Laboratoire de Mathématiques et leurs Applications-Pau**, Université de Pau et des Pays de l'Adour.

### Participation à des conférences, sans exposé (auditeur)

- Octobre 2016**     **Conférences sur les méthodes d'inversion basées sur la linéarisation "Reverse time migration**, Pau, du 24 au 28 octobre 2016.
- Sept. 2013**     **XFEM 2013 conference, ECCOMAS**, Lyon (France), du 11 au 13 septembre 2013.
- Avril 2011**     **Attaraji Forum on Trading and technic analysis**, Institut Attaraji d'enseignement privé, Agadir (Maroc), avril 2011.
- Juin 2010**     **Workshop on Stochastic Analysis and Applications to Finance**, Université Cadi Ayyad de Marrakech (Maroc), du 31 mai au 09 juin 2010.

### Collaborations scientifiques

- 2020- ?**     **Collaboration avec Daniela Capatina (MCF-HDR, LMAP, Université de Pau) et Didier Graebbling (Professeur, IPREM, Université de Pau)** sur l'approximation du problème d'interface de Stokes basée sur la méthode NX-FEM avec les éléments finis non-conformes. L'idée est d'utiliser NXFEM sans rajouter des termes de stabilisation classiques pour prouver la condition inf-sup et l'ordre de convergence optimal. Un code de calcul pour les tests numériques a été développé et intégré dans la librairie interne CONCHA C++, et un article est en cours de préparation.
- 2020- ?**     **Collaboration avec Tarik Kousksou (MCF-HDR, Université de Pau), Tarik El-Rhafiki (Professeur, Université Pluridisciplinaire de Taza au Maroc) et Youssef Zeraouli (MCF, Université de Pau)** autour de la modélisation mathématique, stochastique et la simulation numérique la caractérisation de matériaux à changement de phase (MCP), et la cristallisation des particules, ainsi que l'optimisation de stockage d'énergie



## 6. Rapport de recherche

Cette partie est consacrée à la description de mes travaux de recherche, réalisés dans le cadre de ma thèse au sein de l'équipe "**Méthodes Numériques et Fluides Complexes**" du Laboratoire de Mathématiques et de leurs Applications de Pau (LMAP, UMR CNRS 5251, Université de Pau et des Pays de l'Adour) sous la direction de **Daniela Capatina** (MCF-HDR, LMAP) et **Didier Graebing** (Professeur, IPREM), puis dans le cadre de mes projets post-doctoraux respectivement au sein de l'**Organisme Pétrolier de Recherche Appliquée (OPERA)** attaché à l'Université de Pau sous la direction de **Reda Baina** (Directeur de la cellule OPERA) et au Centre Scientifique et Technique Jean Féger de Total en cotutelle avec l'Université de Pau sous la direction de **Philippe Poncet** (Professeur des Universités, LMAP) et **Tatiana Chugunova** (PhD en géostatistique, Total) et enfin dans le cadre de la collaboration scientifique avec les professeurs **Tarik El Rhafiki** (Professeur, Université Polydisciplinaire de Taza-Maroc), **Tarik Kousksou** (MCF-HDR, SIAME, Université de Pau) et **Youssef Zerouali** (MCF, SIAME, Université de Pau).

### 6.1 Présentation générale

D'une manière globale, mes activités de recherche ont pour objet **la modélisation mathématique (déterministe et stochastique), l'optimisation et l'analyse mathématique** des interactions fluide/fluide ou fluide/solide visent à développer, identifier, analyser et simuler de nouveaux modèles permettant d'appréhender et gérer des phénomènes physiques complexes. La connaissance quantitative de ces interactions représente actuellement un enjeu scientifique de taille et trouve de nombreuses applications notamment en géologie (gestion des nappes phréatiques, écoulement souterrain), en ingénierie pétrolière et peut aider à la compréhension des phénomènes géophysiques comme le volcanisme ou la tectonique des plaques et en énergie peut aider à stocker le froid et déterminer les matériaux à changement de phase (MCP) performants pour l'efficacité énergétique du bâtiment (interface air/MCP). **La modélisation mathématique et la simulation numérique** sont fondamentales pour la compréhension et la gestion de ces phénomènes. De plus, **l'identification des paramètres** mis en jeu dans ces phénomènes nécessitent des **méthode d'inversion déterministes et stochastiques** afin de calibrer et recaler les modèles physiques avec les données expérimentales. À ces applications s'est récemment ajoutée celle des bio-médicale, thématique extrêmement riche et dynamique à l'heure actuelle, et nécessitant des modèles capables de reproduire de manière fiable et peu coûteuse le comportement des globules rouges et l'écoulement du sang.

Ces interactions sont classiquement modélisées par des **équations aux dérivées partielles non-linéaires** via un couplage de modèle Darcy, Stokes/Navier-Stokes, des équations de propagation d'onde, des équations d'énergie ou/et des lois rhéologiques. Ces dernières permettent de décrire l'évolution de l'interface entre deux milieux hétérogènes et le champs de vitesse d'un fluide en considérant des conditions de transmission (non)-standards au niveau de l'interface de contact. D'un point de vue mathématique, **l'analyse numérique et théorique** de ces équations est une tâche complexe du fait de leur caractère fortement non-linéaire et de présence des conditions de transmission au niveau d'interface. Cela nous a conduit aux problèmes d'interface, ce qui s'inscrit dans la thématique de sujet de ma thèse.

Mes travaux de thèse se sont inscrits dans cette optique de **développement et de justification mathématique de nouveaux méthodes numériques (type NXFEM) permettant de traiter les interfaces (discontinuités ou interphases) lors d'une interaction fluide-fluide**, et aussi des modèles mathématiques permettant d'étudier des phénomènes complexes. La

construction de ces méthodes s'effectue classiquement par des fines techniques d'analyse numérique et de **développement asymptotique des EDP**, et repose sur des hypothèses restrictives de faible non-linéarité et d'intersection de maillage avec l'interface. En dehors de l'interaction fluide-fluide (qui sont des fluides newtoniens), le cadre d'application de ces méthodes est donc étroit et ne permet pas de considérer l'écoulement des **fluides non-newtoniens** pour des conditions de **transmissions non-standards et d'interface mobiles**. Il est important de noter qu'à l'heure actuelle, il n'existe pas de méthode simple permettant de traiter précisément et facilement les interfaces (mobiles en temps réel) et de simuler correctement le mouvement d'un fluide non-newtonien ou liquide rhéologique complexe (Giesekus, Oldroyd-B...).

Les recherches de projets post-doctoraux (**méthode d'inversion stochastique** en génie pétrolier et géophysique) et les collaborations actuelles en **modélisation du changement de phase, de la cristallisation et du stockage d'énergie** sont donc axées d'une part sur le développement de nouveaux modèles mathématiques (stochastiques ou déterministes) et physiques ayant des domaines de validité étendus, et d'autre part sur les méthodes numériques et d'inversion stochastique pour les problèmes d'optimisation afin d'identifier et quantifier l'incertitude sur les paramètres de modèles. C'est dans ce cadre de recherche que se situe mon travail actuel de collaboration sur la modélisation mathématique et l'inversion déterministe et stochastique.

D'un point de vue global, les thématiques que j'ai pu aborder lors de mes recherches sont les suivantes :

- **Modélisation mathématique et numérique en mécanique des fluides et en rhéologie** : étude du caractère bien posé (existence et unicité de solutions) modélisation asymptotique, interface mobile, volumes finis et éléments finis, NXFEM, Galerkin discontinue, analyse et estimation d'erreur, maillage adaptatif. Simulation numérique d'écoulement sanguin, application aux globules rouges.
- **Problème inverse, algorithme et applications** : étude du caractère bien posé (existence, unicité, stabilité), méthode de régularisation, méthodes déterministes (Newton, gradient conjugué, ...), méthodes stochastiques (Méthodes bayésiennes, Inversion par réseaux de neurones), algorithme génétique, algorithme de Metropolis-Hasting. Applications : géophysique (Tomographie sismique), énergies (matériaux à changement de phase, détermination de la capacité calorifique apparente, cristallisation, stockage d'énergie), génie pétrolier (réservoir).
- **Modélisation stochastique dans les milieux dispersés** : modèle du transfert avec changement de phase (liquide/solide), température de surfusion (caractère stochastique), construction de modèle stochastique, analyse mathématique (existence et unicité de solutions), étude de la sensibilité des paramètres, simulations numériques et validations.

## 6.2 Descriptif des travaux de thèse (2012-2015)

Mes travaux de thèse porte sur l'approximation des problèmes d'interface et d'interphase dans la mécanique des fluides et son objectif ultime était de comprendre l'hémodynamique des globules rouges. La réalisation de cet objectif était divisée en trois étapes d'égale importance : une étape de modélisation, où les méthodes de traitement d'interface sont présentées de façon détaillée, une étape de modélisation asymptotique, où les modèles obtenus sont systématiquement et rigoureusement justifiés, et enfin une étape de modélisation et simulation numérique où ces modèles sont implémentés puis comparés avec les résultats de la littérature.

La première partie de la thèse porte sur le développement de la méthode **NXFEM (Nitsche's eXtended Finite Element Method)** pour des **éléments finis non-conformes  $P^1$**  pour traiter l'interface dans le cadre d'une **interaction fluide-fluide**. Cette méthode a été introduite par

Hansbo [1] sur les approximations triangulaires conformes et elle permet de prendre en compte de façon précise une discontinuité non alignée avec le maillage. Son principe est l'utilisation des espaces d'éléments finis standard, enrichis sur les cellules coupées et le traitement des conditions d'interface manière faible via la méthode de Nitsche.

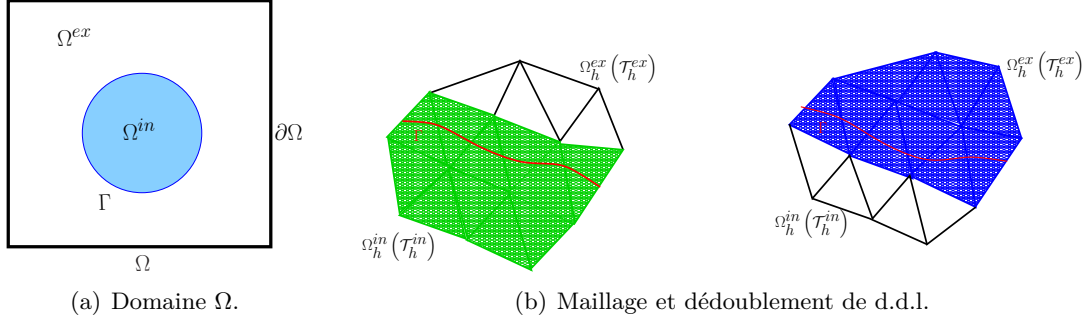


FIGURE 6.1 – Configuration et maillage.

Pour étendre la méthode NXFEM aux éléments finis non-conformes, j'ai pu commencer par les équations de Darcy dans un domaine polygonal  $\Omega$ , de frontière polygonale convexe  $\partial\Omega$  et possède un bord régulier lisse  $\Gamma$  qui le divise en deux sous-domaines  $\Omega^{in}$  et  $\Omega^{ex}$  tel que  $\bar{\Omega} = \bar{\Omega}^{in} \cup \bar{\Omega}^{ex} \cup \bar{\Gamma}$ , voir Fig. 6.1. Le problème modèle est trouver  $u = (u^{in}, u^{ex})$  tel que :

$$(D) \begin{cases} -\operatorname{div}(k\nabla u) = f & \text{dans } \Omega^{in} \cup \Omega^{ex}, \\ u = 0 & \text{sur } \partial\Omega, \\ [u] = 0 & \text{sur } \Gamma, \\ [k\nabla_n u] = g & \text{sur } \Gamma. \end{cases} \quad (6.1)$$

où  $f \in L^2(\Omega)$ ,  $g \in H^{1/2}(\Gamma)$ ,  $n$  est la normale extérieur  $k$  désigne la diffusion telle que  $k(x, y) = k_i$ , si  $(x, y) \in \Omega^i$ ,  $i = in, ex$ . Lors de maillage triangulaires du domaine  $\Omega$ , il est très important de noter que certaines mailles sont coupées par l'interface  $\Gamma$ . Ceci engendre une difficulté au niveau de la majoration d'erreur de consistance lors de l'utilisation de la méthode NXFEM avec **éléments finis non-conformes**. En effet, lors d'une approximation par ses éléments finis où  $I_h := (I_h^{in}, I_h^{ex})$  est l'opérateur d'interpolation, l'inégalité d'une approximation conforme est toujours vérifiée :

$$\|v - I_h v\| \leq Ch^s |v|, \quad C > 0 \quad (s = 1, 2 \text{ selon la "semi-norme"} |\cdot|). \quad (6.2)$$

Cependant, pour toute arête  $e$  de maillage coupée par l'interface  $\Gamma$ , nous avons

$$\int_e I_h^i v^i ds \neq \int_e v^i ds, \quad i = in, ex \quad (6.3)$$

d'où  $\int_e I_h v ds \neq \int_e v ds$  n'est pas satisfaite dans le cas non-conforme.

Pour pallier ce problème, j'ai proposé deux approches pour adapter l'approche de Hansbo et Hansbo [1]. La première approche consiste à modifier les fonctions de **base de Crouzeix-Raviart** sur les triangles coupés, afin d'obtenir un opérateur d'interpolation qui permet de majorer l'**erreur de consistance** sur les arêtes coupées. La seconde approche propose un ajout des termes de stabilisation sur les arêtes coupées (similaires à ceux de la méthode de **Galerkin discontinue** mais prenant en compte la géométrie des triangles coupés) tout **en conservant** l'espace d'approximation de **Crouzeix-Raviart**, afin de compenser l'erreur de consistance due à l'utilisation des éléments finis non-conformes.

Sous certains hypothèses classique de maillage, ces deux techniques ont été étudiées d'un point de vue théorique : **stabilité et existence** de solution au problème variationnel, **robustesse** par rapport à l'interface  $\Gamma$ , **estimation d'erreur a priori**, et aussi elles sont validées numériquement pour le problème elliptique de Darcy (6.1) et comparées avec l'approche originale dans le cas

conforme. En plus, j'ai pu aborder le lien entre les deux approches via la méthode de Galerkin discontinue en prouvant que la deuxième approche converge vers la première approche.

Ces résultats constituent une **justification mathématique complète** du développement de la méthode NXFEM aux éléments finis non-conformes. Le tableau ci-dessous et la Fig. 6 illustrent respectivement l'ordre de convergence et le maillage du domaine  $\Omega$ . Ce travail a été **présenté dans deux congrès** (MAMERN-Pau, ICZP-Jaca), et **publié** dans la revue : *Monografías matemáticas Garcia de Galdeano*, voir [7] pour plus de détails.

N	energy norm	ratio	$L^2$ -norm	ratio
64	3.45e-01	—	2.83e-02	—
256	1.68e-01	2.05	6.27e-03	4.52
1024	8.03e-02	2.09	1.41e-03	4.45
4096	3.95e-02	2.03	3.38e-04	4.17
16384	1.97e-02	2.01	8.21e-05	4.11
65536	9.82e-03	2.00	2.02e-05	4.06

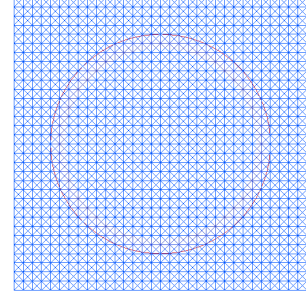


FIGURE 6.2 – Maillage et ordre de convergence.

Au cours de cette partie, j'ai pu étendre la méthode NXFEM avec les éléments finis non-conformes au problème d'interface de Stokes en se basant sur les deux approches proposées précédemment.

$$(S) \left\{ \begin{array}{ll} -\operatorname{div}(\mu \nabla \mathbf{u}) + \nabla p = \mathbf{f} & \text{dans } \Omega^{in} \cup \Omega^{ex}, \\ \operatorname{div} \mathbf{u} = 0 & \text{dans } \Omega^{in} \cup \Omega^{ex}, \\ \mathbf{u} = 0 & \text{sur } \partial\Omega, \\ [\mathbf{u}] = 0 & \text{sur } \Gamma, \\ [\mu \nabla_n \mathbf{u} - pn] = g & \text{sur } \Gamma \end{array} \right.$$

où  $\mu$  désigne la viscosité,  $\mathbf{u}$  et  $p$  représentent respectivement la vitesse et la pression.

Pour ce modèle, j'ai approché, en utilisant la méthode NXFEM, avec des éléments finis non-conformes  $P^1$  pour la vitesse  $\mathbf{u}$  et  $P^0$  pour la pression. J'ai établi la condition **inf-sup** de Babuška-Brezzi sur ces espaces dans le cadre de l'approche consistant à modifier les fonctions de base de Crouzeix-Raviart. Cependant, pour établir une telle condition de compatibilité de la formulation stabilisée, j'ai rajouté de nouveaux **termes de stabilisations** sur les arêtes coupées par l'interface  $\Gamma$  avec des moyennes pondérées pour la vitesse et la pression. Sous les hypothèses classiques de maillage, j'ai obtenu un **ordre de convergence optimal** pour les deux approches avec des constantes indépendantes de la position d'interface et les paramètres de viscosité. Les tests numériques présentées dans Fig. 6.3 valident et supportent l'analyse mathématique et numérique de cette méthode pour le problème de Stokes (pour plus de détails, voir [9]). Ce travail a été présenté dans les congrès *WCCM XI-Barcelone*, *CANUM-Savoie* et publié dans le journal : *Mathematics and Computers in Simulation*, see [6].

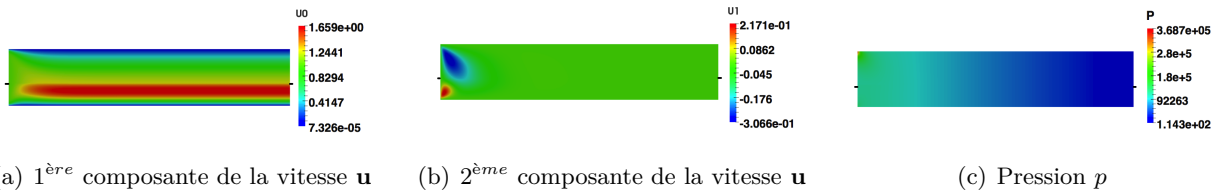


FIGURE 6.3 – Écoulement de Poiseuille biphasique avec profil d'entrée quasi constant.

La deuxième partie de la thèse est dédiée au **problème d'interphase**, à sa **modélisation asymptotique** et son approximation numérique par la méthode NXFEM. L'utilisation de l'ap-

proche asymptotique est assez courante dans la littérature. Ainsi, à cause de la taille des problèmes à résoudre, on tient compte du fait que le domaine considéré (couche mince, lac, faille, membrane,...) a une faible épaisseur. Cette approche est au cœur de nombreuses applications, qui peuvent être industrielles (aérospatiale, milieu pétrolier ...) mais également bio-médicales (écoulement du sang, déformation des globules rouges ...). Dans ce travail, j'ai présenté le problème modèle de type Darcy dans trois domaines dont une couche mince d'épaisseur relativement petite, voir Fig. 6.4-(a) où les inconnues de ce problème dépend du paramètre épaisseur. Comme il est d'usage, un passage

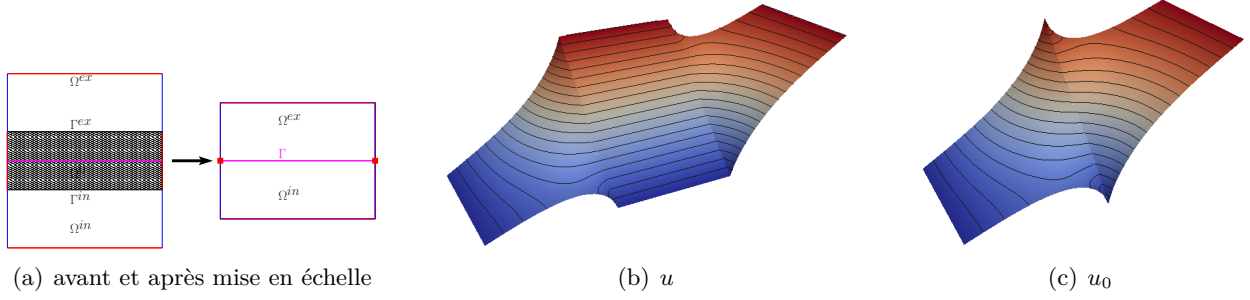


FIGURE 6.4 – Domaine d'acquisition et simulations numériques.

sur les domaines fixes par changement de variable été établi. Ensuite, j'ai présenté la formulation variationnelle de ce problème elliptique dans un domaine contenant une fracture représentant la couche mince. En faisant tendre l'épaisseur vers zéro, j'ai obtenu un modèle asymptotique avec des conditions de transmission non-standard où la fracture est caractérisée par une interface. Le modèle s'écrit ainsi

$$\left\{ \begin{array}{ll} -\nabla \cdot (\mathbf{K} \nabla u_0) &= f \quad \text{dans } \Omega^{in} \cup \Omega^{ex}, \\ u_0 &= 0 \quad \text{sur } \partial\Omega, \\ [u_0 - \chi] &= 0 \quad \text{sur } \Gamma, \\ [\mathbf{K} \nabla u_0 \cdot \mathbf{n}] - \partial_\tau(\alpha \partial_\tau(u_0 - \chi)) &= g \quad \text{sur } \Gamma \end{array} \right. \quad (6.4)$$

où  $K$  est la matrice de diffusion satisfaisant la condition d'ellipticité,  $\partial_\tau$  désigne la dérivée tangente et  $\chi$  désigne que le saut est non nul. Ensuite, j'ai approché le modèle limite (6.4) par la méthode NXFEM avec éléments finis conformes stabilisés aux nœuds d'intersection entre l'interface et les arrêtes de la triangulation. Des résultats théoriques de constance et de stabilité ont été prouvés et des simulations numériques présentant des ordres de convergence optimaux sont réalisées.

De manière similaire, j'ai étendu l'approche asymptotique développée pour le problème de Darcy au problème de Stokes dans trois domaines dont un domaine mince. La justification mathématique du modèle limite où les équations dans cette couche mince sont remplacées par les conditions de transmission a été prouvée par la condition *Inf-Sup* sur des noyaux. Le problème modèle asymptotique ainsi s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{ll} -\mu \Delta \mathbf{u}_0 + \nabla p_0 &= \mathbf{f} \quad \text{dans } \Omega^{in} \cup \Omega^{ex}, \\ \operatorname{div} \mathbf{u}_0 &= 0 \quad \text{dans } \Omega^{in} \cup \Omega^{ex}, \\ \mathbf{u}_0 &= \mathbf{0} \quad \text{sur } \partial\Omega, \\ [\mathbf{u}_0] &= \mathbf{0} \quad \text{sur } \Gamma, \\ u_{0,1}^\Gamma &= 0 \quad \text{sur } \Gamma, \\ [\mu \nabla \mathbf{u}_0 \cdot \mathbf{n} - p_0 \mathbf{n}] - \partial_s \left( \begin{array}{c} -p_0^\Gamma \\ \mu_m \partial_s u_{0,2}^\Gamma \end{array} \right) &= \mathbf{g} \quad \text{sur } \Gamma \end{array} \right. \quad (6.5)$$

avec  $\mathbf{u}_0^\Gamma = (u_{0,1}^\Gamma, u_{0,2}^\Gamma) \in \mathbf{H}^{1/2}(\Gamma)$  qui représente la trace de  $\mathbf{u}_0 \in \mathbf{H}_0^1(\Omega)$  sur  $\Gamma$ . Les deux conditions

de transmission  $[\mathbf{u}_0] = 0$  et  $u_{0,1}^\Gamma = 0$  sur l'interface  $\Gamma$  s'écrivent aussi sous la forme

$$u_{0,1}^\Gamma = u_{0,1}^{ex} = u_{0,1}^{in} = 0; \quad u_{0,2}^\Gamma = u_{0,2}^{ex} = u_{0,2}^{in}. \quad (6.6)$$

Ce modèle limite n'a pas été traité durant la thèse, mais **une collaboration dans ce sens a été entamé en fin 2019 pour finir cette partie. Le développement informatique a été fait et un papier est en préparation et accessible sur une simple demande.** À la fin de cette partie, des tests numériques pour des failles droite et courbe sont présentés et sont similaires aux résultats trouvés par Jaffre et al. [21] avec la décomposition de domaine. Ce travail a été **présenté** dans la conférence *NMMFTPM-Croatia* et a fait l'objet d'un article paru dans la revue *Applicable Analysis*, [8].

La troisième partie de la thèse est consacrée à la **modélisation** de la membrane d'un **globule rouge** par un fluide non-newtonien. Ici, je m'intéresse exactement au comportement mécanique des globules rouges et à l'écoulement sanguin. Pour mieux comprendre ce phénomène, j'ai décrit la membrane cellulaire par un modèle rhéologique viscoélastique non-newtonien et non-linéaire de **Giesekus** [11] dans un milieu de faible épaisseur. Le plasma et le cytoplasme ont décrits par les équations de Stokes dans deux domaines séparés par membrane du globule. Une géométrie illustrant cette situation a été présenté dans la Fig. 6.5-(a). Le problème d'interphase complet s'écrit alors :

$$\left\{ \begin{array}{ll} -\operatorname{div} \underline{\boldsymbol{\tau}} + \nabla p = \mathbf{f} & \text{dans } \Omega, \\ \lambda_m \underline{\boldsymbol{\tau}} + \frac{\lambda_m}{2\mu_m} \underline{\boldsymbol{\tau}} \cdot \underline{\boldsymbol{\tau}} + \underline{\boldsymbol{\tau}} = 2\mu_m \underline{\mathbf{D}}(\mathbf{u}) & \text{dans } \Omega^m, \\ \underline{\boldsymbol{\tau}} = 2\mu \underline{\mathbf{D}}(\mathbf{u}) & \text{dans } \Omega^{in} \cup \Omega^{ex}, \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 & \text{dans } \Omega. \end{array} \right. \quad (6.7)$$

où  $\lambda_m$  est le temps de relaxation,  $\mu_m$  est la viscosité,  $\underline{\boldsymbol{\tau}}$  est dérivée convectée contravariante dans le cas stationnaire :  $\underline{\boldsymbol{\tau}} = \mathbf{u} \cdot \nabla \underline{\boldsymbol{\tau}} - \underline{\boldsymbol{\tau}} \nabla \mathbf{u}^T - \nabla \mathbf{u} \underline{\boldsymbol{\tau}}$  et  $\underline{\mathbf{D}}(\mathbf{u})$  est le tenseur des contraintes donné par  $\underline{\mathbf{D}}(\mathbf{u}) = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + {}^t \nabla \mathbf{u})$ . Ce modèle est complété par les conditions de bord sur  $\partial\Omega$  et celles de transmissions standard sur les interfaces  $\Gamma^{in}$  et  $\Gamma^{ex}$  :

$$\mathbf{u}|_{\partial\Omega} = \mathbf{0}, \quad [\mathbf{u}]|_{\Gamma^{in} \cup \Gamma^{ex}} = \mathbf{0}, \quad [(\underline{\boldsymbol{\tau}} - p\mathbf{I}) \cdot \mathbf{n}]|_{\Gamma^{in} \cup \Gamma^{ex}} = \mathbf{g}. \quad (6.8)$$

Sous des hypothèses asymptotiques sur les coefficients, j'ai passé formellement à la limite pour obtenir un modèle asymptotique avec des conditions de transmissions non-standard sur l'interface modélisant la membrane. La justification mathématique de modèle asymptotique n'a pas été faite ainsi que son approximation numérique. Cependant, des simulations numériques (voir Fig. 6.5 (b-c-d)) ont été faites par PolyFlow et présentées dans les journées : *Bordeaux-Pau-Toulouse* à Anglet et *GDR Metice-MAP5* à l'Université Paris-Dauphine.

En parallèle de la recherche et le monitorat à l'Université de Pau, j'ai également investi dans le **développement informatique en C++** de la méthode NXFEM avec les éléments finis non-conformes dans la **librairie CONCHA**<sup>1</sup>, initiée par le professeur **Roland Becker** (Université de Pau) et son équipe Projet INRIA-Bordeaux pour la simulation en mécanique des fluides.

### 6.3 Descriptif des travaux de contrats post-doctoraux (2015-2019)

Il s'agit ici de présenter brièvement les projets post-doctoraux sur lesquels j'ai travaillé pendant les trois années après la soutenance de ma thèse. Ces deux postes sont destinés complètement à la recherche industrielle et ne me permet pas d'accès à l'enseignement et de faire des publications vu le caractère confidentiel des projets.

1. COmplex flow simulation Codes based on High-order and Adaptive methods



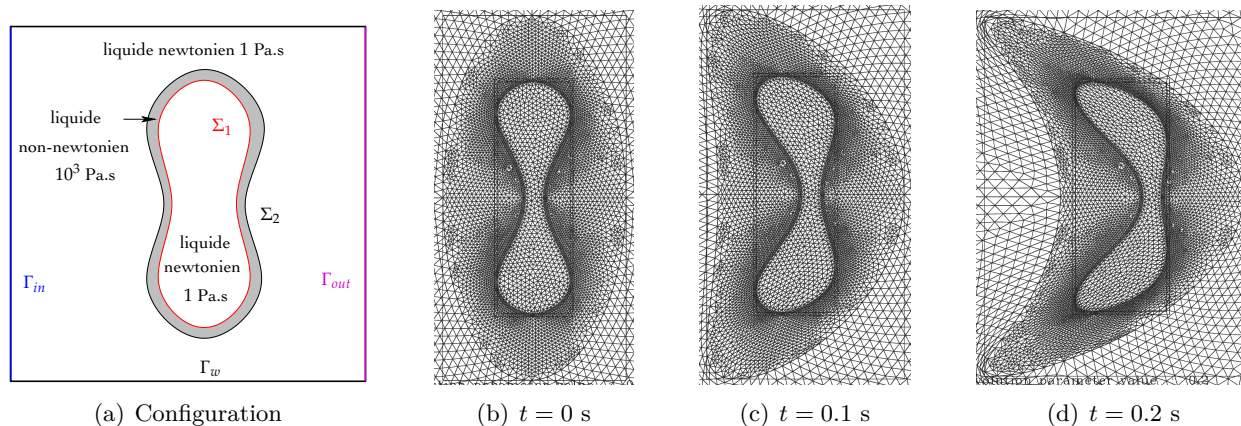


FIGURE 6.5 – Domaine d'acquisition et RBC dans un écoulement de Poiseuille (orientation 90°).

- *Mon premier projet post-doctoral de 18 mois (Octobre 2015-Avril 2017)* s'est déroulé au sein de l'organisme pétrolier de recherche appliqué (OPERA) en collaboration avec Reda BAINA (directeur d'OPERA et PhD en géophysique). C'est un projet **confidentiel** qui porte sur les **"méthodes d'inversion stochastique en tomographie sismique"**. Ma contribution est le développement d'une méthode stochastique innovante afin de quantifier l'incertitude sur les paramètres du problème inverse en tomographie sismique non-linéaire, puis la réalisation d'un code de calcul intégré dans le logiciel interne de l'organisme OPERA, ainsi qu'un rapport technique qui résume la modélisation mathématique, la méthode inverse, l'analyse mathématique (stabilité, existence de solution, estimation d'erreur) et les simulations numériques pour quantifier l'incertitude et reproduire la solution de problème inverse (paramètres statistiques, région de confiance, histogrammes, densités marginales).
- *Mon deuxième projet post-doctoral de 16 mois (Novembre 2017-Février 2019)* a été réalisé au sein de Centre Scientifique et Technique Jean Féger de Total (Tatiana Chugunova, PhD en géostatistique) en cotutelle avec l'Université de Pau et des Pays de l'Adour (Philippe Poncet, Professeur), dont le projet **confidentiel** s'intitule **"méthode inverse pour conditionner les champs aléatoires avec les contraintes de connectivités"**. Pendant ce post-doctorat, j'ai contribué d'abord à la réalisation du planing de projet, la modélisation mathématique et numérique, puis j'ai entamé la résolution du problème inverse et le développement d'un code de calcul. Enfin, j'ai rédigé un rapport technique en détaillant l'analyse mathématique et le manuel d'utilisation du code avec des tests numériques.

## 6.4 Collaborations scientifiques (2020 - ?)

En parallèle avec mon poste d'enseignant formateur au Centre ETUD'Plus et le statut aut entrepreneur, j'ai entamé une collaboration scientifique avec les professeurs **Tarik El Rhafiki** (Professeur, Université Polydisciplinaire de Taza-Maroc), **Tarik Kousksou** (MCF-HDR, SIAME, Université de Pau) et **Youssef Zerouali** (MCF, SIAME, Université de Pau) autour de la **modélisation mathématique et l'optimisation** respectivement dans la **caractérisation de matériaux à changement de phase (MCP)** et les **échanges d'énergie** plus précisément le stockage (cristallisation) et le déstockage (fusion) due à la surfusion. Les références citées dans cette partie sont regroupées dans la bibliographie située en fin de dossier. Mes articles ou prépublications sont accessibles sur ma page web [hamoelotmany.github.io](https://hamoelotmany.github.io), ou par mail sur une simple demande.

- Le premier thème concerne l'étude numérique de la caractérisation de MCP, notamment

l'étude de leur changement de phase solide-liquide. En effet, les matériaux à changement de phase constituent une solution technologique économique et innovante de stockage d'énergie [14, 15]. Cet intérêt a suscité de nombreux travaux numériques et expérimentaux sur les transferts de chaleur avec changement de phase solide/liquide. Dans la conception de MCP pour des applications de construction en bâtiment, la plupart des modèles numériques passent outre au moins un de ces trois phénomènes pour réduire les fluctuations de température intérieure et améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, à savoir la surfusion, la convection naturelle dans la phase liquide et la présence d'une faible fraction d'impuretés solubles. A notre connaissance, le problème de la surfusion des matériaux impurs reste encore moins considéré dans la littérature. Les travaux existants traitent soit le problème de déplacement de l'interface en adoptant des propriétés simplifiées du matériau [16, 17]. Une modélisation mathématique de ce problème d'interaction de matériaux composite (mortier et MCP) a été proposée sous certains hypothèses. Ce modèle s'écrit ainsi

$$\rho_c c_c \frac{\partial T}{\partial t} = k_c \Delta T(x, t) - \delta \rho_{cpm} \frac{\partial f}{\partial t} \quad (6.9)$$

où  $\rho_c$  et  $\rho_{cpm}$  sont respectivement la densité volumique ( $Kg/m^3$ ) et la densité volumique ( $Kg/m^3$ ) de MCP,  $k_c$  est la conductivité thermique ( $W/(m.K)$ ) du matériau composite,  $T$  est la température ( $^{\circ}C$ ),  $c_c$  est la capacité thermique apparente ( $kJ/(kg.K)$ ),  $f$  est la fraction liquide du MCP et  $\delta$  est le symbole de Kronecker.

Dans cette modélisation, la valeur de  $\delta$  détermine l'unicité du modèle mathématique et la méthode utilisée pour caractériser le matériau à changement de phase. Si  $\delta = 0$ , le modèle (6.9) illustre le transfert de chaleur par conduction où la chaleur latente est intégrée dans le terme d'enthalpie tel que  $c_c = \frac{dh(T)}{dT}$ , et il utilise la méthode d'enthalpie. Si  $\delta = 1$ , le modèle (6.9) modélise l'interaction entre le mortier et le MCP via la méthode de la source de chaleur.

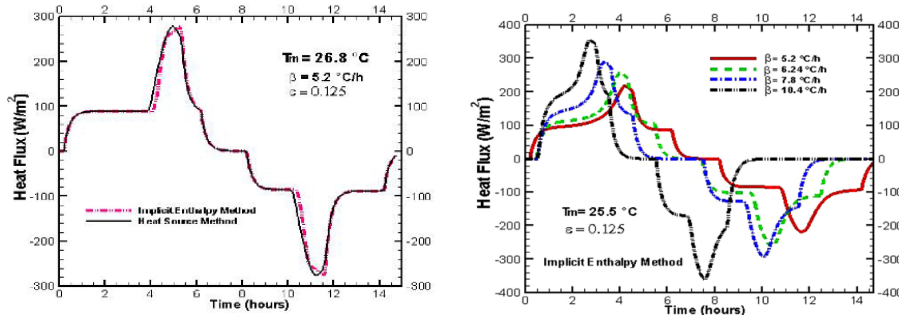


FIGURE 6.6 – Simulations numériques

L'originalité de cet axe consiste en présentation de modèles mathématiques et physiques basés sur quatre techniques : la technique de capacité thermique apparente, la technique d'enthalpie (explicite et implicite) et technique de source de chaleur pour résoudre le problème du transfert de chaleur en 1D appliqué à un matériau de construction composite (mortier). À ce stade, nous avons adopté la méthode des **volumes finis** pour résoudre les quatre modèles physiques. Les modèles numériques mis en œuvre ont été vérifiés par comparaison avec les résultats expérimentaux de la littérature (voir Fig. 6.6), et **ont été publiés** dans le journal of *Energy Storage*, [5]

- Le second thème traite **la modélisation stochastique et l'identification** qui scelle à la fois deux applications :
  - **le déstockage d'énergie lors d'une cristallisation des particules dans une cuve.** Ici, nous sommes intéressés à modéliser mathématiquement l'effet la cristallisation d'une eau méta-stable dispersée à l'intérieur d'une émulsion. L'idée fondamentale de construction



du modèle mathématique est de combiner deux techniques, respectivement celle introduite par Vallet et al. [19] pour leur modèle stochastique en cristallisation, et le modèle de Black-Scholes [18]. Dans [19], la dérivation du modèle repose sur les équations aux dérivées partielles stochastiques avec une volatilité inconnue associé au processus de Wiener, afin de décrire l'effet stochastique et le dégagement de la chaleur lors de cristallisation. Dans [18], les auteurs proposent quant à eux de préciser de manière explicite la volatilité et la diffusion, permettant ainsi de diminuer la complexité du modèle. L'idée sous-jacente à la combinaison de ces deux techniques est de préserver les équations différentielles stochastiques de modèle de Black-Scholes tout en précisant explicitement la volatilité et la diffusion associée. En appliquant cette technique, on peut dès lors construire le modèle stochastique sous forme d'une combinaison d'équation d'énergie, de lois de nucléation et des équations différentielles stochastiques pour décrire le comportement aléatoire de la cristallisation. Le modèle s'écrit ainsi dans le domaine d'acquisition  $Q_T = [0, +\infty[ \times \mathbb{R}$  :

$$\begin{cases} \rho c_p \frac{\partial u(t, x)}{\partial t} = \text{div}(k \nabla u(t, x)) + \rho_0 \mathbb{P} L_F \frac{\partial \varphi(t, x)}{\partial t}, \\ \frac{\partial \varphi(t, x)}{\partial t} = (1 - \varphi(t, x)) J(u(t, x)) + (1 - \varphi(t, x)) \sigma(u(t, x)) \frac{\partial W_t}{\partial t} \end{cases} \quad (6.10)$$

où  $k$  est la conductivité thermique de l'émulsion,  $\rho$  est la densité massique,  $c_p$  est la capacité spécifique de chaleur,  $\rho_0$  est la densité massique de l'eau et  $L_F$  est la chaleur latente de fusion. Dans ce modèle, les fonctions  $J$  et  $\sigma$  désignent respectivement la probabilité de nucléation et la diffusion utilisé pour mettre en valeur l'effet du mouvement Brownien  $W_t$  lors de la cristallisation. Leurs expressions s'écrivent ainsi

$$J(u) = \begin{cases} \beta_0 \exp\left(-\frac{\beta_1}{u(u - T_m)^2}\right) & \text{si } u < T_m \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}, \quad \sigma(u) = \begin{cases} \alpha_0 + \alpha_1 (u - T_m)^2 & \text{si } u < T_m \\ \alpha_0 & \text{sinon} \end{cases}$$

où  $(\alpha_0, \alpha_1, \beta_0, \beta_1)$  sont des constantes positives qui nous permettent de calibrer les données expérimentales. D'un point de vue mathématique, nous avons montré que le modèle stochastique (6.10) admet une solution unique  $(u, \varphi)$  dans son espace de définition, sous certaines hypothèses de croissance linéaire et de lipschitzieneté, voir [10]. D'un point

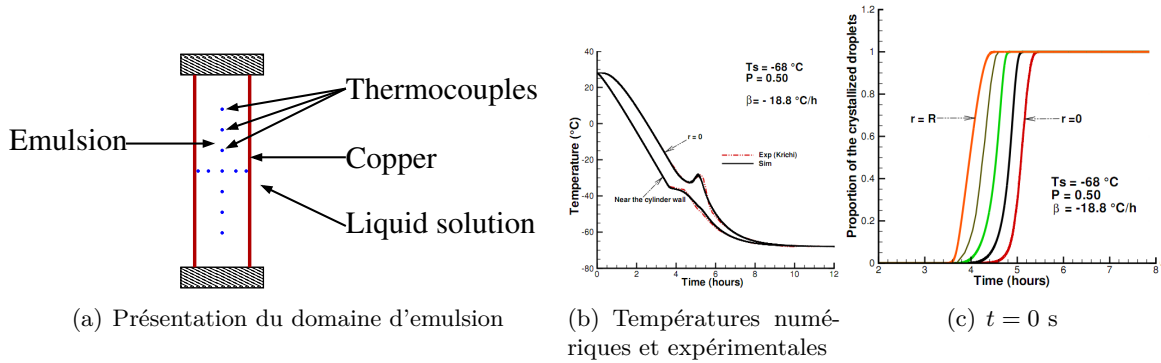


FIGURE 6.7 – Solution de modèle stochastique.

de vue physique, le système modélisé comporte une solution liquide et des thermocouples contenu dans un cylindre, voir le schéma illustré dans Fig. 6.7-(a). Ensuite, nous avons procédé à la résolution numérique de modèle stochastique (6.10) en considérant la méthode de volumes finis et le schéma de Milshtein pour résoudre respectivement l'équation d'énergie et les équations différentielles stochastiques. Le modèle développé a été codé sous l'environnement FORTRAN. Pour comparer les résultats numériques aux résultats expérimentaux obtenue par Krichi ([20]), une méthode d'inversion basée sur l'algorithme génétique a été utilisée pour identifier les paramètres  $\alpha_0$  et  $\alpha_1$  afin de calibrer le modèle stochastique.

De plus, nous avons vérifiés et testés avec succès le modèle stochastique proposé à l'aide des résultats expérimentaux. Les résultats de tests de sensibilité sur le modèle avec des variations des paramètres ont été présentés. Ce travail a été **publié** dans la revue *Energy Storage*, [4].

En parallèle à ce travail, un papier purement mathématique sur l'**existence et l'unicité** de la solution des **équations à dérivées partielles stochastiques** liées à ce modèle physique, a été **soumis (under reviewer) pour publication** dans le journal of *Stochastic Processes and their Applications*, [10].

- **la fusion de matériaux** : On s'intéresse à **la modélisation mathématique et la reconstruction de source de chaleur**. Le problème d'identification consistant à mesurer la fonction source associée à un opérateur de type EDP est difficile et a fait l'objet de nombreuses travaux. Il existe dans la littérature de nombreuses méthodes itératives pouvant être utilisées pour traiter ce problème [22]. Toutefois elles ont comme défauts commun d'être sensibles à leur point d'initialisation et coûteuses en temps de calcul (nombreuses évaluations du problème direct). Dans le cadre d'une reconstruction de source de chaleur volumique pour un problème de transfert en  $1D$ , nous considérons le modèle d'advection dans le domaine spatio-temporel  $Q_{L_{tank}} = ]0, L_{tank}[ \times ]0, +\infty[$  sous forme d'une cuve, voir Fig. ???. Le modèle s'écrit :

$$\rho c_p \frac{\partial u}{\partial t}(x, t) + \rho c_p v_f \frac{\partial u}{\partial x}(x, t) = \lambda \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, t) + \Phi(x, t), \quad (x, t) \in Q_{L_{tank}} \quad (6.11)$$

où  $c_p$  est la capacité spécifique de chaleur,  $\rho$  est la densité volumique,  $u(t, x)$  est la température,  $\Phi$  représente la source de chaleur par unité de volume créé par les capsules sphériques. Le champ de vitesse  $v_f$  peut être décomposé en une composante constante  $v_0$  et une fluctuation  $v_1$  :  $v_f(t, x) = v_0 + v_1(t, x)$ . Ici, nous considérons que le champ de vitesse  $v_f$  est constant le long de l'expérience afin de simplifier la résolution du problème inverse. L'équation (6.11) est complétée par les conditions initiales et aux limites :  $\frac{\partial u}{\partial x}(x, t)|_{x=L_{tank}} = 0$  et la température de plateau  $u_p$  varie suivant une loi linéaire en fonction du temps  $t$  :  $u_p(0, t) = \beta t + T_0$ ,  $\beta > 0$ .

Afin de reconstruire la fonction source  $\Phi$ , nous avons proposé une décomposition par les fonctions B-splines, puis nous avons présenté le modèle inverse. La résolution de ce problème est basé sur l'algorithme génétique et la méthode de l'écart à la réciprocité. Des essais numériques pour la reconstruction du flux via le problème inverse ont été présentés avec succès. **Ce travail fait ainsi l'objet d'un article paru dans la revue *Energy storage*.**

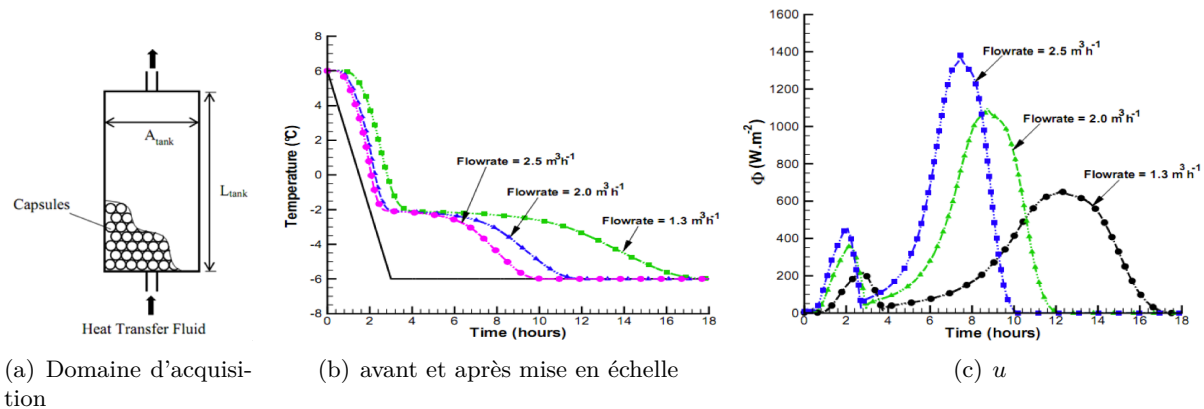


FIGURE 6.8 – fig :fusion

En parallèle à ce travail, un papier purement mathématique sur l'**existence et l'unicité au sens d'Hadamard du problème inverse** est en cours de préparation.

## 7. Projet de recherche

Dans les années à venir, je compte développer trois principaux axes de recherche s'inscrivant dans la continuité des travaux exposés dans le rapport de recherche, en particulier dans la section 6 dont nous utiliserons librement les notations et les résultats. Je m'intéresse tout d'abord à plusieurs questions précises dans la ligne directe de ces travaux. J'en expose quelques unes plus loin.

Par ailleurs au contact de mes collaborateurs actuels, j'ai développé un intérêt certain pour des théories et des applications en système énergétiques qui pourrait être le cadre de mes recherches à plus long terme : la théorie des problèmes inverses pour lesquelles il est possible de généraliser les travaux de section 6 en utilisant l'inversion par réseaux de neurones et les méthodes d'inversion stochastique. Les applications envisageables dans ce sens, on trouve l'identification de la capacité calorifique apparente et la valorisation de l'audit énergétique.

Vu mes divers collaborations sur des sujets différents et mes formations académiques, je suis tout à fait disposé à me consacrer à de nouveaux thèmes de recherche selon les besoins de l'équipe de recherche que j'intégrerai. Les références citées dans cette partie sont regroupées dans la bibliographie située en fin de dossier.

### 7.1 Interactions fluide-fluide et application aux globules rouges

Ce premier axe de recherche porte sur la **modélisation mathématique et numérique des interactions fluide-fluide** et son application aux **globules rouges**, en particulier à la modélisation de la membrane de globules rouges ayant des caractéristiques visco-élastiques. Il se situe dans la continuité logique de mes travaux que j'ai effectués durant ma thèse sous la direction de **Mme D. CAPATINA** (MCF-HDR, Université de Pau) et **M. D. GRAEBLING** (Professeur, Université de Pau).

Après avoir justifié le choix de modéliser la membrane par un fluide non-newtonien Giesekus (voir [11]), je m'intéresse aux questions suivantes :

- la **justification mathématique** du passage à la limite dans l'approche asymptotique du modèle (6.7) présenté dans la section 6. Ici, la principale difficulté est liée au passage à la limite pour la vitesse  $u$  et le tenseur des contraintes  $\tau$ .
- l'**approximation numérique** du problème limite avec des conditions de transmissions non-strandard par la **méthode NXFEM** (éléments finis conformes [1] et non-conformes [9]). D'après, mes premières réflexes, la principale difficulté inhérente de cette étude est la stabilité du problème en utilisant la **condition inf-sup**.
- le développement d'un code de calcul pour réaliser des tests numériques.
- le traitement numérique d'une **interface mobile** pour illustrer la déformation et le mouvement des globules rouges.

### 7.2 Modélisation stochastique d'interaction fluide-fluide

Ce deuxième axe de recherche est consacré aux interactions fluide-fluide dans un domaine aléatoire. Il s'agit ici de **développer une méthode innovante** combinée de la méthode NXFEM et la méthode spectrale stochastique qui prendra le nom **NXSFEM**. L'idée de cette thématique est née suite à mes diverses expériences et formations en modélisation stochastique et la technique XS-FEM (eXtended Stochastic Finite Element Method). SXFEM a été introduite par Nouy et al ([23], 2008) pour les interactions fluide-structure, et basée sur un mariage entre la méthode des éléments

finis étendue (XFEM) et les méthodes stochastiques spectrales. Pour développer la méthode **NXS-FEM**, je m'intéresse à plusieurs questions précises dans la ligne directe de la méthode XSFEM [23] en considérant d'abord un problème d'interface de Darcy et ensuite le problème d'interface de Stokes.

- la présentation de formulation variationnelle du problème d'interface (Darcy et Stokes).
- la consistance et la stabilité de la méthode NXS-FEM.
- l'estimation a priori et l'ordre de convergence de la méthode.
- Simulations numériques et validations de la méthode. J'espère donc développer cette méthode numérique pour les interactions fluide-fluide ou fluide/solde.

## Contrôlabilité et problème inverse pour quelques EDP en système énergétique

Cette partie de mon projet de recherche est totalement indépendante des deux premières axes. Mon intérêt pour ces questions liées aux contrôlabilités et aux problèmes inverses de certains EDP est né des discussions avec **mes collaborateurs physiciens T. Kousksou et Y. Zerouali** autour de la détermination explicite de la capacité calorifique apparente, voir la section 6. Pour ce faire, je souhaiterais adapter le procédé d'Isakov [22] et celui de Hussein et al. [26]. Je propose ainsi de répondre aux questions suivantes :

- Formulation de modèle physique direct décrivant les matériaux à changement de phase
- Formulation de problème inverse et adjoint pour identifier la capacité calorifique apparente.
- Étude de la stabilité au sens d'Hadamard du problème.
- Détermination explicite de la capacité calorifique apparente.
- Reconstruction et réalisation des cas-tests.

Par ailleurs, j'espère adapter et développer les méthodes d'inversion stochastique ([24, 25]) telle que : l'approche bayésienne et l'inversion par réseaux de neurones afin de quantifier l'incertitude sur les paramètres de modèle physique.

**Environnement scientifique :** Je compte continuer mes collaborations avec T. El Rhafiki (Université Pluridisciplinaire de Taza, Maroc), T. Kousksou (Université de Pau) et Y. Zerouali (Université de Pau), dont les recherches portent sur le stockage d'énergie et les matériaux à changement de phase, afin de produire des cas-test réels.

## 8. Responsabilités administratives et animations scientifiques

---

### Responsabilités administratives

- 2019-2021**    **Responsable** des cours et travaux dirigés en mathématiques, Centre de formations et cours de soutien ETUD'Plus.
- 2013-2015**    **Membre** élu du conseil du laboratoire de Mathématiques et leurs Applications de Pau, Université de Pau.  
Le rôle du Conseil du laboratoire consiste entre autres à examiner les candidatures pour des contrats doctoraux au sein du laboratoire, à établir un classement pour l'attribution des bourses ministérielles, et à inviter les chercheurs et les doctorants pour effectuer des séjours ou présenter leurs travaux.
- 2013-2015**    **Membre** élu du conseil de l'Institut pluridisciplinaire de recherche appliquée (IPRA), université de Pau.  
Le rôle du Conseil de la fédération IPRA consiste à représenter les différentes unités de recherche dans l'université et à attribuer les financement pour les porteurs de projet selon la stratégie du développement de chaque unité. Elle permet aussi d'exposer les difficultés auxquelles sont confrontées ses différentes structures (en terme de budget et de fonctionnements par exemple), afin de maintenir leurs offres et leurs niveaux.

### Animations scientifiques

- 2013-2014**    **Co-organisateur et co-animateur** du séminaire des doctorants du Laboratoire de Mathématiques et leurs Applications de Pau.  
Les séminaires ont lieu chaque semaine, et permettent aux doctorants d'effectuer un premier exposé ou de préparer leurs présentations pour des éventuelles conférences. Cet exposé est faite de manière vulgarisé ou détaillée afin d'être accessible pour les doctorants des autres équipes du laboratoire de mathématiques et leurs applications de Pau.
- 2013-2014**    **Co-organisateur et co-animateur** du groupe de recherche pour les lycéens palois (10 participants), Département de Mathématiques, Université de Pau.  
Ce groupe de recherche est animé par **Walter Tinsson** (MCF-HDR) et moi-même. Il est destiné à présenter les mathématiques sous toutes leurs formes via des ateliers pratiques, des exposés, des expositions et des vidéos.
- 2013-2014**    **Co-auteur** du livre "guide des doctorants" de l'école Doctorale des sciences exactes ED211, Université de Pau.

## 9. Bibliographie

---

- [1] A. HANSBO AND P. HANSBO, *An unfitted finite element method, based on Nitsche's method, for elliptic interface problems. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **191**(47–48) :5537–5552, 2002.
- [2] H. EL-OTMANY, D. CAPATINA, S.D. SANTACREU, D. GRAEBLING, *Modélisation du comportement de globules rouges dans un écoulement sanguin*, Journées Bordeaux-Pau-Toulouse, Anglet, 19-20 septembre 2013. HAL Id : hal-01051607, version 1, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01051607>.
- [3] M.A. BENTAHHER, H. EL-OTMANY, T. KOUSKSOU, T. EL RHAFIKI, Y. ZEROUALI. *Inverse method to describe crystallization of undercooled water in cold storage tank. Journal of energy storage*, **36**, April 2021, 102404, [🔗](#).
- [4] H. EL-OTMANY, T. KOUSKSOU, T. EL RHAFIKI, Y. ZEROUALI, *A Brownian motion model to describe a random crystallization of undercooled water dispersed within emulsions. Journal of energy storage*, **35**, March 2021, 102273, [🔗](#).
- [5] Y.KHATTARI, H. EL-OTMANY, T. EL RHAFIKI, T. KOUSKSOU, A. AHMED, E. BEN-GHOULA, *Physical models to evaluate the performance of impure PCM dispersed in building materials. Journal of energy storage*, **31**, 1016612020, 2020. [🔗](#).
- [6] D. CAPATINA, H. EL-OTMANY, D. GRAEBLING, R. LUCE, *An extension of NXFEM to nonconforming finite elements*. Publié dans *Mathematics and Computers in Simulation*, **137**, pp. 226-245, 2017. [🔗](#).
- [7] D. CAPATINA, S.D. SANTACREU, H. EL-OTMANY, D. GRAEBLING, *Nonconforming finite element approximation for an elliptic interface problem with NXFEM method. Monografías matemáticas Garcia de Galdeano*, **40**, pp. 43-52, 2015. [🔗](#).
- [8] D. CAPATINA, N. BARRAU, H. EL-OTMANY, R. LUCE, *Nitsche's Extended Finite Element Method for a Fracture Model in Porous Media. Journal of Applicable Analysis*, **95**, pp. 2224-2242, 2015. [🔗](#).
- [9] H. EL-OTMANY, *Nitsche's Extended Finite Element Method for a Fracture Model in Porous Media. PhD thesis*, Université de Pau, 2015. [🔗](#).
- [10] H. EL-OTMANY, T. EL RHAFIKI, T. KOUSKSOU, *Stochastic modelling for describing crystallization droplets in water emulsion. Under reviewer in Stochastic Processes and their Applications*, [🔗](#).
- [11] H. GIESEKUS, *Constitutive equations for polymer fluids based on the concept of configuration-dependent molecular mobility : a generalized mean-configuration model*. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, **11** :69–109, 1982.
- [12] J. JOIE, *Simulation numérique des écoulements de liquides polymères. PhD thesis*, Pau (France) : University of Pau, 2010.
- [13] J. JOIE, D. GRAEBLING, *Numerical simulation of polymer flows using non-conforming finite elements. Computers & Fluids*, **79** :178–179, 2013.
- [14] H. MELHING, L. F. CABEZA, *Heat and cold storage in PCM : An up to date introduction into basics and applications*, Springer (2008).
- [15] NABEEL S. DHADAN, J. M. KHODADADI, *Melting and convection of phase change materials in different shape containers : A review. Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **43** (2015), 449-477.

- [16] S. JANA, S. RAY, F. DURST, *A numerical method to compute solidification and melting processes*, *Applied Mathematical Modelling*, **31** (2007) 93-119.
- [17] J. BONY, S. CITHERLET, *Numerical model and experimental validation of heat storage with phase change materials*, *Energy Build.*, **39** (2007), 1065-1072.
- [18] F. BLACK, M. SCHOLES, *The pricing of options and corporate liabilities*. *Journal of Political Economy*, vol. 81, No. 3, pp. 637-654, May-June 1973.
- [19] G. VALLET, D. TRUJILLO, *A stochastic modelling of crystallization in a dispersed medium*. *Mathematical and computer modelling*, **36** (2002) 157-172.
- [20] M. KRICHI, *Etude des transferts thermiques dans des systèmes dispersés subissant des transformations de phases*. PhD thesis, Univeristy of Pau, 1992.
- [21] N. FRIH, V. MARTIN, J.E. ROBERTS, AND A. SAADA, *Modeling fractures as interfaces with nonmatching grids*. *Comput. Geosci.*, pages 16 :1043–1060, 2012.
- [22] V. ISAKOV, *Inverse source problems*. *American Mathematical Society*, 1989.
- [23] A. NOUY, A. CLÉMENT, F. SCHOEFS, N. MOËS, *An extended stochastic finite element method for solving stochastic partial differential equations on random domains*. *CMAME*, 197(51-52) :4663-4682, 2008.
- [24] J. IDIER, ED., *Bayesian Approach to Inverse Problems*, *hISTE Ltd and John Wiley & Sons Inc.*, London, 2008.
- [25] A. TARANTOLA, *Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation*, SIAM, 2005.
- [26] M. S. HUSSEIN, D. LESNIC, M.I. ISMAILOV, *An inverse problem of finding the time-dependent diffusion coefficient from an integral condition*. *Math. Meth. Appl. Sci.*, 39 : 963–980. doi : 10.1002/mma.3482, 2016.



# 10. Annexes

## 10.1 Lettres de recommandation

- **Lettres de recommandation pour l'aspect recherche** : Les personnes suivantes connaissent particulièrement mon travail et pourront être consultées sur mes aptitudes de recherche.
  - **Reda Baina**, Directeur de l'Organisme Pétrolier de Recherche Appliquée, France.
  - **Daniela Capatina**, Maître de Conférences-HDR à l'Université de Pau, France.
  - **Didier Graebing**, Professeur à l'Université de Pau, France.
  - **Tarik Kousksou**, Maître de Conférences-HDR à l'Université de Pau, France.
  - **Youssef Zeraouli**, Maître de Conférences à l'Université de Pau, France.
  - **Philippe Poncet**, Professeur à l'Université de Pau, France.
- **Lettres de recommandation pour l'aspect enseignement** :
  - **Karine Garimbay**, Responsable du centre ETUD'Plus ✉ [etude.plus@orange.fr](mailto:etude.plus@orange.fr).
  - **Laurent Levi**, Maître de Conférences-HDR et ancien directeur de département de mathématique à l'Université de Pau ✉ [laurent.levi@univ-pau.fr](mailto:laurent.levi@univ-pau.fr)
  - **Walter Tinsson**, Maître de Conférences-HDR et Directeur de département de mathématique à l'Université de Pau, France ✉ [walter.tinsson@univ-pau.fr](mailto:walter.tinsson@univ-pau.fr)

## 10.2 Liste de personnes à contacter à toutes fin utiles

- **Reda Baina**, PhD, Directeur de l'organisme Pétrolier de Recherche Appliquée, France.  
✉ [reda.baina@univ-pau.fr](mailto:reda.baina@univ-pau.fr)
- **Daniela Capatina**, Maître de Conférences-HDR à l'Université de Pau, France.  
✉ [daniela.capatina@univ-pau.fr](mailto:daniela.capatina@univ-pau.fr)
- **Allal Guessab**, Professeur à l'Université de Pau, France.  
✉ [allal.guessab@univ-pau.fr](mailto:allal.guessab@univ-pau.fr)
- **Didier Graebing**, Professeur à l'Université de Pau, France.  
✉ [didier.graebing@univ-pau.fr](mailto:didier.graebing@univ-pau.fr)
- **Tarik Kousksou**, Maître de Conférences-HDR à l'Université de Pau, France.  
✉ [tarik.kousksou@univ-pau.fr](mailto:tarik.kousksou@univ-pau.fr)
- **Youssef Zeraouli**, Maître de Conférences à l'Université de Pau, France.  
✉ [youssef.zeraouli@univ-pau.fr](mailto:youssef.zeraouli@univ-pau.fr)
- **Philippe Poncet**, Professeur à l'Université de Pau, France.  
✉ [philippe.poncet@univ-pau.fr](mailto:philippe.poncet@univ-pau.fr)

## 10.3 Pièces jointes

Je donne ici la liste des documents joints à ce dossier de candidature et qui sont aussi accessibles sur ma page web ✉ [hamoelotmany.github.io](https://hamoelotmany.github.io).

- Curriculum vitae (déclaration de candidature détaillée).
- Lettre de motivation.
- Copie du titre de séjour et du passeport.
- Copie du diplôme de grade docteur de l'Université de Pau.
- Rapport de soutenance de thèse et diplôme de doctorat.
- Lettres de recommandation pour l'aspect enseignement.
- Copie des diplômes (Master, ingénierie, Licence).