

# Raphaël Charrondière

## Présentation analytique

### Table des matières

## 1 Informations personnelles

- 📍 Adresse : 74 cours Jean Jaurès  
3800 Grenoble
- @ Email : raphael.charrondiere@ens-lyon.fr ou r.charrondiere@hotmail.fr
- ☎ Téléphone : +33 6 18 97 31 61
- 🔗 Page personnelle : rcharron.github.io

## 2 Parcours et diplômes

### 2.1 CPGE

2010 – 2013, MSPI puis MP, Lycée Blaise Pascal à Clermont-Ferrand

### 2.2 E.N.S. Lyon

2013-2018, Entrée sur concours au département informatique.

- Licence en informatique, décernée par l'Université Claude Bernard Lyon 1, diplôme en 2014
- Master SCIENCE, TECHNOLOGIES, SANTÉ  
mention INFORMATIQUE spécialité INFORMATIQUE FONDAMENTALE,  
décerné par l'Université Claude Bernard Lyon 1, diplôme en 2016. Stage de recherche :  
Ribbons network supervisé par Bernhard Thomaszewski dans le groupe matériels à  
laboratoire Disney Research Zürich.
- Semestre en Erasmus (1<sup>ière</sup> année de Master 2) à l'ETH Zürich
- Année de césure pour effectuer un stage dans le privé en 2016 (Disney Research Zürich)
- Projet de recherche en 2017 pour un semestre (c.f. expériences professionnelles)
- Stage de "préthèse" 2017-2018

### 2.3 Thèse

- 2018-2021
- Lieu : Université Grenoble Alpes, laboratoire Jean Kuntzmann, UMR 5224
- Directrice de thèse : Florence Bertails Descoubes, DR à l'INRIA Grenoble
- Coencadrant : Sebastien Neukirch DR CNRS, institut Jean le Rond d'Alembert
- Sujet : Modélisation numérique de rubans par éléments en courbures
- Manuscrit disponible sur le site officiel <http://www.theses.fr/2021GRALM038>
- Date de soutenance : 14 octobre 2021
- Rapporteurs :
  - Olivier Brûls, Professeur à l'Université de Liège

- Etienne Vouga, Assistant Professeur à "The University of Texas at Austin"
- Rapports de thèse en annexe
- Membres du jury :
  - Basile Audoly, DR, CNRS
  - Florence Bertails Descoubes, DR à l'INRIA Grenoble (Directrice de thèse)
  - Olivier Brüls, Professeur à l'Université de Liège (Rapporteur)
  - Sebastien Neukirch DR CNRS, institut Jean le Rond d'Alembert (Coencadrant)
  - Damien Rohmer, professeur à l'école Polytechnique
  - Etienne Vouga, Assistant Professeur à "The University of Texas at Austin" (Rapporteur)
- *Sujet : Les rubans constituent une structure mince intermédiaire entre les tiges et les coques. Ils servent à modéliser une large gamme d'objets réels à diverses échelles. Par exemple, à l'échelle nanoscopique on retrouve les protéines ou molécules d'ADN qui peuvent être représentées par des rubans. À l'échelle mésoscopique on retrouve les bandes de tissu ou de papier. Et à l'échelle macroscopique les rubans deviennent populaires en architecture, servant par exemple à réaliser des structures déployables. Si de nombreux modèles numériques ont été développés ces dernières décennies pour les tiges et les plaques, il en existe en revanche très peu qui soient spécifiques aux rubans. Dans cette thèse, nous proposons un modèle numérique robuste et efficace pour calculer les états d'équilibre stables d'un ruban naturellement plat ou courbé. Notre contribution se décompose en trois axes. Premièrement, l'établissement du modèle numérique s'appuie sur la description analytique de van der Heijden et Audoly. La discrétisation spatiale se base sur des éléments à courbure normale linéaire et torsion géodésique quadratique en l'abscisse curviligne, qui permettent une grande richesse de représentation cinématique tout en garantissant l'inextensibilité parfaite du ruban. Les équilibres stables sont calculés par minimisation des énergies de gravité et d'élasticité du ruban selon la formulation de Sadowsky ou de Wunderlich, sous contrainte de développabilité. Le ruban peut être encastré par une ou deux de ses extrémités. Aussi, le contact est géré entre le ruban et un ou plusieurs plans. Dans une seconde contribution, nous comparons notre modèle de ruban au modèle de tige des super-clothoïdes et au modèle de coques de Naghdi. Étant plus général, le modèle de coque donne les mêmes équilibres que ceux de notre modèle. Cependant, étant non spécifique, le modèle de coque prend plusieurs minutes pour converger vers l'équilibre, à comparer aux quelques secondes nécessaires à notre modèle. On valide ainsi ce dernier, tout en montrant son efficacité. De son côté, le modèle de tige avec une section plate ne parvient pas aux mêmes résultats, montrant l'utilité d'un modèle de rubans. Enfin nous menons une série d'expériences, en particulier le calcul d'un ruban de Moebius pesant que l'on pose sur une table, l'expérience de Benoît Roman consistant à écraser un ruban entre deux plaques et une expérience de déversement latéral. Cela nous conduit finalement à discuter les limites de notre modèle réduit, tant au niveau des équations continues dont il s'inspire, que de leur discrétisation.*

## 2.4 Qualification

Qualification en section 27 - Informatique, obtenue à la campagne 2022

## 2.5 Chercheur postdoctorant

— Depuis Novembre 2021

- À l'ISTA (Institute of science and technology Austria <https://ist.ac.at>)
- Dans le groupe "Computer Graphics and Digital Fabrication" dirigé par Bernd Bickel (<https://ist.ac.at/en/research/bickel-group/>)
- Sujet de recherche actuel commun au doctorant Martin Thoresen : *On considère une feuille épaisse de silicone dans lequel est intégré un réseau de tuyaux interconnectés. En injectant de l'air dans ce réseau, la feuille va alors gonfler et s'étendre. On peut donc appeler ce réseau chambre à air. Pour contraindre la forme de la feuille gonflée, on rajoute sur les deux côtés un réseau de ressorts créé via un silicone moins élastique. Le facteur d'extension de la feuille lorsqu'elle est gonflée va alors dépendre de la longueur à vide des ressorts. Pour être plus clair, les figures ?? et ?? en annexes montrent les photos d'un tel système avec une feuille gonflée ou non. De tels systèmes sont courants en informatique graphique : il s'agit de structures déployables. Elles ont l'intérêt d'être stockables à plat, et d'être plus faciles à manufacturer. Dans ce projet, la facilité de manufacture est assez discutable, mais ce système a un autre avantage. En effet, il peut aussi s'inscrire dans le domaine des robots souples, car le gonflage de la structure peut être assimilée au mouvement d'un robot souple. L'intérêt d'un tel robot par rapport aux robots classiques est une meilleure gestion de contact. En effet, la structure souple peut facilement s'adapter à la géométrie de l'objet avec lequel il y a contact. Si la surface est rigide, il n'y aura en général que quelques points de contact. Ce projet a pour but final de concevoir un algorithme de conception inversée. C'est-à-dire calculer à partir de la forme gonflée voulue les réseaux de ressorts adéquats. Comme toute forme n'est pas forcément atteignable, l'algorithme peut retourner la paire de réseaux la plus adaptée et indiquer à l'utilisateur quelle partie pose problème.*
- Note importante : je me suis rattaché à ce projet, en tant que renfort, car le projet stagnait. Mes contributions concernent surtout la partie simulation physique directe via la méthode des éléments finis. Aussi, comme il n'y a pour l'instant aucune publication sur ce travail, il est demandé au lecteur de ne pas parler de ce sujet en dehors du cadre de ma candidature.

## 2.6 Formation à l'enseignement

L'université Grenoble-Alpes propose en complément du doctorat un label enseignement. Il s'agit d'une formation complémentaire permettant d'acquérir une base théorique sur l'enseignement en université. Vous trouverez en dernière page une attestation de ma réussite.

## 2.7 Connaissances

- Connaissances linguistiques :
  - Français : langue maternelle
  - Allemand : C1 (Diplôme de l'institut Goethe)
  - Anglais : B2 (Diplôme TOEIC)
- Connaissances techniques :
  - Langages de programmation : C++ (avancé), Java, C#, OCaml, python, lua (basique), matlab, maple, php, SQL (débutant)
  - Bibliothèques informatiques : Qt (pour les interfaces graphiques), Eigen (algèbre linéaire), IPOPT (optimisation sous contraintes), fenics (résolution de problème par méthode des éléments finis)

- Connaissances générales en informatique : algorithmes, modèles de calculs, compilation, architecture, réseaux, théorie des jeux, intelligence artificielles, rendu, simulation physique, etc.

## 3 Expériences professionnelles

### 3.1 Stages de recherche

- Réseau neuronal à choix. Stage d'introduction à la recherche au LIP6 à Paris, juin et juillet 2014, encadré par Ludovic Denoyer, Patrick Gallinari et Benjamin Piwowarski. Contexte : stage de fin de licence, convention d'accueil en tant que normalien. Détails sur le sujet : *Lorsque l'on crée un réseau de neurones pour apprendre une fonction compliquée, il faut que celui-ci soit assez complexe pour apprendre celle-ci. Rajouter des couches au réseau n'est pas efficace pour un apprentissage classique, car les premières couches sont très peu modifiées. Ici on présente un modèle sous forme d'arbre qui permet d'augmenter le pouvoir expressif du réseau tout en gardant une profondeur raisonnable. Ce stage a pour but l'implémentation d'un tel modèle en s'appuyant sur [Wierstra, Logic Journal of the IGPL, 2010], puis de l'étudier en utilisant des jeux de données existants.*
- Analyse de "Business Process Model and Notation". Stage de recherche à la "Friedrich Schiller Universität" à Jena de mai à août 2015, encadré par Wolfram Amme et Thomas Prinz. Contexte : stage de recherche à l'étranger en fin de master 1, convention d'accueil en tant que normalien. Détails sur le sujet : *Le stage se concentre sur l'implémentation de la transformation d'un processus de gestion dans une nouvelle forme nommée «Foldout Workflow Graph». Cette nouvelle forme permet des analyses plus rapides du processus. Le stage s'intéresse alors à l'analyse, en particulier, la détection d'interblocages («deadlock»).*
- Réseau de rubans. Stage de recherche dans le privé, à Disney Research Zürich de mars 2016 à janvier 2017, encadré par Bernhard Thomaszewski. Contexte : d'abord stage de fin de master 2, prolongé par intérêt pour ce sujet, statut stagiaire rémunéré. Par incompatibilité avec le statut de normalien, stage réalisé pendant un congé sans solde. Pour raison de confidentialité, aucun détail n'est donné sur le sujet.
- Raffinement de chevelure. Projet de recherche à la "Columbia University" à New York d'avril à juillet 2017 encadré par Eitan Grinspun. Contexte : projet de recherche en tant que normalien. Détails sur le sujet : *Un humain a en moyenne 120 000 cheveux sur la tête. Le coût de simulation d'une chevelure complète est donc très élevé. En effet, il y a énormément de contacts entre les cheveux, ce qui rend le système dense et donc coûteux à résoudre (y compris pour l'industrie). Une technique est alors de baisser le nombre de cheveux à simuler d'un ou deux ordre de grandeur. Ce stage se concentre sur l'étape suivante. Il est nécessaire de raffiner la chevelure pour retrouver un nombre de cheveux proche de la réalité afin d'augmenter le réalisme graphique. On propose d'interpoler les nouveaux cheveux via un champ de vecteur. Lorsque les cheveux restent parallèles, une interpolation naïve est efficace. Cependant si les cheveux ont tendance à se croiser ou s'écarter avec un grand angle, la manière d'interpoler aura un grand impact visuel. La cohérence temporelle est un autre aspect qui vient s'ajouter au problème.*

### 3.2 Enseignement

Enseignement pendant le doctorat à l'UFR IM<sup>2</sup>AG de l'Université Grenoble Alpes avec le statut vacataire. Pour une liste détaillée des enseignements se référer à l'attestation incluse dans le présent document.

**Détails sur l'un des enseignements :** Cours « Validation d'algorithmes et Modèles Statistiques », dispensé aux étudiants de L<sub>3</sub>MIAGE à l'université Grenoble-Alpes. Ce cours comporte un cours magistral, des séances de TD sur la validation d'algorithmes et un cours-TD indépendant sur les modèles statistiques. J'étais responsable de toute la partie validation d'algorithmes, cependant je n'ai encadré qu'un des groupes de TD chaque année.

Mon cours présente des méthodes pour vérifier son programme informatique. Il y a deux parties, une plus théorique et une plus appliquée. La partie théorique est abstraite et fait intervenir des notions de mathématiques qui sont expliquées en cours. Il s'agira alors de retrouver des propriétés logiques dans son code informatique (ou son algorithme) pour prouver que celui-ci est correct (fait ce qu'il doit faire) et termine. La partie pratique demande à tester un programme, soit en analysant sa structure, soit en construisant un modèle simple pour l'abstraire, soit en n'ayant que la spécification du programme. Ces deux parties sont donc indépendantes.

En reprenant le programme du cours, j'ai refait les supports pour mieux me les approprier ainsi que les sujets de TD. Vous trouverez ces ressources sur la page <https://rcharron.github.io/supportcours/list>.

### 3.3 Collaborations

J'ai eu au cours de ma thèse la possibilité de collaborer sur un travail de validation de simulateurs physiques en graphique. Cette collaboration a été faite avec mes encadrants de thèses, certaines personnes de mon équipe et un externe. Il s'agissait de dresser un ensemble de protocoles expérimentaux pour valider l'aspect prédictif de simulateur physiques en graphique. Je laisse le lecteur se référer à la partie *publications* (??) pour prendre connaissance du sujet détaillé et de mon apport à ce travail. Même si certaines personnes appartenaient à mon équipe, nous n'avons pas pour habitude de travailler en commun (hors cadre réunion d'équipe, où nous pouvons échanger nos idées) puisque nos sujets d'études ne sont pas directement liés. C'était donc l'occasion de découvrir une façon de travailler à beaucoup. Un grand intérêt de cette collaboration était d'interagir avec des gens de la communauté graphique (Mickael Ly, Haroon Rasheed, Florence Bertails-Descoubes), de la communauté mécanique (Sebastien Neukirch et Arnaud Lazarus) et quelqu'un de plus expérimentaliste (Victor Romero). Cette collaboration a bien fonctionné, puisque nous avons réussi à nous coordonner et travailler efficacement en parallèle.

### 3.4 Responsabilités administratives

J'ai été élu pour 2 ans au conseil de l'école doctorale MSTII pour la période 2019 à 2021. (Voir l'attestation en annexe)

## 4 Publications

### Conférences nationales

« Colloque national en calcul des structures » (<https://csma2019.sciencesconf.org/>)

Charrondière, R., Bertails-Descoubes, F., & Neukirch, S. (2019, mai). Modélisation numérique de rubans en éléments de haut degré. In *14ème Colloque National en Calcul des Structures (CSMA 2019)* (p. 1-8). Giens, France. Consulté sur <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02384085>

« **Journées françaises d’informatique graphique et de réalité virtuelle** » (<https://jfigrv2019.sciencesconf.org/>)

Charrondière, R., Bertails-Descoubes, F., Neukirch, S., & Romero, V. (2019, novembre). Modélisation numérique de rubans en éléments de haut degré. In *JF.IG.RV 2019 - Journées Françaises d’Informatique Graphique et de Réalité Virtuelle* (p. 1-7). Marseille, France. Consulté sur <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02384170>

## Revue internationale avec comité de lecture

Charrondière, R., Bertails-Descoubes, F., Neukirch, S., & Romero, V. (2020, juin). Numerical modeling of inextensible elastic ribbons with curvature-based elements. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 364, 112922. doi: 10.1016/j.cma.2020.112922

Ce travail est la publication résultant de mes travaux de thèse à mi-parcours. Le résumé traduit en français est : *Nous proposons un modèle numérique robuste et efficace pour calculer des configurations d’équilibre stable de rubans élastiques, encastré en une extrémité et présentant des formes naturelles arbitrairement courbées. Notre schéma de discrétisation spatiale repose sur des éléments caractérisés par une courbure normale linéaire et une torsion géodésique quadratique par rapport à son abscisse curviligne (selon la longueur). Une telle discrétisation d’ordre élevé permet une grande diversité de représentations cinématiques, tout en garantissant que la surface du ruban reste parfaitement inextensible. Les équilibres stables sont calculés en minimisant la somme de l’énergie de pesanteur et de l’énergie élastique du ruban, sous une contrainte de développabilité. Notre algorithme se compare favorablement aux méthodes de tir et de collocation standard, ainsi qu’aux expériences. Il montre en outre des différences significatives de comportement par rapport aux modèles numériques pour les tiges élastiques minces, tout en offrant un temps de calculs inférieur de plusieurs ordres de grandeurs par rapport à un simulateur plus général de coques élastiques minces. Ces résultats confirment l’intérêt de concevoir un modèle numérique spécial dédié aux rubans.*

Romero, V., Ly, M., Rasheed, A. H., Charrondière, R., Lazarus, A., Neukirch, S., & Bertails-Descoubes, F. (2021, août). Physical validation of simulators in computer graphics : a new framework dedicated to slender elastic structures and frictional contact. *ACM Transactions on Graphics*, 40(4), 1–19. doi: 10.1145/3450626.3459931

Ce travail est une collaboration interdisciplinaire entre informatique graphique et mécanique. Le résumé traduit en français est : *Nous introduisons un ensemble sélectionné de protocoles inspirés de la communauté Physique de la Matière Molle afin de valider des simulateurs de l’informatique graphiques dédiés aux structures élastiques élancées éventuellement soumises à un contact de type frottement sec. Bien que ces simulateurs soient principalement destinés aux films d’animations et aux effets visuels, ils sont de plus en plus utilisés comme outils de conception virtuels pour prédire la forme et la déformation d’objets réels; d’où la nécessité d’une validation quantitative minutieuse. Nos tests, vérifiés expérimentalement, sont conçus pour évaluer soigneusement la prédictibilité de ces simulateurs sur divers aspects, tels que l’élasticité en flexion, le couplage flexion-torsion et le contact frictionnel. Nous avons appliqué ces tests sur un certain nombre de codes populaires de l’infographie, en définissant une méthodologie rigoureuse, cohérente et aussi juste que*

*possible. Nos résultats montrent que certains simulateurs populaires pour les plaques/coques et le contact par friction échouent même sur les scénarios les plus simples, alors que les simulateurs les plus récents ainsi que les codes bien connus pour les tiges fonctionnent généralement bien et parfois même mieux que certains outils commerciaux de référence de l'ingénierie mécanique. Pour rendre nos protocoles de validation facilement applicables à n'importe quel simulateur, nous fournissons une description détaillée de notre méthodologie et nous distribuons toutes les données nécessaires pour se comparer à nos résultats.*

Ma contribution consiste en le calcul de données résultants surtout de mon modèle, ainsi que de la rédaction du matériel supplémentaire « Recipe Manual for Validation » détaillant la méthode utilisée pour (re)produire les données. Ce manuel explique aussi au lecteur voulant comparer son simulateur à nos résultats quel algorithme utiliser.

## **5 Annexes**



FIGURE 1 – Projet de recherche postdoctoral : un aperçu du système. Un autre réseau est présent de l'autre côté de la feuille. On aperçoit légèrement la chambre à air par transparence en forme de nid d'abeille. Certains points sont coloriés en rouge ou vert, ce sont à ces endroits que le réseau est collé à la feuille. Voir le sujet de recherche en 2.5 pour plus de détails.

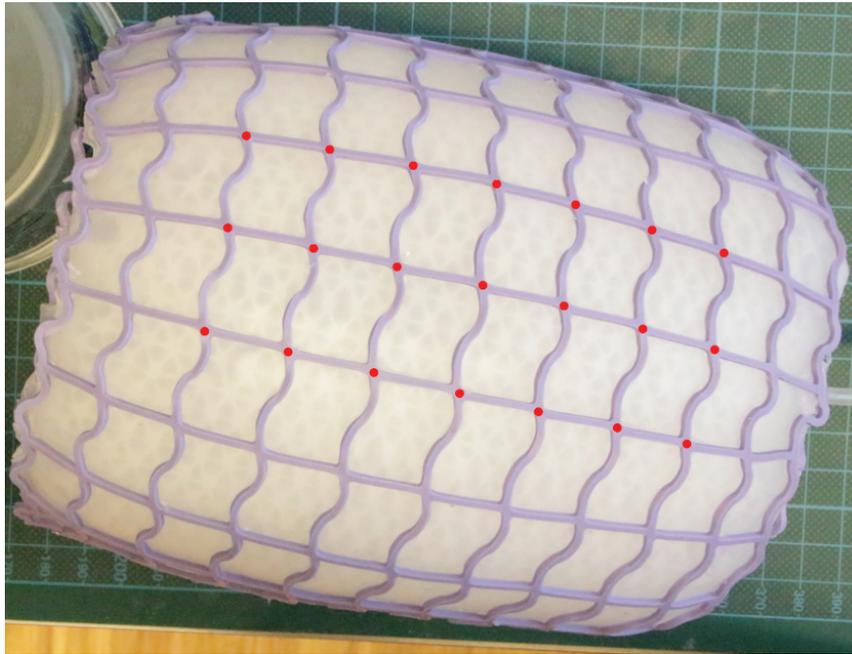


FIGURE 2 – Projet de recherche postdoctoral : un aperçu du système un fois gonflé. Le réseau non visible (de l'autre côté de la feuille) ne comporte que des ressorts donc la longueur à vide correspond à la distance entre attaches. En d'autres termes, quand le système n'est pas gonflé, le réseau non visible n'est constitué que de lignes droites. On observe ici que le système forme un "C". En effet, la différence des longueurs à vide des ressorts entre les deux faces permet à la feuille de courber.

## Rapport d'évaluation du mémoire de thèse / Evaluation report of the PhD thesis

<b>Doctorant</b> <b>PhD student</b>	Nom prénom / Full name Ecole Doctorale / Doctoral School Titre thèse / PhD Title	CHARRONDIÈRE Raphaël Université Grenoble Alpes Modélisation numérique de rubans par éléments en courbure
<b>Rapporteur</b> <b>Reviewer</b>	Nom prénom / Full name Etablissement / Institution Statut, fonction / Status, position	BRÜLS Olivier Université de Liège Professeur

### Qualité du mémoire, rédaction & illustrations / Thesis quality, style & illustrations

 Satisfaisant / Satisfactory [ ]
  Bon / Good [ ]
  Très bon / Very good [x]
  Exceptionnel [ ]

#### Commentaires/comments :

Le travail suit une méthodologie rigoureuse et s'accompagne d'une argumentation adéquate des choix réalisés. La rédaction est soignée et bien illustrée. Le texte va à l'essentiel, s'appuie sur des explications claires et est agréable à lire.

### Contexte, état de l'art, collaborations / Background, state of the art, collaborations :

#### Commentaires/comments :

Le besoin de modélisation des rubans est brièvement mis en perspective dans quelques domaines d'application. La nécessité de développer un modèle se différenciant des modèles classiques de tige et de coque est bien argumentée dans le travail.

M. CHARRONDIÈRE s'appuie sur des modèles analytiques de ruban de Sadowsky et Wunderlich et propose une procédure de résolution numérique de ces modèles dans un code de calcul capable de traiter une large palette de cas de chargements.

### Qualité scientifique, méthodologie, expérimentations, validation

#### Scientific quality, methodology, experiments, validation

 Satisfaisant / Satisfactory [ ]
  Bon / Good [ ]
  Très bon / Very good [ ]
  Exceptionnel [x]

#### Commentaires/comments :

M. CHARRONDIÈRE présente une procédure complète et innovante de modélisation mathématique, de discrétisation spatiale et de résolution numérique du comportement mécanique de ruban. Un travail d'analyse approfondi est réalisé sur base de tests numériques pertinents, permettant la comparaison à d'autres méthodes de référence et à des résultats expérimentaux.

On peut souligner l'objectivité de la présentation, qui met l'accent non seulement sur le potentiel de la méthode mais qui détaille également ses limitations.

### Apports personnels, originalité, valorisation, perspectives

#### Personal contributions, originality, valorization, prospects

#### Commentaires/comments :

La formulation proposée est originale et répond bien aux spécificités du problème. Notamment, le choix d'une paramétrisation non-matérielle avec des variables de courbure est peu courant mais est clairement justifié par le candidat dans le contexte de la modélisation des rubans. La supériorité de cette approche par rapport à des modèles plus conventionnels de tige ou de coque est démontrée par de multiples cas tests.

Enfin, le travail dégage des perspectives intéressantes en montrant l'importance d'étendre le modèle en relâchant l'hypothèse d'inextensibilité et d'aller vers un modèle pseudo-dynamique permettant la création dynamique d'éléments de contact.

---

**Conclusions du rapporteur / Reviewer's conclusions**

Commentaires/comments :

Vu la qualité des travaux de recherche présentés, je recommande sans réserve la soutenance de la thèse de doctorat de M. CHARRONDIÈRE.

**Avis du rapporteur / Reviewer's opinion :**

Défavorable à la soutenance / Unfavorable to the defence

Favorable

Date

Signature

**Visa du directeur de l'école doctorale :**

---

**Rapport détaillé, commentaires libres, questionnements, correction demandées**

**Detailed report, free comments, questions, requested corrections**

Voir rapport en pièce jointe.

## Rapport relatif à la thèse de doctorat de Monsieur Raphaël CHARRONDIÈRE intitulée

### *Modélisation numérique de rubans par éléments en courbure*

Le travail de M. CHARRONDIÈRE porte sur le développement de modèles pour l'étude de l'équilibre statique de rubans à section rectangulaire. Ces objets sont particulièrement élancés et déformables et leur géométrie est telle que la longueur est beaucoup plus grande que la largeur et la largeur est elle-même beaucoup plus grande que l'épaisseur. En toute généralité, un ruban peut être représenté par un modèle classique de coque, mais l'objectif de la thèse est d'étudier des modèles spécifiques et mieux adaptés à ce cas de figure précis.

M. CHARRONDIÈRE se base sur les modèles analytiques de ruban de Sadowsky et Wunderlich et propose une procédure de résolution numérique de ces modèles dans un code calcul capable de traiter une large palette de cas de chargements.

#### **Analyse du contenu de la thèse**

L'introduction présente l'objectif de la thèse et esquisse la méthodologie poursuivie au niveau de l'élaboration du modèle, de l'analyse de ses performances et des tests numériques proposés. Il aurait été utile de préciser davantage le besoin de modélisation et le positionnement du travail, les attentes étant par exemple très différentes dans le domaine du graphisme, où l'accent est mis sur la représentation de la géométrie, ou dans le domaine de l'ingénierie, où il est également nécessaire d'analyser les états de contraintes du matériau.

Le Chapitre 1 (Bref tour d'horizon) passe rapidement en revue les modèles de tige et de coque pouvant servir d'inspiration à la modélisation de rubans. Les propriétés des surfaces développables sont rappelées.

Le Chapitre 2 (Sur une description théorique des rubans) introduit le modèle fondamental à la base des développements de la thèse. L'hypothèse d'inextensibilité, qui est introduite d'entrée de jeu, implique que la surface du ruban est développable. M. CHARRONDIÈRE choisit ensuite de construire son modèle sur base de deux paramètres : la courbure normale linéaire et l'orientation des génératrices de la surface. Ce choix apparaît particulièrement judicieux vu la nature du problème étudié. L'énergie de déformation est alors calculée selon deux formulations de la littérature : celle de Wunderlich et celle de Sadowsky.

Le Chapitre 3 (Vers un modèle numérique de ruban) décrit une première procédure de résolution numérique du modèle décrit au Chapitre 2, dans le cas où le ruban est dans une configuration encastrée-libre. M. CHARRONDIÈRE propose une discrétisation par interpolation linéaire des deux paramètres du modèle. Les fonctions de forme pour les variables de position et d'orientation le long la ligne médiane du ruban sont obtenues par intégration numérique. Plus précisément, l'intégration se fait par des développements en séries entières de la position et de l'orientation. Le rayon de convergence de ces séries est établi sur base d'une analyse du phénomène de compensation catastrophique qu'il s'agit

d'éviter. Le recherche du minimum d'énergie est réalisée par un algorithme d'optimisation. Une première comparaison de différents algorithmes d'optimisation et de continuation montre l'efficacité des algorithmes basés sur le hessien avec régularisation. Cette analyse donne un premier éclairage sur le choix des algorithmes pour la suite du travail.

Le Chapitre 4 (Premières expériences numériques) poursuit l'étude avec plusieurs cas tests numériques où le ruban est encasté-libre. Il comprend des comparaisons à des approches alternatives (solveur par continuation, modèles éléments finis de coque, modèle de tige) et à des résultats expérimentaux. Ces développements permettent de conforter les différents choix de modélisation et de résolution numérique et d'illustrer la pertinence du modèle de ruban.

Le Chapitre 5 (Vers un modèle mixte) aborde la généralisation du modèle aux configurations bi-encastées, qui conduisent à l'apparition de contraintes et qui demandent une discrétisation spatiale plus fine. Un modèle mixte est proposé pour restaurer un système d'équation creux, dont le coût est linéaire (et non cubique comme pour le modèle précédemment établi, dit « chaîné »). Le principe est de décomposer le ruban en segments a priori isolés mais raccordés entre eux par des contraintes. Le choix de l'expression des contraintes est étudié. La forme finalement retenue est assez classique dans le domaine de la simulation de systèmes multicorps, bien que cette connexion ne soit pas établie dans le manuscrit. Des tests numériques montrent que ce modèle mixte est plus performant que le modèle chaîné dans le cas encasté-libre quand le nombre de segments est relativement élevé. De plus, le modèle mixte permet de traiter des configurations bi-encastées, pour lesquelles le modèle chaîné ne converge pas.

Dans le Chapitre 6 (Ajout de murs et rubans circulaires), des problèmes plus complexes sont abordés tels que le ruban de Moebius ou des problèmes impliquant des conditions de contact avec un plan. La condition de non-pénétration est approchée en considérant un seul point de contact potentiel par segment. Une validation particulièrement intéressante est réalisée pour le test de Roman. Ce test consiste à écraser un ruban bi-encasté entre deux plaques ce qui conduit à la création de vagues. M. CHARRONDIÈRE montre que son modèle reproduit correctement les lois d'échelles attendues dans ce problème.

Le Chapitre 7 (Discussions) présente des tests pour lesquels le modèle proposé ne fournit pas les résultats attendus. Cette analyse met en évidence les limitations de l'approche proposée et permet de revenir sur les hypothèses de travail, en particulier, l'hypothèse d'inextensibilité. Le candidat fait preuve ici d'une honnêteté intellectuelle appréciée en mettant en lumière certains résultats moins favorables et en les utilisant pour amener de nouvelles réflexions sur le problème de modélisation étudié.

Enfin, la thèse se termine par un chapitre de conclusion qui résume la méthodologie et les résultats principaux et donnent des perspectives de développement futur.

### **Evaluation générale**

Dans sa thèse, M. CHARRONDIÈRE présente une procédure complète et innovante de modélisation mathématique, de discrétisation spatiale et de résolution numérique du

comportement mécanique de ruban. Un travail d'analyse approfondi est réalisé sur base de tests numériques pertinents, permettant la comparaison à d'autres méthodes de référence et à des résultats expérimentaux.

La formulation proposée est originale et répond bien aux spécificités du problème. Notamment, le choix d'une paramétrisation non-matérielle avec des variables de courbure est peu courant mais est clairement justifié par le candidat dans le contexte de la modélisation des rubans. La supériorité de cette approche par rapport à des modèles plus conventionnels de tige ou de coque est démontrée par de multiples cas tests. Le travail dégage des perspectives intéressantes en montrant l'importance d'étendre le modèle en relâchant l'hypothèse d'inextensibilité et d'aller vers un modèle pseudo-dynamique permettant la création dynamique d'éléments de contact.

Sur la forme, la rédaction est soignée et bien illustrée. Quelques petites fautes d'ordre typographiques pourront être aisément corrigées. Le texte va à l'essentiel, s'appuie sur des explications claires et est agréable à lire.

Le travail suit une méthodologie rigoureuse et s'accompagne d'une argumentation adéquate des choix réalisés. On peut souligner également l'objectivité dont fait preuve M. CHARRONDIÈRE dans la présentation, qui met l'accent non seulement sur le potentiel de la méthode mais qui détaille également ses limitations.

### **Conclusion**

Vu la qualité des travaux de recherche présentés, je recommande sans réserve la soutenance de la thèse de doctorat de M. CHARRONDIÈRE.

Liège, le 23 septembre, 2021



Prof. Olivier BRÜLS

## Rapport d'évaluation du mémoire de thèse / Evaluation report of the PhD thesis

<b>Doctorant</b>	Nom prénom / Full name	Charrondière Raphaël
<b>PhD student</b>	Ecole Doctorale / Doctoral School	
	Titre thèse / PhD Title	Modélisation numérique de rubans par éléments en courbure
<b>Rapporteur</b>	Nom prénom / Full name	Vouga Etienne
<b>Reviewer</b>	Etablissement / Institution	The University of Texas at Austin
	Statut, fonction / Status, position	Associate Professor

### Qualité du mémoire, rédaction & illustrations / Thesis quality, style & illustrations (A titre indicatif/For information : Exceptionnel = top 5%, Très bon/very good = top 25 %)

 Satisfaisant / Satisfactory [ ]   
  Bon / Good [X]   
  Très bon / Very good [ ]   
  Exceptionnel [ ]

 Le manuscrit nécessite d'importantes révisions/The manuscript requires major revisions [ ]

#### Commentaires/comments :

*While I can read and understand French, I do not feel I am competent to judge the thesis in terms of writing quality and style---I leave this portion of the evaluation to the other reviewers. In terms of the organization, the thesis is clear and easy to follow : background and motivation for each chapter is clear and there is a natural progression of ideas (from the basic mathematical theory, to the proposed discretization, to enhancements, experiments, and validation). The graphs and illustrations could be tweaked to be a little bit more polished (especially for figures in a computer graphics thesis) but this is a very minor complaint and does not detract from the scientific value of the thesis work.*

### Contexte, état de l'art, collaborations / Background, state of the art, collaborations :

#### Commentaires/comments :

*The literature review is satisfactory. Previous works directly related to the thesis topic, including recent proposals in physics by Audoly and collaborators to augment Kirchhoff rod models with additional ribbon-like degrees of freedom, and papers in computer graphics on simulating rods and related structures, are thoroughly covered. In some places in the background sections where broader topics are mentioned briefly (such as the finite element method), more references (at least to some textbooks or surveys) would be helpful. Another area where a deeper discussion of the previous work would be appropriate is the modeling of developable surfaces using rulings: the idea of representing a ruled surface as a « spine » combined with a ruling angle (and constraints enforcing developability) has appeared several times in this context and it would be useful in Chapter 2 to make explicit which previous works each part of the derivation follows (and which parts of the chapter are entirely new).*

### Qualité scientifique, méthodologie, expérimentations, validation Scientific quality, methodology, experiments, validation

 Satisfaisant / Satisfactory [ ]   
  Bon / Good [ ]   
  Très bon / Very good [ ]   
  Exceptionnel [X]

 Trop de points majeurs doivent encore être corrigés / Many major issues need to be corrected [ ]

#### Commentaires/comments :

*The amount of rigor in the thesis when it comes to comparisons and validation is exceptional and far beyond what one usually finds in the computer graphics academic literature. Not only are major design decisions in the proposed algorithms tested against alternatives (including choice of solver, choice of method for enforcing constraints, etc.) but there are also thorough comparisons against alternative models in prior work (with the thesis showing a clear benefit to the new, inextensible-ribbon model relative to rod and shell models) and multiple explorations of interesting model problems pulled from the physics literature---including, commendably, a detailed analysis of some failure cases. Please see the attached report for more details. The quality of the validation is a major strength of the thesis.*

---

**Apports personnels, originalité, valorisation, perspectives****Personal contributions, originality, exploitation and application of results, prospects.***Commentaires/comments :*

*This thesis is focused on basic research (looking at fundamental questions related to the representation and discretization of elastic ribbon-like structures) and does not discuss applications in depth ; however, the methods described in the thesis have potential applications in the future to simulation and design of yarns and polymers, studies of soft tissue mechanics and morphogenesis, and mechanisms for actuation and locomotion in soft robotics. M. Charrondière's personal contribution to the thesis work is unquestioned: parts of the thesis have been published in a top mechanics journal (CMAME) in an article on which he is the first author. Beyond the thesis work, M. Charrondière was recently a coauthor of a paper in Transactions on Graphics, the top journal in computer graphics.*

---

**Conclusions du rapporteur / Reviewer's conclusions***Commentaires/comments :*

***Raphaël Charrondière's thesis explores a fundamental topic which has received significant recent attention across the computer graphics, physics, and computational mechanics communities: modeling, discretizing, and simulating slender structure using algorithms that are once powerful and predictive while also being efficient, robust, and tractable. The thesis focuses on one natural class of such structures---inextensible ribbons---with high practical importance in areas ranging from textiles to medicine to robotics, proposes several powerful algorithmic tools for simulating these ribbons, and validates these tools on an extremely rich and interesting set of examples and benchmarks. A significant portion of the thesis has been peer reviewed and published in a top international journal (CMAME). The work in the thesis clearly meets the requirements of a PhD degree and so I enthusiastically recommend that the thesis be accepted.***

**Avis du rapporteur / Reviewer's opinion :**Défavorable à la soutenance / Unfavorable to the defence [  ]Favorable [  ]

Date Sep. 30, 2021

Signature *Etienne Vouga***Visa du directeur de l'école doctorale :**

---

**Rapport détaillé, commentaires libres, questionnements, correction demandées****Detailed report, free comments, questions, requested corrections**

---





COLLEGE OF NATURAL SCIENCES  
THE UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN

Department of Computer Science • 2317 Speedway, Stop D9500 • Austin, TX 78712-1757 • (512) 471-7316

Collège Doctoral  
Université Grenoble Alpes  
September 30th, 2021

To whom it may concern,

It is my pleasure to recommend acceptance of the PhD thesis titled *Modélisation numérique de rubans par éléments en courbure*, by Raphaël Charrondière. This thesis studies mathematical modeling, discretization, and simulation of inextensible elastic ribbons. By way of context, traditionally in scientific computing slender structures like ribbons have been treated as very thin elastic volumes and simulated using general techniques applicable to volumes (like finite element analysis). While this approach yields reasonable results for small problems and gentle deformations, it neglects all prior knowledge of the rich connection between the geometry of slender objects and their physical behavior; as a result, black-box techniques are extremely computationally inefficient and can often fail outright when trying to simulate large bending, twisting, crumpling, and other nonlinear behaviors due to the slender geometry. In recent years, there has been a lot of attention across computer graphics, physics, and engineering on specialized methods designed with the thin geometry in mind from the beginning, and Raphaël's thesis fits in this body of work. His key observation is that while there are already many methods for simulating rods (long in one dimension and thin in two) and shells (long in two dimensions and thin in one), neither family of methods is well-suited for simulating *ribbons*: objects much thinner than they are wide, and yet much wider than they are long. Such ribbons usually deform primarily by bending (with negligible stretching or shear) and so Raphaël focuses on modeling such perfectly *intextensible* ribbons.

In my view, the thesis contains two major contributions. In the first half, he proposes a new discrete kinematic model for inextensible ribbons. This work was published in a top computational mechanics journal (*Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*). He leverages the observation that ribbons are locally ruled to encode the ribbon geometry in terms of two curvilinear parameters: the normal curvature of the ribbon, and the angle of its rulings (represented in terms of the deflection of the rulings away from being orthogonal to the ribbon centerline). In the smooth setting, these parameters together with inextensibility specify the ribbon curvatures and torsion which (via the Frenet-Serret equations) determine the centerline position and material cross-section orientation at all points along the ribbon. The curvature and ruling direction parameters are discretized using piecewise-linear elements. These "curvature coordinates" have several advantages over traditional centerline positions+orientations: they automatically incorporate inextensibility so that it does not need to be enforced as a constraint) and allows for representing complex ribbon shapes with high

curvature using a surprisingly low number of elements: many of the results shown in the thesis use only 20 segments.

However, there are also disadvantages: the ribbon centerline near the end depends on all degrees of freedom along the entire ribbon, so that the Hessian of any ribbon elastic energy will be dense. Moreover, the centerline cannot be integrated in closed form, a difficulty that Raphaël surmounts with a very clever recursive algorithm built based on power series expansion. One of the most interesting aspects of this approach is that the numerical integration is observed to sometimes be unstable due to error accumulation in floating-point summation. Raphaël resolves the problem by deriving bounds on the sums encountered during integration and ensuring that the bound is always satisfied by cutting segments into smaller pieces as necessary. This solution is practical but not fully satisfying: I wonder if there are sometimes performance issues, or convergence difficulties (due to discontinuities in the integration result depending on whether a segment was subdivided or not). Perhaps Kahan summation could be used as an alternative to reduce the summation error?

Finally, I must point out that in this section, and throughout the thesis, the amount of experimental validation is excellent and far exceeds what one usually finds in computer graphics research papers. Almost all of the proposed algorithmic design decisions (including the choice of elastic energy, choice of numerical optimization algorithm, method for enforcing pin constraints on the ribbon boundaries, etc.) are thoroughly evaluated by numerical tests on benchmark examples. The thesis also includes a rich set of comparisons to the most natural alternative ribbon models: either treating the ribbon as a very anisotropic elastic rod (using the popular super-clothoids rod discretization method), or as a narrow thin shell (using the FENICS finite element engine). As one might hope, Raphaël's results demonstrate that the rod model is too simplistic and fails to capture the resistance of the ribbon to in-plane shear, and that the shell model, while accurate, is significantly more computationally expensive than Raphaël's reduced-order discretization. Comparisons against analytic solutions and experimental data further illustrate the power of the proposed method (especially given how few degrees of freedom are needed while still achieving high accuracy).

Raphaël's second main contribution is his *mixed* discrete ribbon model. The key idea here is to subdivide the rod into smaller segments and to treat each piece as a separate ribbon (discretized using the curvature kinematics from the first half of the thesis) with constraints coupling the position and ruling

directions of consecutive ribbon endpoints. This is an extremely powerful idea that dramatically improves the practicality of the simulation when the number of discrete variables grows large: the Hessian of the new formulation is now sparse (since each sub-ribbon is coupled only to its neighbors, via the constraints) and the scheme has a similar flavor to ADMM and other local-global methods for geometric optimization (such as the “as-rigid-as-possible” family of methods) that have proven to have very high impact. As a second advantage of the mixed approach, it is now feasible to enforce contact constraints between the ribbons and themselves and other objects in the simulated world. The last chapters of the thesis explore some options for incorporating contact constraints (including closure constraints needed to simulate the Moebius strip, and point contacts between a ribbon and a flat plane) which is all validated with Raphaël’s usual amount of detail and rigor.

In summary, Raphaël Charrondière’s thesis explores a fundamental topic which has received significant recent attention across the computer graphics, physics, and computational mechanics communities: modeling, discretizing, and simulating slender structure using algorithms that are once powerful and predictive while also being efficient, robust, and tractable. The thesis focuses on one natural class of such structures—inextensible ribbons—with high practical importance in areas ranging from textiles to medicine to robotics, proposes several powerful algorithmic tools for simulating these ribbons, and validates these tools on an extremely rich and interesting set of examples and benchmarks. Significant portions of the thesis have been peer reviewed and published in a top international journal (CMAME). The work in the thesis clearly meets the requirements of a PhD degree and so I enthusiastically recommend that the thesis be accepted.

Sincerely,



(Paul) Etienne Vouga (evouga@cs.utexas.edu)

Associate Professor in Computer Science  
The University of Texas at Austin

**Procès-verbal de soutenance de thèse de doctorat du 14 octobre 2021 à 15h00**

Année universitaire 2020-2021

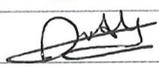
Doctorant : Monsieur Raphaël CHARRONDIÈRE né le 22 décembre 1992  
 Spécialité : Mathématiques et Informatique  
 Titre de la thèse : Modélisation numérique de rubans par éléments en courbures  
 Ecole doctorale : Mathématiques, Sciences et technologies de l'information, Informatique  
 Unité de recherche : UMR 5224 - Laboratoire Jean Kuntzmann  
 Directrice de thèse : Florence BERTAILS-DESCOUBES  
 Lieu de soutenance : salle : -INRIA Grenoble- Rhône-Alpes, Grand'Amphithéâtre, 655 Avenue de l'Europe, 38330 Montbonnot

Résultat :  Admis au grade de docteur  Ajourné

*NOTA BENE : Lorsque l'admission a été prononcée, le jury est alors favorable à la reproduction de la thèse sans modification majeure et sous réserve de clause éventuelle de confidentialité. A l'issue de la soutenance, le docteur dispose d'un délai de trois mois pour indiquer sur la couverture qui fut le Président du jury et apporter les corrections éventuellement demandées par le jury (Art 25 de l'arrêté MENS1611139 du 25 mai 2016).*

**Membres du jury de soutenance délibérants et signataires de la présente décision :**

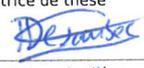
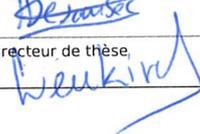
*Aucun nom ne peut être rajouté aux noms figurant ci-dessous. Aucune autre personnalité que celles déjà portées sur la liste ci-dessous n'est autorisée à signer le présent document. Dans le cas d'une soutenance par visio-conférence, le Président signe par ordre du membre du jury présent par visio-conférence. Dans ce cas, s'assurer de la procuration donnée.*

Nom	Qualité	Etablissement	Rôle	Signature
M. DAMIEN ROHMER	PROFESSEUR	ECOLE POLYTECHNIQUE	Examineur	
M. BASILE AUDOLY	DIRECTEUR DE RECHERCHE	CNRS DELEGATION ILE-DE-FRANCE SUD	Examineur	
M. ETIENNE VOUGA	PROFESSEUR ASSISTANT	The University of Texas at Austin	Rapporteur	P.O. (visioconférence)  BA.
M. OLIVIER BRÜLS	PROFESSEUR	Université de Liège	Rapporteur	

**Nom et Signature du président du jury :**

.....

**Membres du jury de soutenance, non délibérants (directeur ; co-directeur) :**

Nom	Qualité	Etablissement	Rôle
Mme FLORENCE BERTAILS DESCOUBES	DIRECTEUR DE RECHERCHE	INRIA CENTRE GRENOBLE-RHONE-ALPES	Directrice de thèse 
M. SEBASTIEN NEUKIRCH	DIRECTEUR DE RECHERCHE	CNRS DELEGATION PARIS CENTRE	Co-directeur de thèse 

# Rapport de soutenance de thèse de doctorat

Année universitaire 2020-2021

**Nom et prénom du doctorant :** Monsieur Raphaël CHARRONDIERE

**Spécialité :** Mathématiques et Informatique

**Date de la soutenance :** 14 octobre 2021

Tous les membres du jury signent le présent rapport en précisant leurs nom et prénom devant la signature.  
Conformément à l'arrêté de mai 2016,  
la décision d'admission a été prise par les membres du jury hors les directeurs et co-directeurs de thèse.

Raphaël Charrondière a présenté ses résultats sur la modélisation numérique des rubans de façon très claire et pédagogique. Bien que la matière présentée soit complexe, il est parvenu à en faire un rendu accessible et convaincant grâce à un choix pertinent d'illustrations, tout en mettant bien en valeur ses contributions personnelles. La qualité de ses résultats a été unanimement appréciée. Ses réponses aux questions ont confirmé sa bonne connaissance de la littérature, et ont montré qu'il avait une bonne perception des forces et des limitations des méthodes qu'il a mises au point. Certaines de ses réponses ont par ailleurs révélé une réflexion déjà bien avancée sur des prolongements de son travail qui dépassent le cadre de sa thèse. Le jury a apprécié la palette de compétences de Raphaël Charrondière qui manie avec aisance aussi bien les modèles non-linéaires issus de la mécanique théorique que leur implémentation numérique. Raphaël s'est fixé un cadre rigoureux pour son travail numérique alliant validation poussée, analyse mathématique, et comparaisons aux expériences. Au vu de son travail remarquable, le jury lui a décerné le grade de Docteur de l'Université Grenoble Alpes.

**Nom du président du jury :** BASILE AUDOLY

**Signature :**

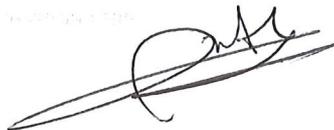


**Nom des membres du jury et leur signature :**

P.O. Etienne VOUGA  
(in situ - conférence)

BAUDOLY

BA.  

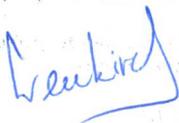
F. BERTRILS-DESCOMBES

D. Rohmer



S. NEUKIRCH

O. BRÜLS



Grenoble, le 28 septembre 2021

**ATTESTATION**

Je soussigné, Laurent DESBAT, Directeur de l'UFR IM<sup>2</sup>AG, atteste que :

**CHARRONDIERE Raphaël**

Né le 22 décembre 1992

A été Doctorant Contractuel au sein de l'Université Grenoble Alpes, du 1er septembre 2018 au 31 août 2021.  
Il a assuré son enseignement à l'UFR IM2AG en Licence :

➤ **2018-2019 : 64heqtd**

**L1 STS Grenoble** – « Calcul matriciel et fonctions de plusieurs variables » – GBX3MT34

**TD: 36heqtd**

**L2 STS Grenoble** – « Projet logiciel » - GBX4MP41

**TP: 13heqtd**

**M1 INFO-M1 MOSIG Grenoble** – « Complexité algorithmique de problèmes » GBIN8U02

**TD : 15heqtd**

➤ **2019-2020 : 58.5heqtd**

**L3 MIAGE Grenoble** – « Validation d'algorithmes et Modèles Statistiques » – GBIN6U02

**Cours : 27heqtd**

**TD : 16.5heqtd**

**M1 INFO-M1 MOSIG Grenoble** – « Complexité algorithmique de problèmes » – GBIN8U02

**TD: 15heqtd**

➤ **2020-2021 : 45heqtd**

**L3 MIAGE Grenoble** – « Validation d'Algorithmes » - GBIE3M21

**Cours : 27heqtd**

**TD : 18heqtd**

Fait pour valoir et servir ce que de droit.



Laurent DESBAT  
Directeur de l'UFR IM<sup>2</sup>AG

Saint Martin d'Hères, le 8 décembre 2021

### **LABEL Recherche et Enseignement Supérieur (RES)**

Je soussignée, Christelle BRETON, directrice du Département Formation du Collège doctoral de l'Université Grenoble Alpes, certifie que monsieur Raphaël CHARRONDIÈRE, doctorant, a rempli les conditions requises pour l'attribution du label RES lors de la préparation de sa thèse.

Le parcours du label Recherche et Enseignement Supérieur valide 80 heures de formations transversales et insertion professionnelle et est constitué des éléments suivants :

- des vacances d'enseignement : un minimum de 100 heures équivalent TD,
- le suivi du plan de formation lié au label : stage résidentiel « Questionnements autour du métier d'enseignant-chercheur », formations transversales, insertion professionnelle, construction d'un portfolio de compétences.

**Christelle BRETON**  
Directrice du Département  
Formations Transversales et  
Insertion Professionnelle  
Collège Doctoral  
Communauté Université  
Grenoble Alpes

## Ecole Doctorale

### Mathématiques, Sciences et Technologies de l'Information, Informatique

[ed-mstii@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:ed-mstii@univ-grenoble-alpes.fr)

## Attestation

Je soussigné Bernard TOURANCHEAU, directeur de l'*Ecole Doctorale Mathématiques, Sciences et Technologies de l'Information, Informatique*, atteste que monsieur

**Raphaël CHARRONDIERE**

a été élu représentant des doctorants au sein du Conseil de l'Ecole Doctorale MSTII pour la période 2019 à 2021.

Fait pour valoir ce que de droit.

A St Martin d'Hères, le 21 mars 2022

Le directeur de l'Ecole Doctorale MSTII,

Bernard TOURANCHEAU

**B. TOURANCHEAU**  
Directeur  
Ecole Doctorale M.S.T.I.

