Dossier Professionnel de Jérémy Rouot

Contact

Adresse :	7, rue de l'Église 52 200 Bourg, France
Téléphone :	+33 6 70 15 93 77
Adresse électronique :	jeremy.rouot@tutanota.com
Page WEB :	`https://jeremyrouot.github.io/homepage/`

Mots-clés

- **Analyse des systèmes hamiltoniens discontinus :** principe du maximum de Pontryaguine
- **Calculs des contrôles optimaux** : boucle ouverte, synthèse optimale
- **Méthodes numériques en contrôle optimale** : méthodes directes, méthodes indirectes, méthode globale (cadre semi-algébrique)
- **Algorithmes en optimisation** : méthode de point intérieur, algorithme à directions de descente, algorithme à régions de confiance, gradient conjugué, lagrangien augmenté
- **Conditions nécessaires et suffisantes d'optimalité :** théorie et implémentation numérique (équations aux variations, méthodes de tir et de continuation), cas des contrôles périodiques
- **Contrôle optimal digital :** contrôle constant par morceaux avec subdivision finie
- **Théorie géométrique du contrôle :** formes normales et synthèse optimale, outils formel (Mathematica, bases de Gröbner)
- **Intégrabilité des systèmes hamiltoniens :** fonctions elliptiques
- **Observabilité :** estimation de variables, contrôle boucle fermée (Model Predictive Control)

Applications. *Imagerie par résonance magnétique · Nage à faible nombre de Reynolds · Transfert orbital à poussée faible · Stimulation musculaire optimale par trains d'impulsions électriques · Synthèse optimale pour les réacteurs chimiques*

Table des matières

1. Curriculum vitæ

Nom :	Jérémy Rouot
Date de naissance :	07.03.1990
Nationalité :	Française
État civil :	Célibataire
Titre :	Docteur en Mathématiques

1.1 Situations Professionnelles

2019– Enseignant-chercheur à l'école d'ingénieur-e-s ISEN (Brest)
Membre associé à l'équipe INRIA MCTAO (depuis 2016) et de l'Institut de Mathématiques de Bourgogne

2017–2019 Enseignant-chercheur à EPF: École d'Ingénieur-e-s (Troyes).

2016–2017 Membre de l'équipe Méthodes et Algorithmes pour le Contrôle (LAAS-CNRS, Toulouse)
Travail post-doctoral sous la direction de Jean-Bernard Lasserre et Didier Henrion.

1.2 Diplômes

2013–2016 Thèse à l'INRIA (Sophia Antipolis), sous la direction de Bernard Bonnard et Jean-Baptiste Pomet.
Sujet : méthodes géométriques et numériques en contrôle optimal et applications au transfert orbital à poussée faible et à la nage à faible nombre de Reynolds.
Soutenance à l'Université Côte-d'Azur le 28 novembre 2016. Mention très honorable.
Jury : Président : Marius Tucsnak. Rapporteurs : Ugo Boscain, Emmanuel Trélat. Examinateurs : François Alouges, Piernicola Bettiol, Richard Epenoy.
Qualifié en sections 26 et 61 du CNU en janvier 2017.
Numéro de qualification : 17261299648.

2010–2013 Diplôme Ingénieur ENSIMAG (Grenoble). Filière Modélisation, Calcul, Simulation.

2008–2010 Classes Préparatoires aux Grandes Écoles, Lycée Carnot (Dijon). MPSI-MP*

1.3 Implication dans les projets

2019– Membre d'un projet PGMO : Projet Contrôle et Stimulation Musculaire
2018– Membre d'un projet PEPS (labex AMIES) : Projet Contrôle et Stimulation Musculaire
2017–2018 Membre du projet PGMO : Techniques algébro-géométriques avec des applications au contrôle optimal global pour l'imagerie par résonance magnétique
2017 Membre du projet ERC-TAMING : http://taming.laas.fr/
2013-2016 Thèse financée par la région Provence-Alpes-Côte d'Azur et par le CNES (Toulouse)

1.4 Collaborations

J'ai collaboré avec les chercheurs suivants qui pourront être contactés en vue d'une recommandation

— Bernard Bonnard (UBFC & INRIA)
— Jean-Baptiste Pomet (INRIA)
— Jean-Baptiste Caillau (Université Côte d'Azur & INRIA)
— Monique Chyba (Université d'Hawaii)
— Piernicola Bettiol (UBO)
— Jean-Bernard Lasserre (LAAS-CNRS)
— Loic Bourdin (Université de Limoges)
— Toufik Bakir (UBFC)
— Oliver Cots (IRIT)

2. Formations et compétences

2.1 Compétences en programmation

Général	C, C++, Fortran, Java, Caml
Calcul numérique et formel	Python (Numpy, SymPy, Scipy), Julia, Scilab, Matlab, Mathematica, Maxima, SageMaths
Calcul parallèle	OpenMP, MPI (C++)
Logiciels	`HamPath` , `BOCOP` , `GloptiPoly` , `YALMIP`, FreeFem++
Sciences des données	Python (Keras, Tensorflow, Pandas), R
Réseau	Certification Cisco CCNA : Routing and Switching Participation à des compétitions "Capture the Flag" (conférence GreHack 2012, Grenoble)
WEB	HTML, CSS, JavaScript, PHP

2.2 Formations scientifiques et pédagogiques

Outre les séminaires d'équipes ou de conférences, j'énumère les formations scientifiques auxquelles j'ai participé.

Juil. 2018	Conception de vidéos pédagogiques (formats, prises de vue, montage). Concevoir un cours de "blended learning". Utiliser les applications numériques pour rendre un cours interactif.
Mars 2016	Cours de l'école MOA, *Formal methods in optimization engineering*, ENSEEIHT (Toulouse).
2015–2016	Cours de l'école doctorale Carnot–Pasteur, *Contrôle optimal géométrique*, UBFC (Dijon).
Automne 2014	Trimestre de cours et de séminaires, *Geometry, Analysis and Dynamics on Sub-Riemannian Manifolds*, IHP (Paris).
Juin 2014	Cours de l'école doctorale Carnot–Pasteur, *Résolution des systèmes polynômiaux en utilisant les bases de Gröbner*, UBFC (Dijon).
Mars 2014	Cours du GdR MOA, *Optimisation polynomiale et le contrôle*, INSA (Rennes).
Nov. 2013	Conférence en auditeur, *Geometry and Algebra of Linear Matrix Inequalities*, CIRM (Marseille).

3. Responsabilités collectives

2018–2019 Responsable du module **Statistiques et Sciences des données** de troisième année pour les trois campus de EPF: École d'Ingénieur-e-s .

Nov. 2018 **Responsable pédagogique d'un séjour pédagogique** et culturel de cinq semaines pour l'accueil d'étudiants de l'université d'Amity à EPF: École d'Ingénieur-e-s .

2018–2019 Responsable d'une collaboration entre EPF: École d'Ingénieur-e-s et l'Université d'Aalto (Finlande) pour le **développement de problèmes mathématiques en Sciences des Données, Analyse numérique avec le plugin Moodle** Stack. Partage avec les instituts membres du projet Abacus (`https://abacus.aalto.fi/`).

2017–2019 Responsable de la **formation mathématiques à distance** d'élèves pour le concours d'entrée à EPF: École d'Ingénieur-e-s .

2017–2019 Membre d'une cellule pour le développement de méthodes pédagogiques innovantes à EPF: École d'Ingénieur-e-s .

2016–. . . Reviews pour *International Journal of Control*, *Networks and Heterogeneous Media*, *Acta Applicandae Mathematicae* et des revues de conférences telles que *Conference on Decision and Control*, *International Federation of Automatic Control*.

2015–2016 Organisateur du séminaire doctorants hebdomadaire de l'École doctorale Carnot Pasteur, Institut Mathématiques de Bourgogne, 2015-2016.

2014 **Contributeur au développement du logiciel Mathics** (logiciel de calcul formel et numérique gratuit, copie syntaxique de Mathematica, basé sur la librairie SymPy de Python).
https://github.com/mathics/Mathics

2013–... Animateur de stands, posters pour diverses manifestations : fête de la science (2014 et 2015 à UBFC et 2018 à EPF: École d'Ingénieur-e-s , une dizaine de portes ouvertes pour EPF: École d'Ingénieur-e-s)

4. Activités de recherche

4.1 Communications orales en conférences nationales ou internationales.

Déc. 2019 Conférence, *Optimization of chemical batch reactors using temperature control*, **59th IEEE Conference on Decision and Control**, Nice.

Juil. 2019 Conférence, *Optimization of chemical batch reactors using temperature control*, **International Congress on Industrial and Applied Mathematics**, Valence, Espagne.

Sep. 2018 Conférence, *Geometric and numerical methods in optimal control for the time minimal saturation*, **Dynamics, Control, and Geometry**, Varsovie, Pologne.

Sep. 2017 Conférence, *Averaging for minimum time control problems and applications*, **18th French - German - Italian Conférence on Optimization**, Paderborn, Allemagne.

Juil. 2017 Conférence, *Sub-Riemannian geometry and swimming at low Reynolds number*, **New Horizons in Optimal Control**, Porto, Portugal.

Juil. 2017 Conférence, *Optimal Control Theory and the Efficiency of the Swimming Mechanism of the Copepod Zooplankton*, **IFAC 2017 World Congress**, Toulouse.

Juin 2017 Congrès *Optimal control theory, sub-Riemannian geometry and swimming of copepod*, **SMAI 2017 - 8e Biennale Française des Mathématiques Appliquées et Industrielles**, Ronce-les-Bains.

Mars 2016 Journées *Geometric optimal control for microorganisms*, **SMAI-MODE 2016**, ENSEEIHT, Toulouse.

Jan. 2016 Conférence *Purcell swimmer vs Copepod swimmer*, **10th International Young Researcher Workshop on Geometry**, Mechanics and Control, Institut Henri Poincaré, Paris, France.

Déc. 2016 Conférence *A Numerical Approach to the Optimal Control and Efficiency of the Copepod Swimmer*, **55th IEEE Conference on Decision and Control**, Las Vegas, USA.

Août 2015 Conférence *Optimal Control of an Ensemble of Bloch Equations with Applications in MRI*, **Nonlinear Control and Geometry**, Stefan Banach Center, Będlewo, Pologne.

4.2 Communications orales lors de séminaires et groupes de travail.

Jan. 2020 Séminaire INRIA de l'Équipe **Valse**, Lille, France.

Jan. 2018 Séminaire d'Équipe, EPF: École d'Ingénieur-e-s , Troyes, France.

Juin 2017 Séminaire d'Équipe, Laboratoire de Mathématiques (UBO, Brest).

Mars 2017 Séminaire Équipe Méthodes et Algorithmes de Commande (LAAS-CNRS, Toulouse, France.

Sep. 2016 Rencontres Équipes INRIA McTAO - INRIA Mokaplan, INRIA-Paris, Paris, France.

Déc. 2015 Séminaire Doctorants, IRMA, Strasbourg.

Oct. 2015 Séminaire Doctorants, Mathematisches Institut-Universität Basel, Suisse.

Mai 2015 16ièmes Journées de l'École Dotorale Carnot-Pasteur, Université de Bourgogne Franche-Comté, Dijon.

Déc. 2014 Séminaire Doctorants, Institut de Mathématiques de Bourgogne, Dijon.

Mai. 2014 Séminaire Doctorants, Institut de Mathématiques de Bourgogne, Dijon.

4.3 Communications orales lors de conférences dont je suis co-auteur.

Août 2015 J.-B. Pomet (avec J.-B. Caillau & J. Rouot) *On averaging techniques in control, Finsler geometry and low thrust orbital transfer*, Nonlinear control and geometry, Bedlewo, Poland.

Juin 2017 T. Verron (avec B. Bonnard, O. Cots & J. Rouot), *Méthodes algébriques pour le contrôle optimal en Imagerie à Résonance Magnétique*, 8ième Biennale Française des Mathématiques Appliquées et Industrielles (SMAI), La Tremblade.

Juin 2017 B. Bonnard (avec P. Bettiol & J. Rouot), *Optimal control theory, sub-Riemannian geometry and the swimming problems at low Reynolds number*, Mathematical Control Theory, with a special session in honor of Gianna Stefani, Porquerolles.

Sep. 2018 B. Bonnard (avec B. Bettiol, M. Chyba, J. Rouot & D. Takagi), *Sub-Riemannian geometry, Hamiltonian dynamics, micro-swimmers, Copepod nauplii and Copepod robot*, Dynamic, Control and Geometry, Varsovie.

Nov. 2018 O. Cots (avec B. Bonnard, J. Rouot & T. Verron), *Geometric and numerical methods in the saturation problem of an ensemble of spin particles*, PGMO Days à EDF Labs Paris-Saclay, Paris.

Mars 2019 B. Bonnard (avec T. Bakir & J. Rouot), *Graphs, Singularity Theory and Optimal Control of Chemical Reaction Networks*, AMS conference, University of Hawaii, Manoa.

Sep. 2019 B. Bonnard (avec T. Bakir & J. Rouot), *Two Optimization Methods for Optimal Muscular Force Response to Functional Electrical Stimulations*, 19th French-German-Swiss conference on Optimization, Nice.

4.4 Communications orales au travers d'une session posters.

Oct. 2014 *Les Caustiques*, Poster pour la Fête de la Science, Dijon.
fichier : https://jeremyrouot.github.io/homepage/file/fete2014.pdf

Nov. 2015 *Lunar perturbation of the metric associated to the averaged orbital transfer*, Poster pour la conférence "Variational methods in Imaging and geometric control", Linz.
fichier : https://jeremyrouot.github.io/homepage/file/ricam.pdf

5. Résumé des travaux de recherche

5.1 Cohérence chronologique

Mes travaux de recherche visent à établir des méthodes algébro-géométriques générales pour développer des méthodes de calculs (formels et numériques) en vue de résoudre des applications non académiques.
Les problèmes étudiés sont modélisés par un système de contrôle en dimension finie. La première pierre angulaire est le principe du maximum de Pontryaguine qui donne des conditions nécessaires formant un système extrémal composé d'un système dynamique Hamiltonien et de conditions de transversalité.

La résolution (mathématique ou numérique) de ce système extrémal est difficile pour les applications considérées. Le but est alors d'étudier les propriétés mathématiques des solutions à partir de modèles proches et plus simple pouvant aider les méthodes numériques à calculer les solutions optimales. Plusieurs méthodes numériques ont été développées. Les méthodes indirectes résolvent le problème aux deux bouts sous-jacent au système extrémal avec un algorithme de type Newton. La résolution numérique est elle-même un problème intéressant et j'ai réalisé plusieurs travaux pour rendre ces méthodes plus robustes et estimer l'extremum global : utilisation de forme normale nilpotente [11], complémentarité avec des méthodes directes comme BOCOP [7,9] ou avec des méthodes de continuation numérique [10,5].

En outre, je me suis intéressé aux conditions nécessaires d'optimalité du second ordre consistant à calculer le lieu conjugué, c'est à dire le lieu où les trajectoires perdent leur optimalité locale, et aux conditions suffisantes d'optimalité du second ordre pour des systèmes où les minimiseurs ne sont pas uniques en raison de l'existence d'un groupe de symétrie (apparaissant notamment lorsque le contrôle est périodique). Cette étude a été cruciale pour le problème de nage (voir [10]).

Ces méthodes appliquées à la nage à faible nombre de Reynolds et l'imagerie par résonance magnétique ont fait l'objet d'un ouvrage [1].

Lors de mon post-doctorat chez J.-B. Lasserre (LAAS–CNRS), j'ai fait le lien [5] entre ces méthodes locales et une méthode globale basée sur une reformulation du problème de contrôle optimal comme un problème de programmation linéaire sur les mesures résolu numériquement par une hiérarchie de problèmes d'optimisation semi-définie positive dans un cadre de géométrie algébrique réelle. Cette hiérarchie permettait d'avoir une estimation sur l'extremum global et donc de valider les calculs obtenus par les méthodes locales (`BOCOP` Bonnans et al. (2017) et `HamPath` Caillau et al. (2012)). Cette hiérarchie pouvant être générée par `GloptiPoly` et résolue par des solveurs SDP (`Mosek`). J'ai mis en place ces méthodes pour le problème de contrôle optimal inverse [15] et pour le problème de saturation de spins en contrôle optimal [5].

À EPF: École d'Ingénieur-e-s et en vue de mon intégration à l'Institut de Biomécanique Humaine Georges Charpak (Paris), je me suis intéressé au contrôle des impulsions électriques pour l'excitation musculaire en collaboration avec T. Bakir et B. Bonnard et L. Bourdin. J'ai appliqué des méthodes récentes de contrôle optimal échantillonné adapté à l'application, des méthodes d'observabilité et l'utilisation d'algorithme d'estimation de type commande prédictive [4,7].

Enfin, dans [6,2,13], j'ai utilisé le concept de formes normales et des calculs formels (essentiellement avec `Mathematica`) pour automatiser les calculs de la synthèse temps minimal de problèmes de contrôle mono-entrée avec une cible de codimension 1, problèmes notamment rencontrés dans l'étude des réacteurs chimiques.

5.2 Contributions

Je me suis intéressé durant ma thèse à deux applications : la première est l'étude de la nage à faible nombre de Reynolds, la deuxième porte sur le transfert orbital à poussée faible. J'ai travaillé par la suite sur trois autres applications : la saturation temps minimal d'une paire de spins en imagerie par résonance magnétique, la stimulation musculaire optimale par impulsions électriques et l'optimisation de la production dans les réacteurs chimiques.

Étude géométrique des solutions optimales

Ces applications peuvent être formulées comme un problème de contrôle optimal déterministe où le modèle est donné par un système dynamique et le contrôle est une fonction mesurable bornée. L'application du principe du maximum de Pontryaguine permet une caractérisation géométrique les solutions à partir d'un système extrémal et des conditions de transversalité. La résolution (mathématique ou numérique) de ce système étant difficile, une première étape consiste à déterminer un système simplifié, proche du système initial.

Pour le problème de nage, j'ai montré que les **formes normales graduées** sont un outil adapté pour définir un **modèle nilpotent**, qui est un problème simplifié du problème initial. Il s'agit en fait du modèle de Heisenberg pour le nageur de copépode et du modèle de Cartan d'ordre 5 dans le cas du nageur de Purcell. J'ai montré que ce dernier était intégrable dans la classe des fonctions elliptiques et fournit une très bonne approximation du problème pour des nages à faible amplitudes [11]. En outre, j'ai utilisé ce modèle nilpotent pour calculer formellement le centre de nage pour le nageur de copépode (voir Figure 2) qui apparaît comme un invariant sous-Riemannien et est relié au problème de contrôle optimal inverse [8].

Pour le problème de transfert orbital à poussée faible en temps minimal, le système simplifié est obtenu par moyennisation par rapport à la variable rapide (qui est la variable angulaire de localisation du satellite sur l'orbite, et les variables lentes correspondent à la géométrie de l'orbite elliptique) Sanders et al. (2007). J'ai montré dans un premier temps la convergence entre les trajectoires du système non moyenné vers les trajectoires du système moyenné. J'ai pris en compte plusieurs perturbations : une perturbation dissipative résultant du contrôle et aussi des perturbations physiques comme le terme J_2 du développement du potentiel gravitationnel terrestre (responsable de l'aplatissement au pôle). Le système moyenné défini une métrique de Finsler paramétrée par l'amplitude de la perturbation. J'ai calculé analytiquement la valeur du paramètre critique correspondant au cas où la métrique perturbé n'est plus une métrique de Finsler et illustré numériquement son impact sur la fonction valeur (qui est le temps de transfert). Cela a conduit à des résultats sur la contrôlabilité du système non moyenné et la régularité de la fonction valeur [14].

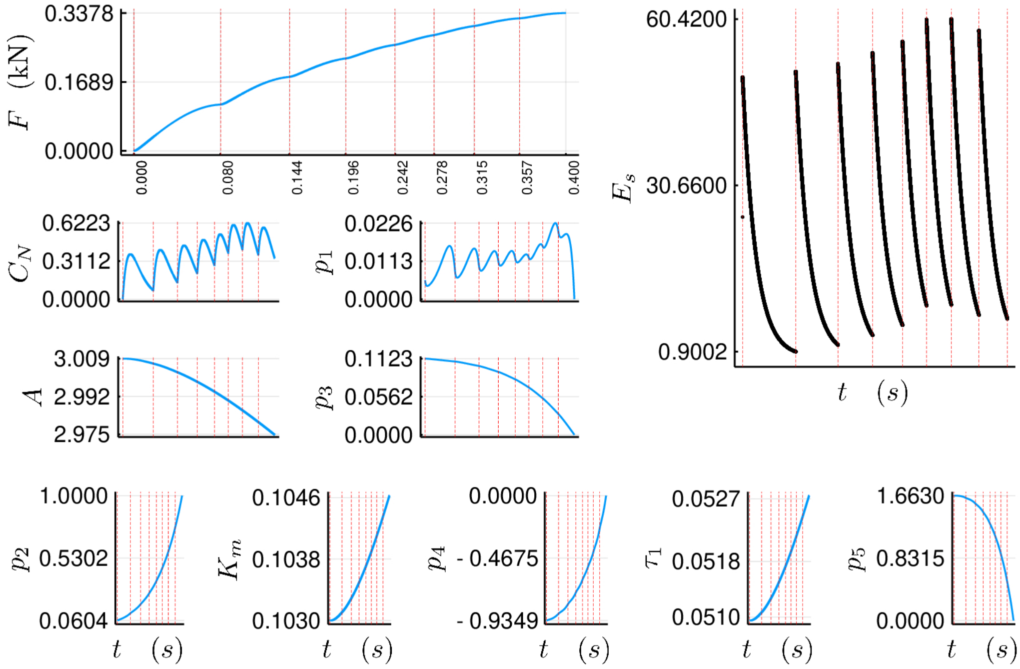

FIGURE 1 – *Évolution temporelle des variables de force* (C_N, F)*, des variables de fatigue* (A, K_m, τ_1)*, des adjoints* p_i*,* $i = 1,\ldots 5$ *associés et du contrôle* E_s *échantillonné avec sept impulsions. La solution correspond à la maximisation de la force finale* $F(T)$ *sur* $[0,T]$ *et est calculé par une méthode indirecte.*

Conditions d'optimalité

Concernant le problème de nage, l'étude géométrique a permis de calculer plusieurs types de nage candidates pour l'optimalité. Le calcul des **conditions nécessaires d'optimalité du second ordre**, qui consiste à calculer les points conjugués à partir de l'équation aux variations, m'a permis de montrer que seule les boucles simples peuvent être candidates pour l'optimalité [10].

Pour le problème de stimulation musculaire, le modèle décrit la force et la fatigue musculaire et le but étant de calculer les temps d'impulsions électriques pour obtenir une force maximale. Le contrôle est **non permanent** (ou digital), c'est à dire constant par morceaux avec subdivision finie, il s'agissait de calculer **les conditions nécessaires d'optimalité du premier ordre** (qui correspond à des conditions plus faible que le principe du maximum de Pontryaguine avec des contrôles permanents). Ces conditions prennent la forme d'**inégalités intégro-différentielles** et j'ai montré, à partir d'un problème d'inégalités variationnelles différentielles, qu'il était possible de calculer des contrôles optimaux par une méthode indirecte en prenant en compte la **dynamique raide** du modèle comprenant l'état et l'adjoint (voir Figure 1 et [3]).

Méthode directe et méthode indirecte

Une méthode directe consiste à discrétiser l'état et/ou le contrôle pour transformer le problème de contrôle optimal initial en **problème d'optimisation non linéaire en dimension finie** qui peut être résolu via des algorithmes d'optimisation (région de confiance, point intérieur). Le calcul de ces solutions optimales ne repose donc pas sur des conditions d'optimalité. Les méthodes indirectes, elles, reposent sur les conditions d'optimalité (tel que le principe du maximum de Pontryaguine où les conditions ont été dérivées spécifiquement pour le problème de stimulation musculaire). On a le schéma suivant décrivant l'approche de ces deux méthodes :

Problème de contrôle optimal

Discrétisation *Euler, Runge-Kutta, ...*	**Dualisation** *Principe du maximum de Pontryaguine*
Dualisation *Kuhn-Tucker*	**Discrétisation** *Euler, Runge-Kutta, ...*
MÉTHODE DIRECTE	MÉTHODE INDIRECTE

Le principe du maximum de Pontryaguine aboutit typiquement à un problème différentiel aux deux bouts qui peut être résolus par méthode de tir, elle-même basée sur un algorithme de type Newton sensible à l'initialisation. J'ai utilisé les méthodes directes pour initialiser les méthodes indirectes en reliant les multiplicateurs de Lagrange des algorithmes des méthodes directes et les adjoints initiaux, utiles pour initialiser les méthodes indirectes. J'ai mis en œuvre les méthodes directes via le logiciel `Bocop` et via différentes librairies de `Julia` pour prendre en compte les **dynamiques raides** et **intégrer en temps inversé la dynamique de l'adjoint à partir des conditions de transversalité** et obtenir l'adjoint initial [4].

À noter une contribution pour la stimulation musculaire [3] où j'ai mis au point une méthode indirecte basée sur des conditions d'optimalités prenant la forme **d'inégalités intégro-différentielles** laquelle est basée sur un algorithme de point intérieur (moins sensible à l'initialisation qu'un algorithme de type Newton) et permettant de calculer des solutions optimales comparées à celles obtenues par une méthode directe.

Observabilité non linéaire

Le projet sur la stimulation musculaire est un projet industriel autour d'une thèse CIFRE entre l'université de Bourgogne Franche-Comté et Segula Technologies. Dans ce contexte, le but est d'implémenter, à partir d'un modèle de force-fatigue Ding et al. (2000), un régulateur PID (boucle fermé) pour stabiliser la force sur une force de référence en contrôlant les temps d'impulsions. Le modèle de force-fatigue comporte de nombreux paramètres qui ont besoin d'être estimer en fonction du muscle (et donc du patient) considéré. J'ai dans un premier temps calculé un observateur géométrique, basé sur celui décrit dans Gauthier et al. (1992), pour estimer les variables de fatigue (la force pouvant être mesurée par un capteur). Cet observateur a ensuite été utilisé pour implémenter un algorithme Model Predictive Control pour stabiliser la force (boucle fermée) sur plusieurs périodes d'impulsions séparées par des périodes de repos. Les résultats sont décrits dans [7].

Continuation numérique

Une contribution majeure de mes travaux est l'utilisation de formes normales graduées pour calculer un problème proche et plus simple du problème initial. Pour le modèle de nage, le modèle simplifié est proche pour des nages à faibles amplitudes et permet ainsi de calculer une initialisation des méthodes numériques indirectes pour des nages de faibles amplitudes pour le vrai système. Puis une continuation numérique sur l'amplitude des nages a permis de calculer des nages plus générales et pour le nageur de copépode, cela a permis de montrer l'existence d'une famille à un paramètre de nage en boucle simple (seules candidates pour l'optimalité) et de déterminer l'optimum global, montrant en particulier que la nage anormale, ayant des singularités C^1 ne peut pas être minimisante (ce qui est relié au problème ouvert des anormales minimisantes en géométrie sous-Riemannienne Hakavuori and Le Donne (2016)) (voir Figure 2 et [8]).
Pour initialiser les méthodes indirectes pour le problème de transfert orbital à poussé faible, une méthode utilisée consiste à calculer des trajectoires pour des poussées importantes où la convergence de la méthode de tir est aisée puis de faire une continuation sur le paramètre de poussée pour obtenir des trajectoires de faible poussée.

Solutions globales et validation des méthodes locales dans le contexte semi-algébrique

Durant mon postdoctorat avec Jean-Bernard Lasserre, j'ai acquis des compétences pour déterminer l'optimum global pour des problèmes de contrôle optimal semi-algébriques.
L'idée de ces méthodes est de transformer le problème de contrôle optimal comme un problème d'optimisation linéaire sur les mesures. Puis, en manipulant les mesures par leurs moments, le problème revient à résoudre un problème de programmation semi-définie positive qui peut être résolu par la hiérarchie de Lasserre Lasserre (2010).

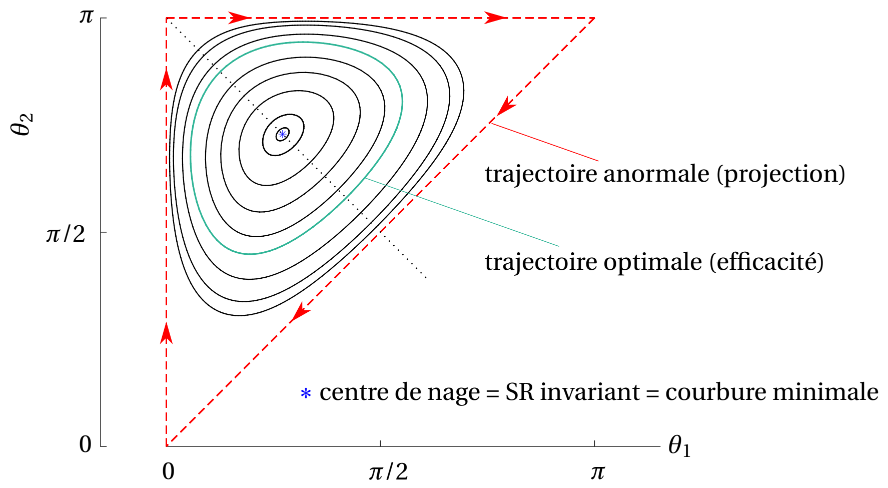

FIGURE 2 – *Projections sur les variables de déformations (θ_1, θ_2) du nageur copépode : de la famille à un paramètre de nages en boucle simple (seules candidates pour l'optimalité), de la trajectoire optimale maximisant l'efficacité géométrique, de la trajectoire anormale et du centre de nage.*

Je me suis inspiré de ces méthodes pour abordé un nouveau problème, celui du problème de contrôle optimal inverse. Cela consiste à se donner un ensemble (potentiellement large) de trajectoires que l'on échantillonne et qui serait les trajectoires minimales d'un Lagrangien à déterminer.
L'approche utilisée est de considérer les équations d'Hamilton-Jacobi-Belmann qui donnent un certificat d'optimalité globale et permet de formuler le problème de contrôle optimal inverse comme un problème d'optimisation polynomiale (globale). En utilisant des certificats de positivité de polynôme, on se ramène à un problème d'optimisation linéaire sur les mesures pouvant être résolu numériquement par une hiérarchie de problèmes de programmation semi-définie positive [15].

Dans un second temps, cette compétence m'a permis de valider des calculs d'extremums locaux obtenus par des méthodes indirectes et directes par cette approche globale dans le problème de saturation d'une paire de spins en imagerie par résonance magnétique [5].

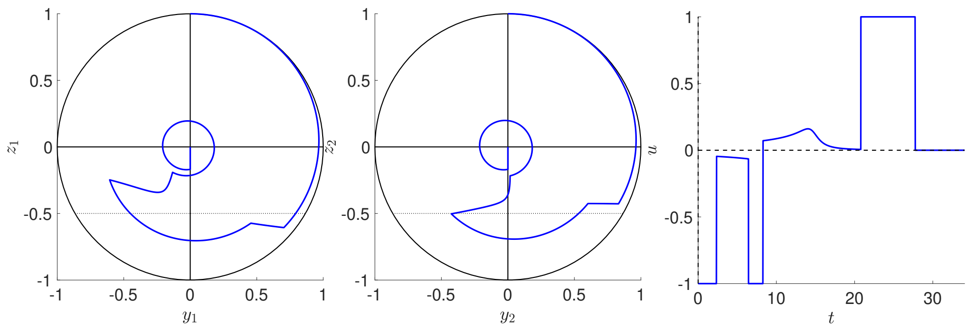

FIGURE 3 – *Trajectoire et contrôle pour le problème de saturations de deux spins de graisse déterminés par* `HamPath` *et* `BOCOP`*. (gauche et centre) Trajectoires pour les deux spins. (droite) Contrôle associé.*

Synthèse temps minimal et rôle des trajectoires singulières

Récemment, un intérêt est porté pour le schéma réactionnel McKeithan ayant pour graphe $\mathrm{T+M} \rightleftarrows \mathrm{A} \longrightarrow \mathrm{B}$ dont la dynamique *non contrôlée*, basée sur la loi d'action de masse, est bien comprise et reliée à la topologie du graphe Feinberg (1972).
L' objectif est de **calculer la synthèse temps minimal** pour atteindre une quantité donnée d'une espèce chimique donnée. Le principe du maximum de Pontryaguine permet de formuler le problème comme un problème de

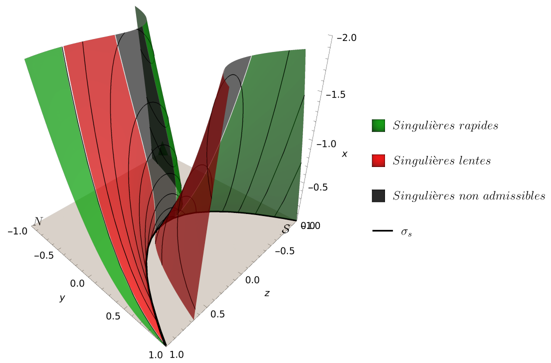

FIGURE 4 – *Surface singulière stratifiée en trajectoires singulières "rapides" et "lentes" pour un modèle d'étude du pli de la surface singulière. L'intersection de cette surface avec* $N : \{(x, y, z) \mid x = 0\}$ *est la parabole* $\mathcal{S}$ *qui se plie en* 0. σ_s *sont les trajectoires singulières.*

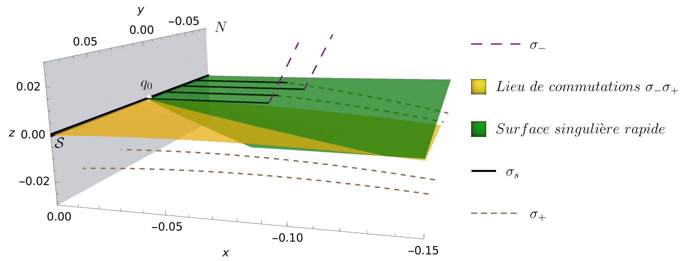

FIGURE 5 – *Exemple de synthèse minimale proche de la cible calculée formellement avec* `Mathematica`*.* $\sigma_\pm$ *sont les trajectoires associées à* $u = \pm 1$. σ_s *sont les trajectoires singulières.*

contrôle optimal temps minimal où la cible N est une surface de codimension un. La surface singulière $\mathcal{S}$, composée de toutes les trajectoires singulières, joue un rôle important pour l'étude de la synthèse temps minimal. Pour certaines valeurs des paramètres du modèle, la courbe $\mathcal{S} \cap N$ se plie et correspond au fait que la condition forte de Legendre-Clebsch généralisée n'est pas satisfaite. Des calculs fins doivent être menés pour calculer les contrôles optimaux en boucle fermée. Dans un premier temps, j'ai proposé un modèle local pour analyser la situation au pli (voir la Figure 4). J'ai **développé des programmes de calcul formel** (`Mathematica`) pour automatiser les calculs des objets géométriques (lieu de coupure, lieux de commutations, classification de la surface singulière) permettant de déduire la synthèse temps minimal [2] en boucle fermée.

6. Publications et pré-publications

Les preprints des travaux référencés dans cette section sont disponibles à partir de ma page personnelle

https://jeremyrouot.github.io/homepage/

`Monographie`

1. B. Bonnard, M. Chyba, J. Rouot, *Geometric and Numerical Optimal Control with Application to Swimming at Low Reynolds Number and Medical Resonance Imaging*, Springer International Publishing, XIV-108, SpringerBriefs in Mathematics (2018).

`Articles soumis`

2. Towards Geometric Time Minimal Control without Legendre Condition and with Multiple Singular Extremals for Chemical Networks, (2020) (avec B. Bonnard) id-hal : hal-02431684
3. Direct and Indirect Methods to Optimize the Muscular Force Response to a Pulse Train of Electrical Stimulation, (2020) (avec T. Bakir, B. Bonnard et L. Bourdin) id-hal : hal-02053566

Articles acceptés dans des journaux avec comité de lecture

4. T. Bakir, B. Bonnard, L. Bourdin, J. Rouot, *Pontryagin-Type Conditions for Optimal Muscular Force Response to Functional Electric Stimulations*, J. Optim. Theory Appl., **184** 2, (2020), pp.581–602.

5. B. Bonnard, O. Cots, J. Rouot, T. Verron, *Time minimal saturation of a pair of spins and application in magnetic resonance imaging,* Math. Control Relat. Fields, **10** 1, (2020), pp.47–88.

6. T. Bakir, B. Bonnard, J. Rouot, *Geometric Optimal Control Techniques to Optimize the Production of Chemical Reactors using Temperature Control*, Annu. Rev. Control, Elsevier, **48** (2019), pp.178–192.

7. T. Bakir, B. Bonnard, J. Rouot, *A case study of optimal input-output system with sampled-data control : Ding et al. force and fatigue muscular control model*, Networks and Heterogeneous Media, AIMS-American Institute of Mathematical Sciences, **14** 1 (2019) pp.79–100.

8. P. Bettiol, B. Bonnard, A. Nolot, J. Rouot, *Sub-Riemannian geometry and swimming at low Reynolds number : the Copepod case*, ESAIM : COCV, EDP Sciences, **25** 9 (2019), 30 pages.

9. B. Bonnard, M. Chyba, J. Rouot, D. Takagi, *Sub-Riemannian geometry, Hamiltonian dynamics, micro-swimmers, Copepod nauplii and Copepod robot*, Pac. J. Math. Ind. **10** 2 (2018), 42 pages.

10. P. Bettiol, B. Bonnard, J. Rouot, *Optimal strokes at low Reynolds number : a geometric and numerical study of Copepod and Purcell swimmers.* SIAM J. Control Optim., **56** 3, (2018) pp. 1794–1822.

11. P. Bettiol, B. Bonnard, L. Giraldi, P. Martinon, J. Rouot, *The three links Purcell swimmer and some geometric problems related to periodic optimal controls.* Variational methods in Imaging and geometric control, Radon Series on Computational and Applied Math, **18**, de Gruyter (2017), 27 pages.

Articles acceptés dans des livres avec comité de lecture

12. B. Bonnard, H. Henninger, J. Rouot. *Lunar perturbation of the metric associated to the averaged orbital transfer.* Analysis and geometry in control theory and its applications, conférence en juin 2014, actes publiés dans Springer InDam series, **11** (2015), 18 pages.

Articles acceptés de conférence avec comité de lecture

13. T. Bakir, B. Bonnard, J. Rouot, *Connection between singular arcs in optimal control using bridges. Physical occurence and Mathematical model.* In Proceedings of the 58th Conference on Decision and Control (2019), 6 pages.

14. J.-B. Caillau, L. Dell'Elce, J.-B. Pomet, J. Rouot. *Optimal control of slow-fast mechanical systems.* Proceedings of the Complex Systems Academy of Excellence, Nice (2018) pp.105–116.

15. J.-B. Lasserre, J. Rouot. *On inverse optimal control via polynomial optimization.* In Proceedings of the 56th IEEE Conférence on Decision and Control, (2017) pp.721–726.

16. P. Bettiol, B. Bonnard, A. Nolot, J. Rouot. *Optimal control theory and the efficiency of the swimming mechanism of the Copepod Zooplankton.* In Proceedings of the 20th IFAC World Congress, Toulouse (2017), 6 pages.

17. B. Bonnard, M. Chyba, J. Rouot, D. Takagi. *A Numerical Approach to the Optimal Control and Efficiency of the Copepod Swimmer.* In Proceedings of the 55th "IEEE Conférence on Decision and Control", Las Vegas (2016), 6 pages.

18. B. Bonnard, A. Jacquemard, J. Rouot. *Optimal Control of an Ensemble of Bloch Equations with Applications in MRI.* In Proceedings of the 55th "IEEE Conférence on Decision and Control", Las Vegas (2016), 6 pages.

7. Activités d'enseignement

Cette partie montre mon intérêt pour la pédagogie. Mes travaux à EPF: École d'Ingénieur-e-s m'ont permis de me former à différentes méthodes de pédagogie. J'y ai développé plusieurs projets visant à utiliser l'outil formel pour assurer un retour adapté aux étudiants.
J'énumère ensuite les différents enseignements dispensés à l'université de Bourgogne Franche-Comté et post-thèse en école d'ingénieur-e-s.

7.1 Lien entre pédagogie et numérique

Méthodes d'évaluations formelles automatiques.
À EPF: École d'Ingénieur-e-s , j'ai intégré une cellule de bénévoles pour mettre en place des méthodes de pédagogiques basées sur l'outil numérique et notamment sur le travail à distance de l'élève et le feedback à lui fournir d'une manière automatisée.
L'outil **Stack** (Sangwin (2015) et https://github.com/maths/moodle-qtype_stack) permet de créé des questions ouvertes en sciences et attend de l'étudiant une expression algébrique qui pourra être corrigée et analysée par un logiciel de calcul formel (Maxima) et fournir un feedback adapté à l'étudiant.
Après avoir créé des séries de questions Stack sur l'ensemble du cycle ingénieur, j'ai entrepris une **collaboration avec l'université d'Aalto (Finlande)** autour du projet Abacus (https://abacus.aalto.fi/) visant à développer et partager ce format d'exercices.
J'ai ensuite déployé ce projet pédagogique pour :

— créer un **cours de mathématiques à distance** sur Moodle ayant pour but de préparer les étudiants au concours d'entrée en première année de EPF: École d'Ingénieur-e-s . Il est composé de supports écrits et vidéos sur le programme de Terminale S et des questions type **Stack** pour former et évaluer les étudiants.

— aider les étudiants en difficulté car le niveau des étudiants est très homogène à leur arrivée à EPF: École d'Ingénieur-e-s , j'ai utilisé **l'outil Stack pour une remise à niveau**. Suite à ces travaux, j'ai été **invité par l'université HELMO** (Liège) pour présenter ce projet.

— compléter mes cours (programmation, algèbre, équations différentielles, probabilités, statistiques, analyse numérique, machine learning...), cet outils était utilisé pour une **évaluation formative des élèves. Cela permettait, automatiquement et régulièrement, d'identifier les difficultés de chaque étudiant et de leur fournir un suivi individuel**.

7.2 Expériences d'enseignements

♣ **2015–2016** *Université de Bourgogne Franche-Comté (Dijon).*

Statut :	Moniteur	Type :	TDs
Volume :	64h	Public :	L1 et L2 (filière informatique)
Contact :	François Blais (UBFC)		
Contenu :	Algèbre.		

Les enseignements étaient destinés à des groupes d'environ 30 étudiants. En L1, les exercices portaient sur les structures algébriques (groupes, anneau, corps), les espaces vectoriels, les applications linéaires et le calcul matriciel. En L2, nous avons vu la réduction d'endomorphisme, l'algèbre bilinéaire et les espaces vectoriels normés.

♣ **2016–2017** *ENSEEIHT (Toulouse).*

Statut :	Vacataire	Type :	TPs
Volume :	18h	Public :	4A
Contact :	Olivier Cots (ENSEEIHT)		
Contenu :	Introduction au contrôle optimal. Résolution d'équations aux dérivées partielles par éléments finis.		

Introduction au contrôle optimal. Les premiers travaux pratiques étaient liés à mes travaux de thèse et portait sur des problèmes de contrôle optimal en mécanique spatiale. Il a été réalisé avec Olivier Cots (ENSEEIHT). Les compétences visées étaient l'application du Principe du Maximum, la résolution numérique du problème aux deux bouts sous-jacent, l'estimation de l'erreur des schémas numériques et l'utilisation de la de différentiation automatique pour calculer la différentielle de la fonction de tir.
On y présentait la méthode de tir simple et de tir multiple, ainsi que la méthode de continuation en utilisant le logiciel `HamPath` Caillau et al. (2012) sur un problème de transfert orbital. Le sujet et les ressources sont

disponibles ici :

https://jeremyrouot.github.io/homepage/Teaching/ENSEEIHT/TP-OCP-2A/

Résolution d'équations aux dérivées partielles par éléments finis. La deuxième série de travaux pratiques concernait la résolution numérique d'une EDP elliptique et une EDP parabolique par la méthode des éléments finis. Le sujet et les ressources sont disponibles ici :

https://jeremyrouot.github.io/homepage/Teaching/ENSEEIHT/TP-EDP-2A/

♣ **Nov. 2017** *Université de Chitkara (Chandigarh).*

Invité par l'université de Chitkara pour enseigner un cours d'introduction en automatique aux élèves de l'université de Chitkara sur une durée de quinze jours pour un volume de 16h de cours.

Statut :	Enseignant invité	Type :	Cours
Volume :	16h	Public :	Bachelor (40 élèves)
Contact :	Stefan Seiler (EPF)		
Contenu :	Introduction à l'automatique.		

Les élèves étaient spécialisés en mécatronique et maîtrisaient les concepts d'algèbre linéaire (exponentielle de matrices, réduction de Jordan) et de système dynamique (Cauchy-Lipschitz, stabilité, système linéaire). J'ai commencé par introduire la modélisation d'un système de contrôle à travers diverses applications (mécanique, électricité, biologie), puis j'ai illustré les trois notions suivantes en théorie du contrôle et ses problématiques :

— Contrôlabilité des systèmes linéaires autonomes (condition de Kalman, forme de Brunovski)
— Stabilité des systèmes linéaires autonomes (critère de Routh et de Hurwitz)
— Observabilité : problématique illustrée sur le problème de stimulation musculaire du modèle force-fatigue de Ding [4].

♣ **2017–2019** *EPF: École d'Ingénieur-e-s (Troyes).*

Statut :	Enseignant	Type :	Cours, TDs, TPs
Volume :	400h	Public :	1A, 2A (promotion de 80)
Contact :	Arnaud D'Aboville (EPF)		
Contenu :	Programme de classes préparatoires en algèbre, analyse et probabilités.		

Mon enseignement à EPF: École d'Ingénieur-e-s a été très riche sur le plan administratif et pédagogique. En 1A et 2A les étudiants suivent des cours en amphithéâtre (environ 80 étudiants) et puis s'exercent sur des travaux dirigés en groupe d'une quarantaine d'étudiants. Je me suis beaucoup investi sur la *réflexion pédagogique* à mener notamment sur le travail à distance que doit fournir l'étudiant.

J'ai participé à des formations pour les méthodes de pédagogie innovantes (blended learning), ou encore sur la réalisation de vidéos pédagogiques. Puis j'ai entrepris d'enseigner avec des méthodes pédagogiques liées à l'outil formel et numérique et notamment le plugin Stack pour les mathématiques (voir Section 7.1). J'ai mis en place un SPOC (Small Private Online Course) **pour préparer les étudiants au concours d'entrée de EPF: École d'Ingénieur-e-s en mathématiques**.

J'étais le **responsable des enseignements mathématiques de EPF: École d'Ingénieur-e-s sur le site de Troyes**. J'avais pour mission de **gérer la quinzaine de vacataires** qui venaient donner des cours à EPF: École d'Ingénieur-e-s , de leur fournir les supports de cours et de dispenser des cours en amphithéâtre et/ou des travaux dirigés. Le cours que j'ai donné portait sur le programme des classes préparatoires PTSI-PSI et mon support de cours et exercices de mathématiques pour les étudiants de deuxième année est disponible ici

https://jeremyrouot.github.io/homepage/Teaching/EPF/livre_cours_2A.pdf

pour une vision plus détaillée.

Volume :	250h	Public :	3A (promotion de 110)
Contact :	Arnaud D'Aboville (EPF)		
Contenu :	Statistiques inférentielles.		
	Analyse Numérique.		
	Introduction aux sciences des données.		
	Encadrement de projets étudiants.		

Statistiques inférentielles (50h). Les statistiques descriptives ont été vu en première et deuxième année. Il s'agissait ici de faire des prévisions et prendre des décisions au vu de données avec deux méthodes : *l'estimation* (ponctuelle et par intervalles de confiance, méthode des moments et du maximum de vraisemblance) et les tests d'hypothèses. J'abordais enfin l'estimation bayésienne et la régression linéaire pour introduire la notion d'apprentissage.

Analyse Numérique (80h). Ce cours présentait la résolution numérique d'équations différentielles ordinaires par différents schémas numériques (Euler, Runge Kutta, Crank-Nicholson) et l'étude théorique de ces schémas sur les notions d'erreur, de stabilité et de points singuliers des champs de vecteurs.
Une deuxième partie du cours concernait la résolution numérique d'équations aux dérivées partielles en utilisant les différences finies, où l'analyse théorique était menée (stabilité, convergence, consistance) avec la théorie de Fourier. Je présentais enfin la formulation faible pour des équations elliptiques pour introduire la résolution par la méthodes des éléments finis, laquelle était vue en travaux pratiques.

Introduction aux sciences des données (30h). Je présentais des algorithmes classiques de machine learning essentiellement l'un avec une approche générative (classification avec la formule de Bayes) et l'autre avec une approche discriminative (perceptron). Le but était de leur montrer les problématiques du domaine avec notamment la malédiction de la dimensionalité illustrée par l'algorithme des plus proches voisin et par le théorème d'approximation d'une fonction par un réseau de deux neurones.
Enfin, sur l'utilisation des librairies `Python` dédiées aux algorithmes de Machine Learning programmation, j'ai **organisé un challenge sur l'ensemble de la promotion** sur la plateforme `Kaggle` dont le problème visait à estimer le prix d'un bien immobilier à partir d'une base de données donnant plusieurs caractéristiques d'autres biens. La page du challenge se trouve ici :

`https://www.kaggle.com/c/epf-3a/overview`

Encadrement de projets étudiants (90h). Le mois de juin est consacré à un projet de 45h pour les étudiants de troisième année (groupe de 10 étudiants). Le premier **projet était en lien avec un de mes projets de recherche** : la nage à faible nombre de Reynolds à cheval entre la mécatronique et la mécanique des fluides. Les élèves devaient élaborer un robot et un protocole expérimental pour valider expérimentalement le modèle de nage du copépode à faible nombre de Reynolds, comme cela a été illustré dans le papier [9].

Le deuxième projet a été réalisé avec Denis Paumier, directeur artistique d'une troupe de jongleurs. Une théorie mathématique formalise les différentes figures de jonglerie à l'image de la partition de musique Shannon (1993). Le but était d'écrire un programme en Java permettant à l'utilisateur de rentrer une figure sous une notation Multi-Hand, de vérifier que cette notation correspondait à une figure de jonglerie admissible et, le cas échéant, de simuler la figure avec une interface graphique.

♣ **2020–** *ISEN (Brest).*

Volume :	165h	Public :	tous niveaux (groupes ≤ 30 élèves)
Contact :	Marc Faudeil (ISEN)		
Contenu :	Programmation WEB (1A), 60h		
	Réseau : routage (2A), 60h		
	Projet informatique en langage C (3A), 45h		
	Encadrement d'un projet Master		

Programmation WEB. Réalisation de site web (front end) en HTML5, CSS, Javascript et PHP.
Réseau. Il s'agit des bases en réseau informatique : décrire le modèle OSI et TCP/IP, configurer un routeur et un switch, construire un réseau VLAN, description des différents protocoles des différentes couches réseaux.
Projet informatique en langage C. Il s'agit d'écrire un programme qui acquiert le pouls sanguin et effectue un pré-traitement des données pour un rendu avec une interface graphique au praticien.
Encadrement de projets Master. Construire une carte globale des particules fines à partir d'algorithmes d'apprentissage appliquées sur des données collectées par différentes stations.

Références additionnelles

Bonnans, Frédéric, J., D. Giorgi, V. Grelard, B. Heymann, S. Maindrault, P. Martinon, O. Tissot, and J. Liu
2017. Bocop – A collection of examples. Technical report, INRIA.

Caillau, J.-B., O. Cots, and J. Gergaud
2012. Differential continuation for regular optimal control problems. *Optimization Methods and Software*, 27(2) :177–196.

Ding, J., A. S. Wexler, and S. A. Binder-Macleod

2000. Development of a mathematical model that predicts optimal muscle activation patterns by using brief trains. *Journal of Applied Physiology*, 88(3) :917–925.

Feinberg, M.
1972. On chemical kinetics of a certain class. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 46(1) :1–41.

Gauthier, J.-P., H. Hammouri, S. Othman, et al.
1992. A simple observer for nonlinear systems applications to bioreactors. *IEEE Transactions on automatic control*, 37(6) :875–880.

Hakavuori, E. and E. Le Donne
2016. Non-minimality of corners in subriemannian geometry. *Inventiones mathematicae*, 206(3) :693–704.

Lasserre, J. B.
2010. *Moments, positive polynomials and their applications*, volume 1 of *Imperial College Press Optimization Series*. Imperial College Press, London.

Sanders, J. A., F. Verhulst, and J. Murdock
2007. Averaging methods in nonlinear dynamical systems. Pp. 1–19. Springer.

Sangwin, C.
2015. Computer aided assessment of mathematics using stack. In *Selected Regular Lectures from the 12th International Congress on Mathematical Education*, Pp. 695–713. Springer.

Shannon, C. E.
1993. Scientific aspects of juggling.