



Master Mathématiques et applications

Parcours Ingénierie Mathématique

Majeure Ingénierie Mathématique Pour l'Entreprise (IMPE)

Résumés des stages & missions en alternance

2023-2024

Cette brochure rassemble les résumés des missions en alternance ou des stages de fin d'études des étudiant·e·s diplômé·e·s de l'année universitaire 2023-2024. Ce M2 accueille dans le même cursus des étudiant·e·s "classiques" et aussi des apprenti·e·s en partenariat avec le CFA des Sciences. Ce document vise à illustrer la diversité des sujets abordés, la variété des carrières auxquelles elle conduit. A noter que la majeure IMPE comprend deux filières : Probabilités-Statistiques d'une part et Mécanique d'autre part (abrégées respectivement *proba* et *méca* dans la suite).

Responsables IMPE : Frédérique CHARLES, Cindy GUICHARD

Site web du M2 : <https://m2ingmath.math.upmc.fr/impe/>

Liste des étudiants

NOM	Prénom	Lieu	Filière	CFA	Page
ALI MESSAOUD	Hana	LAPP	proba		3
BEKDA	Lilia	ORTEC	proba		4
BOUCHERRAB	Meziane	BNP Paribas	proba		5
BOUCHOUICHA	Mariem	RTE	proba		6
CAI	Bailin	Dandelion International	proba		7
DOUMI	Adam	Emotors	proba		8
DURSUNOGLU	Mahir	Alenia Consulting	proba		9
PACHECO RUIZ	Ricardo J.	SEGULA Technologies	proba		10
BOUKHEMIS	Imène	Dassault Systèmes	méca		11
HAMELIN	Paul-Edouard	EDF Lab Chatou	méca	×	12
NIAMBA	Mohamed	SUMMIT	méca		13
PAILLIEZ	Nicolas	SNCF Réseau	méca	×	14
SECRET	Benjamin	ONERA	méca		15

ALI MESSAOUD Hana

[Stage IMPE proba]

- **Lieu** : Laboratoire d'Annecy de Physique des Particules (LAPP)
- **Titre** : Application des réseaux de neurones en graphes à la reconstruction stéréoscopique des événements du Cherenkov Telescope Array Observatory (CTAO)
- **Encadrant** : VUILLAUME Thomas
- **Dates** : 2 avril - 30 août 2024

Le projet CTAO (Cherenkov Telescope Array Observatory) est un projet d'observatoire international en cours de construction. À terme, avec plus d'une soixantaine de télescopes, il sera le plus grand observatoire gamma terrestre.

CTAO étudie l'univers à très haute énergie en observant les rayonnements gamma émis par les phénomènes violents (supernovae, environnements des trous noirs. . .). Ces rayonnements gamma produisent une gerbe atmosphérique lors de leur entrée dans l'atmosphère, gerbe qui va à son tour émettre une lumière bleue ténue, laquelle est observée par les caméras hypersensibles du CTAO.

L'objectif principal de l'analyse des images produites par les télescopes est de reconstruire, à partir de ces images, la direction, l'énergie, et la classe (protons ou photons gamma).

La méthode standard pour effectuer la reconstruction est la méthode Hillas associée à un algorithme de Random Forest. C'est une méthode assez efficace et robuste, qui effectue une reconstruction (monoscopique) par télescope. Une partie importante de cette reconstruction est la combinaison de l'information en provenance de chaque télescope du réseau : c'est la reconstruction stéréoscopique.

Les réseaux de neurones en graphe (GNNs) apparaissent comme une solution adéquate pour combiner les informations de chaque télescope. Le projet Stereograph se concentre sur l'exploration de cette approche en combinant les données produites par tous les télescopes du site de l'hémisphère nord. L'approche "graphe" a pour but de mettre en relation les observations des différents télescopes, ce qui permettra d'analyser la gerbe sous différents angles et de produire une reconstruction stéréoscopique des événements.

Durant ces cinq mois de stage, j'ai développé un modèle de réseaux de neurones basé sur des graphes. J'ai ensuite mené une recherche d'hyperparamètres en utilisant la plateforme Wandb pour optimiser les performances du modèle. Enfin, j'ai mis en production le code sur le cluster de calcul MUST. À l'issue du stage, les résultats obtenus ont confirmé que l'approche par réseaux de neurones en graphes était prometteuse, permettant une amélioration de la reconstruction des événements gamma par rapport à la méthode Random Forest.

BEKDA Lilia

[Stage IMPE proba]

- **Lieu** : Groupe ORTEC
- **Titre** : Traitement de verbatims ou retours incidents par des méthodes de traitement automatique du langage (NLP) et analyses de weibull
- **Encadrants** : EDELINE Gwenaël, MENAGER Fabien
- **Dates** : 15 avril - 15 octobre 2024

Dans le cadre de ce stage, nous avons étudié et mis en œuvre des méthodes de traitement automatique des verbatims à l'aide de techniques de Natural Language Processing (NLP), en exploitant à la fois des approches supervisées et non supervisées. L'objectif principal était d'extraire des informations pertinentes et les défaillances à partir des données textuelles brutes issues des verbatims, dans le but d'améliorer la compréhension et l'analyse des retours clients ou utilisateurs.

D'un côté, les méthodes supervisées, telles que SVM, Random Forest et XGBoost, ont été employées pour prédire des catégories préétablies ou des scores à partir des verbatims annotés. De l'autre, des méthodes non supervisées comme le clustering a permis de détecter des thèmes récurrents ou des structures cachées sans étiquettes préalables. L'analyse a également été enrichie par l'application de la loi de Weibull, notamment pour effectuer des analyses de Weibull sur des défaillances mentionnées dans les verbatims, offrant ainsi une perspective statistique complémentaire.

Les résultats obtenus montrent l'efficacité des techniques NLP, en particulier pour la structuration des données textuelles. De plus, l'analyse de Weibull a révélé des insights intéressants sur les cycles de vie et la temporalité des événements décrits, ce qui peut servir à des prises de décisions stratégiques. Ce rapport détaille l'ensemble des méthodologies adoptées, les résultats obtenus ainsi que les perspectives d'amélioration.

Mots clés : NLP, Classification, Clustering, Data science, Machine Learning, Supervisé, Non supervisé, Analyses des données, Fiabilité, Analyses de Weibull.

BOUCHERRAB Meziane

[Stage IMPE proba]

- **Lieu** : BNP Paribas
- **Titre** : Analyse des données NPS et segmentation des entreprises de Connexis Cash
- **Encadrant** : JURADO Fabien
- **Dates** : 8 avril - 27 septembre 2024

L'objectif de ce stage était d'analyser les données utilisateurs de l'application Connexis Cash afin de mieux comprendre les facteurs influençant la satisfaction des clients et d'identifier les points à améliorer. L'une des méthodes principales utilisées a été l'analyse du **Net Promoter Score (NPS)**, un indicateur clé pour mesurer la satisfaction client. En parallèle, j'ai travaillé sur la segmentation des entreprises clientes pour distinguer les petites et moyennes entreprises (SME) des grandes entreprises (Corporate).

Le déroulement du stage s'est articulé autour des points suivants :

- **Analyse théorique et exploration des données NPS** pour identifier les facteurs influençant la satisfaction.
- **Automatisation des workflows** avec Python et Alteryx pour optimiser le traitement et l'analyse des données en temps réel.
- **Création de KPI et visualisation des résultats** à travers des tableaux de bord interactifs sur Power BI.
- **Segmentation des entreprises** : analyse des critères de segmentation et comparaison entre pays pour différencier SME et Corporate.

Le stage a commencé par une prise en main des outils d'analyse de données et une étude des méthodes actuelles de traitement du NPS. Ensuite, des workflows automatisés ont été mis en place pour faciliter la production des indicateurs et des rapports. Enfin, des tableaux de bord ont été créés pour permettre aux équipes d'accéder facilement aux résultats et de suivre les performances des modules de Connexis Cash.

BOUCHOUICHA Mariem

[Stage IMPE proba]

- **Lieu** : RTE - Réseau de Transport d'Électricité
- **Titre** : Modélisation et calibration de processus de renouvellement généralisé pour la maintenance des infrastructures électriques.
- **Encadrants** : FREMOND Alexis, GUILLON Thomas
- **Dates** : 6 mai - 6 novembre 2024

Dans le cadre de la maintenance des équipements du réseau électrique, des défis majeurs sont rencontrés en matière de modélisation de la fiabilité des actifs, particulièrement lorsque ceux-ci sont constitués de plusieurs sous-composants. Lorsqu'une défaillance survient, l'intervention de maintenance consiste généralement à réparer ou remplacer le sous-composant défectueux. Cependant, les données disponibles ne précisent pas quel sous-composant a été affecté. Il est simplement constaté qu'une intervention a eu lieu sur l'actif. Cette absence de granularité pose des difficultés pour modéliser avec précision la fiabilité de l'actif et prévoir efficacement les interventions futures.

L'objectif principal de ce stage était d'évaluer dans quelle mesure les modèles de maintenance imparfaite, en particulier les modèles de Kijima I et Kijima II, peuvent être utilisés pour représenter la dynamique des défaillances malgré l'absence d'informations détaillées sur les sous-composants. Plus précisément, l'objectif a été :

- D'étudier la pertinence des modèles de Kijima I et Kijima II pour exploiter des données incomplètes où il est su qu'une réparation a eu lieu sans connaître le sous-composant concerné.
- De proposer des méthodes numérique et de calibration pour ces modèles.

Dans le contexte de la maintenance préventive, le modèle de Kijima I peut aider à déterminer l'âge optimal pour remplacer l'ensemble de l'actif. Si les interventions correctives deviennent de plus en plus fréquentes et coûteuses, il peut être plus économique de remplacer le système complet plutôt que de continuer à réparer les sous-composants individuellement. Les résultats de cette étude permettent de mieux comprendre dans quelles conditions chaque modèle est adapté et comment celui-ci peut être utilisé pour soutenir les décisions en matière de maintenance préventive et corrective. Ainsi ce travail contribue à l'optimisation des stratégies de maintenance et à l'amélioration de la fiabilité du réseau électrique.

Enfin, l'équation du g-renouvellement a été étudiée. Elle permet non seulement de modéliser la dynamique des défaillances dans les systèmes réparables (en tenant compte de l'usure cumulative lorsque les réparations ne restaurent pas l'état initial de l'actif) ; mais aussi de prédire le nombre total de défaillances cumulées attendues sur un horizon donné. Pour résoudre les équations associées à ce modèle, la méthode des trapèzes a été appliquée, fournissant une estimation numérique de la densité de g-renouvellement et de la fonction de g-renouvellement.

CAI Bailin

[Stage IMPE proba]

- **Lieu** : Dandelion International
- **Titre** : Développement full-stack en utilisant LLMs (Large Language Model)
- **Encadrant** : XU Cheng
- **Dates** : 16 octobre 2023 - 29 mars 2024

Lors de mon récent stage en développement full-stack, j'ai été immergé dans le monde fascinant des modèles de langage de grande envergure (LLM), travaillant sur des applications sophistiquées qui explorent le potentiel de l'intelligence artificielle dans le traitement du langage naturel. J'ai eu l'opportunité d'appliquer mes compétences en utilisant des technologies de pointe telles que le framework Next.js pour le front-end, Python Django et FastAPI, et NodeJs pour le back-end. Cette expérience a été enrichissante, me permettant de contribuer à la création de solutions innovantes tout en peaufinant ma maîtrise du développement logiciel.

Le premier projet de mon stage portait sur le développement d'un outil avancé de génération de documents, capable de respecter des critères précis en termes de format, contenu, ton, et style. J'ai abordé ce défi en expérimentant deux méthodologies principales : le prompt engineering et le fine-tuning. Pour le prompt engineering, j'ai exploré diverses approches, notamment les techniques zero-shot, one-shot, et few-shot, qui m'ont permis de comprendre comment guider efficacement les modèles, GPT-Turbo et Mistral-7B, vers la production de résultats précis sans ajustement préalable. Par contre, le fine-tuning, bien que traditionnellement considéré comme une méthode puissante pour personnaliser les réponses des modèles LLM, s'est révélé moins nécessaire que prévu. Les capacités avancées de GPT-Turbo et Mistral-7B ont démontré que, même sans fine-tuning, le prompt engineering seul pouvait atteindre les résultats souhaités, ce qui a été une découverte significative pour nos objectifs de projet.

Mon second projet m'a conduit à développer un chatbot spécialisé dans le domaine des procédures administratives en France, utilisant la technique de Retrieval Augmented Generation (RAG) pour fournir des réponses pertinentes et bien informées. Ce projet a nécessité une étape initiale de web scraping sur le site du service public français pour assembler une base de données de questions et réponses. Après avoir structuré ces données pour entraîner le modèle, j'ai pu déployer un chatbot qui offre une aide précieuse aux utilisateurs, facilitant leur navigation dans le labyrinthe des procédures administratives avec des informations actualisées et accessibles.

En résumé, ce stage m'a permis d'approfondir ma compréhension des modèles de langage de grande envergure et de leurs applications pratiques dans le développement de solutions logicielles. J'ai appris l'importance de l'innovation et de l'adaptabilité dans le travail avec des technologies émergentes, et j'ai acquis une expérience précieuse en menant des projets du concept à la réalisation. Grâce à cette expérience, je suis désormais mieux équipé pour relever les défis futurs dans le développement full-stack et dans l'intégration des avancées en intelligence artificielle dans des applications réelles.

DOUMI Adam

[Stage IMPE proba]

- **Lieu** : Emotors
- **Titre** : Data Science appliqué à l'industrie 4.0
- **Encadrant** : LAJUS Paul-Yuthi
- **Dates** : 15 avril - 14 octobre 2024

Emotors est une entreprise spécialisée dans la conception de moteurs électriques, avec un site dédié à la R&D et un autre à la production. L'entreprise s'inscrit dans l'ère de l'industrie 4.0, un concept qui fait référence à l'intégration des technologies numériques avancées, telles que l'Internet des objets (IoT), l'intelligence artificielle (IA), la robotique et l'automatisation, dans les processus de fabrication pour rendre la production plus intelligente, flexible et efficace. En d'autres termes, l'industrie 4.0 repose sur la connectivité des systèmes, l'analyse de données en temps réel et l'automatisation pour optimiser les performances industrielles.

L'objectif de ce stage en tant que Data Scientist était de mettre en place des solutions permettant d'améliorer la qualité des produits finis afin de répondre aux besoins de mobilité de demain.

Mon stage chez Emotors a consisté à développer des outils d'analyse de données pour améliorer les processus industriels, en mettant l'accent sur la détection des anomalies et l'amélioration des performances de production. J'ai travaillé sur trois projets principaux : la création d'une application pour automatiser l'analyse des données, la mise en place de processus ETL (Extract, Transform, Load) adaptés aux besoins industriels, et l'utilisation de techniques de machine learning pour détecter des défauts de fabrication par vision (à partir de photographies).

À travers ces missions, j'ai pu mettre en valeur mes compétences en mathématiques et en informatique, et renforcer ma capacité à appliquer des concepts théoriques à des problématiques concrètes de l'industrie, tout en développant des solutions innovantes pour améliorer la performance et la qualité des processus de production chez Emotors.

DURDUNOGU Mahir

[Stage IMPE proba]

- **Lieu** : Alenia Consulting
- **Titre** : Automatisation de la génération de fichiers CI/CD pour le déploiement cloud
- **Encadrant** : BEN HADJ SALAH Ghassen
- **Dates** : 15 avril - 18 octobre 2024

Ce stage s'inscrit dans le cadre du projet stratégique de **Société Générale** visant à devenir la première banque européenne sur le cloud. L'objectif était de développer une solution novatrice pour **automatiser la création des fichiers CI/CD** (Continuous Integration/Continuous Deployment) nécessaires au déploiement des applications sur le cloud. Actuellement, ces fichiers, comme les **Jenkinsfile**, **Dockerfile**, et les fichiers de configuration Kubernetes, sont créés manuellement, un processus complexe pouvant prendre plusieurs jours.

Pour répondre à ce besoin, j'ai conçu un système basé sur la **génération augmentée par récupération (RAG)**. Cette méthode permet de réduire le temps de génération de plusieurs jours à seulement **3-5 minutes**, en utilisant des modèles d'embeddings avancés et des techniques d'apprentissage par peu d'exemples (*few-shot learning*). Nous avons exploité les capacités des **Transformers de Hugging Face**, en utilisant des modèles comme `bge-large-en-v1.5` pour créer des représentations vectorielles précises des fichiers, facilitant la sélection et l'adaptation de fichiers issus des dépôts GitHub de l'équipe ACID.

Le projet s'est déroulé en plusieurs étapes : **analyse des exemples de fichiers** collectés, développement d'une **pipeline de traitement des données** pour organiser et filtrer les documents, et optimisation des processus de génération automatique. Nous avons également conçu une **interface utilisateur** permettant aux utilisateurs d'entrer des liens vers des dépôts, déclenchant la génération automatique des fichiers requis. De plus, une **base de données utilisateur** a été mise en place pour suivre et gérer les configurations et les préférences des utilisateurs, garantissant une intégration fluide et personnalisée dans les processus existants.

En plus de réduire le temps et les efforts nécessaires au déploiement des applications sur le cloud, cette solution contribue à **standardiser les processus de migration** et à les aligner sur les ambitions de transformation numérique de la banque. En utilisant des techniques modernes d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique, ce projet marque un pas en avant vers la **migration cloud automatisée et efficace**, aidant Société Générale à maintenir sa position de leader dans le secteur bancaire européen.

PACHECO RUIZ Ricardo J.

[Stage IMPE proba]

- **Lieu** : SEGULA Technologies
- **Titre** : Développement d'un modèle de reconnaissance des valves industrielles pour la réalisation d'inventaires dans les raffineries et les usines pétrochimiques
- **Encadrant** : DÍAZ GIL Daniel
- **Dates** : 9 octobre 2023- 16 avril 2024 (*pas toujours en temps plein*)

Les tâches suivantes ont été réalisées pour mener à bien ce projet, baptisé de l'acronyme RECOVAL :

1. Élaboration d'un cadre théorique, pour lequel plusieurs études ont été effectuées sur le modèle mathématique du neurone artificiel, l'algorithme d'apprentissage des réseaux neuronaux, les techniques d'amélioration de cet apprentissage et l'état actuel de la vision artificielle.
2. Recherche approfondie sur les vannes industrielles les plus répandues dans les raffineries, les installations de traitement du gaz naturel et les usines pétrochimiques, tant en ce qui concerne leurs caractéristiques que leurs applications les plus courantes et leurs principaux fournisseurs.
3. Construction d'une base de données fournisseurs en format Excel avec 1 137 entrées et de deux ensembles de données, le premier avec 1 964 images et le second avec 2 126 images.
4. Choix de la mise en œuvre appropriée pour le projet et compréhension minutieuse de son architecture et de son fonctionnement, tant sur le plan technique (structure des blocs et des couches) que mathématique (fonctions de perte, mesures d'évaluation, techniques d'augmentation des données).
5. Expérimentation, y compris l'entraînement, la mise au point et l'évaluation des modèles, ainsi que l'analyse des résultats obtenus et une liste de suggestions d'amélioration.

Globalement, les résultats semblent satisfaisants, bien que le modèle développé soit considéré comme un prototype montrant des signes clairs du potentiel qui pourrait être atteint.

BOUKHEMIS Imène

[Stage IMPE méca]

- **Lieu** : Dassault Systèmes
- **Titre** : Calibration de modèles dans le cadre de la simulation anatomique
- **Encadrants** : SEIZE Pierre, LOISON Arthur
- **Dates** : 2 avril - 30 septembre 2024

Grâce aux technologies actuelles et aux modèles électromécaniques du système cardiaque, on peut reconstruire l'activité électrique du cœur à partir de mesures de potentiels réalisées à la surface du thorax. On pourrait ainsi mieux comprendre et traiter les pathologies cardiaques. Une direction pour réaliser cette reconstruction est de résoudre le problème inverse de l'électrocardiogramme. Plusieurs publications scientifiques ont présenté diverses méthodes de résolution de ce problème, qui consiste à estimer certains paramètres propres à chaque patient tels que la rigidité myocardique, la vitesse de conduction, le temps de la période réfractaire... La connaissance de ces paramètres serait d'une grande utilité pour simuler l'appareil cardiovasculaire et éclairer les cardiologues, radiologues et chirurgiens sur les anomalies de leurs patients. Cependant, cette estimation peut être très coûteuse d'autant plus que l'on dispose souvent de données bruitées par des erreurs de mesure.

L'objectif de ce stage est de calibrer les paramètres d'un modèle donné à partir de mesures expérimentales. On note $(X_{\text{obs}}, Y_{\text{obs}})$ une série de mesures observée, $\beta \in \mathbb{R}^p$ un vecteur de paramètres à calibrer et f_β une fonction donnée. On veut calibrer le paramètre β , c'est-à-dire l'ajuster pour maximiser l'accord entre les données observées et les simulations. Idéalement, on cherche β tel que $Y_{\text{obs}} = f_\beta(X_{\text{obs}})$.



FIGURE 1 – Observables obtenues à partir de l'électrocardiogramme

Néanmoins, on ne peut pas assurer en général l'existence d'un β qui satisfait l'équation $Y_{\text{obs}} = f_\beta(X_{\text{obs}})$ car les mesures Y_{obs} sont bruitées.

Plusieurs approches sont possibles pour résoudre ce problème de calibration. On peut se ramener à résoudre un problème d'optimisation par la méthode des moindres carrés : $\operatorname{argmin}_\beta \|Y_{\text{obs}} - f_\beta(X_{\text{obs}})\|^2$.

On pourrait également considérer que nos variables suivent des lois de probabilités et tenter d'approcher la loi suivie par les paramètres β . Une autre possibilité serait de combiner les observations et la connaissance du système dynamique sous-jacent, dans le but de pouvoir obtenir une prévision fiable de la solution. Ces différentes méthodes de calibration ainsi que plusieurs algorithmes d'optimisation ont été étudiés pendant le stage, puis ont été ensuite appliqués sur des problèmes choisis afin de les tester puis de les comparer.

HAMELIN Paul-Edouard

[Mission IMPE méca]

- **Lieu** : EDF Lab Chatou
- **Titre** : Modélisation hydrodynamique et thermique d'une retenue hydraulique
- **Encadrant** : VIDAL HURTADO Javier
- **Dates** : 2 octobre 2023 - 30 septembre 2024

Cette mission d'alternance était centrée sur la construction d'un modèle hydrodynamique et thermique d'une retenue hydraulique à l'aide du code TELEMAC-3D¹.

La première étape a consisté à développer un outil informatique permettant de générer un maillage raffiné dans les zones présentant une forte variation de la pente du fond de l'étendue d'eau. En effet, la pente exerce un impact significatif sur l'hydrodynamique, et il est donc essentiel de bien la discrétiser. Ce travail a nécessité l'utilisation de GMSH² et de FreeFem++³.

Dans un deuxième temps, nous avons réalisé un cas de validation pour TELEMAC-3D, c'est-à-dire que nous avons vérifié si TELEMAC-3D calculait correctement la diffusion d'un traceur (ex. : température, polluant, etc.) en comparant la solution numérique obtenue à une solution analytique.

Pour cela, nous avons exploré le code source de TELEMAC-3D afin de mieux comprendre les différentes étapes intervenant dans la résolution numérique de la diffusion d'un traceur. Une étape préalable de formation au langage de programmation FORTRAN a été nécessaire pour se plonger dans le code.

Enfin, la dernière étape a été la construction du modèle hydrodynamique et thermique de cette retenue avec TELEMAC-3D. L'objectif est de reproduire l'évolution de la température de l'eau sur une année. Pour estimer la qualité des résultats des simulations, nous nous appuyons sur un jeu de données fournissant des informations sur la température de l'eau à un point précis de la retenue, de la surface jusqu'au fond.

1. Code de simulation pour les écoulements à surface libre
2. Logiciel de génération de maillage
3. Code de résolution d'équations aux dérivées partielles

NIAMBA Mohamed

[Stage IMPE méca]

- **Lieu** : SUMMIT, *en collaboration avec* l'Institut Jean Le Rond D'Alembert
- **Titre** : Écoulement de gaz et transfert de chaleur dans un réseau de tuyaux : approches faible Mach pseudo-numérique et homogénéisation périodique
- **Encadrantes** : AÏSSIOUENE Nora, BALTEAN-CARLÈS Diana, WEISMAN Catherine
- **Dates** : 2 avril - 27 septembre 2024

On s'intéresse à la simulation de l'écoulement de gaz dans des tuyaux qui constituent la paroi d'une cuve. Cet écoulement permet de maintenir et de contrôler l'isolation thermique de la cuve. Un modèle a été développé dans le cadre d'une thèse de doctorat en collaboration entre SUMMIT et Gaztransport Technigaz (GTT) [1] et consiste à considérer un modèle faiblement compressible pour simuler l'écoulement de gaz dans un réseau de tuyaux de configuration donnée.

Dans le cadre de notre stage, nous avons d'abord repris les dérivations du modèle à faible nombre de Mach développées dans la thèse de Giuseppe Rantone [1], ainsi que les solutions pseudo-analytiques dans le cas particulier d'un thermosiphon droit différentiellement chauffé, constitué de deux tuyaux verticaux chacun à température fixée, et deux tuyaux horizontaux adiabatiques. Ensuite, nous avons étendu cette solution particulière au cas d'un thermosiphon incliné par rapport à la verticale, et mené une analyse paramétrique en fonction des différents paramètres physiques. Enfin, nous avons travaillé sur la dérivation d'un modèle d'écoulement de gaz basé sur le principe d'homogénéisation dans un milieu poreux. Nous avons retrouvé le principe d'homogénéisation des équations de Stokes et du transport de chaleur dans un milieu poreux périodique. L'objectif de cette approche est de proposer un modèle homogénéisé en considérant le réseau de tuyaux comme un milieu poreux.

Mots-clés : équations de Navier-Stokes, convection naturelle, modèle faible Mach, homogénéisation périodique, milieu poreux.

Référence : [1] Giuseppe Parasiliti Rantone, Nora Aïssiouene, Yohan Penel, and Pierre-Yves Lagrée. *Modeling Gas Flow in a Thermosyphon with a 1D Low Mach Number Expansion*. Journal of Fluid Mechanics, 2024.

PAILLIEZ Nicolas

[Mission IMPE méca]

- **Lieu** : SNCF Réseau
- **Titre** : Calcul d'impédance et d'admittance en milieu ferroviaire
- **Encadrant.e.s** : DSOUL Achraf, BRASSET Albane
- **Dates** : 4 septembre 2023 - 3 septembre 2024

La mission d'alternance s'inscrit dans le cadre du projet MODALF NG (logiciel interne permettant de calculer la tension et l'intensité) et vise à développer le module "IMPED NG" pour le calcul des impédances et admittances linéiques des lignes ferroviaires électrifiées. Elle comprend plusieurs phases principales :

- ▶ **Analyse des méthodes existantes** : Évaluation des méthodes de calcul d'impédances et d'admittances pour les lignes électriques, avec une sélection de la méthode la plus adaptée aux contraintes ferroviaires.
- ▶ **Résolution des défis théoriques** : Étude approfondie des théories sélectionnées pour le calcul d'impédances et d'admittances, incluant la résolution d'intégrales impropres et l'adaptation des formules aux spécificités géométriques des conducteurs ferroviaires.
- ▶ **Implémentation informatique** : Développement en C++ ou Python des algorithmes pour générer des matrices d'impédance et d'admittance, suivi d'une validation par comparaison avec les résultats obtenus par le logiciel MODALF "classique".
- ▶ **Intégration et documentation** : Intégration du module développé dans l'interface graphique de MODALF NG et rédaction d'une documentation complète pour faciliter son utilisation future par l'équipe de développement.
- ▶ **Participation active à la dynamique de l'équipe** : Contribution aux réunions régulières de l'équipe, présentation des avancées et des résultats, ainsi que partage des connaissances acquises lors de sessions techniques.

SECRET Benjamin

[Stage IMPE méca]

- **Lieu** : ONERA
- **Titre** : Amélioration d'une méthode de génération de maillages quadrilatéraux par reconstruction et utilisation de superconvergence des éléments finis
- **Encadrant** : MOUYSET Vincent
- **Dates** : 2 avril - 30 août 2024

Dans une thèse récente réalisée à l'ONERA, une nouvelle méthode de génération de maillages quadrilatères a été explorée. Celle-ci repose sur la construction d'un champ vectoriel par résolution d'équations aux dérivées partielles. Plus précisément, un maillage triangulaire, aisément constructible par diverses méthodes, sert de base à la définition d'un champ de croix discret, il a été démontré que l'on pouvait modifier ce champ afin de créer une partition naturelle du domaine en régions à quatre côtés, qui sont ensuite subdivisées pour produire le maillage. Nous avons alors montré qu'en utilisant la reconstruction par interpolation de Hermite géométrique et la régularité de la solution du problème continu nous pouvions obtenir un phénomène de type super-convergence éléments finis à l'ordre 3.

Lors de ce stage, notre objectif principal était d'améliorer la convergence du maillage. Plus précisément, nous souhaitons reconstruire un maillage quadrangulaire avec une grande précision, même à partir d'un maillage triangulaire initialement grossier. Pour y parvenir, nous avons développé une méthode de reconstruction des bords du domaine, indépendante de la méthode de génération décrite dans la thèse. Cette nouvelle étape, ajoutée en fin de processus, permet de positionner de manière optimale les sommets des quadrangles, offrant ainsi une meilleure représentation du domaine et un gain en termes d'ordre de convergence comme le montre la Figure 2.

Dans un second temps, nous avons étendu cette méthode de reconstruction au cas 2D comme le montre la Figure 1, visant cette fois à reconstruire non seulement les bords mais également toute la surface du domaine.

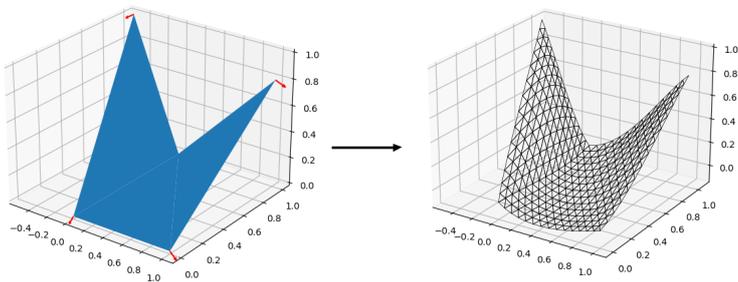


FIGURE 2 – Reconstruction surfacique

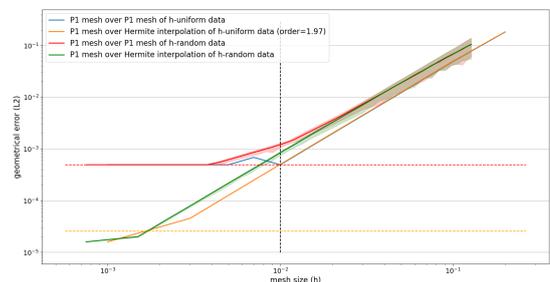


FIGURE 3 – Erreur numérique du maillage