



## **Proposition de titre de la thèse :**

Identification de modèles dynamiques non-lisses et non-linéaires par intelligence artificielle : applications à des problèmes industriels de mécanique des contacts

## **Contacts :**

Simon Masnou, Professeur de l'université Claude Bernard Lyon 1 et de l'Institut Camille Jordan (ICJ) [masnou@math.univ-lyon1.fr](mailto:masnou@math.univ-lyon1.fr)

Roland Denis, Ingénieur de recherche CNRS / Institut Camille Jordan, Lyon, [denis@math.univ-lyon1.fr](mailto:denis@math.univ-lyon1.fr)

Clément Grenat, Docteur Ingénieur, FRAMATOME Paris, [clement.grenat@framatome.com](mailto:clement.grenat@framatome.com)

Cédric Pozzolini, Docteur Ingénieur de Recherche Expert, FRAMATOME Lyon, [cedric.pozzolini@framatome.com](mailto:cedric.pozzolini@framatome.com)

## **Contexte général, objectifs de la thèse et enjeux industriels**

Framatome est un acteur international majeur de la filière nucléaire reconnu pour ses solutions innovantes et ses technologies à forte valeur ajoutée pour la conception, la construction, la maintenance et le développement du parc nucléaire mondial. L'entreprise conçoit et fabrique des composants, du combustible, des systèmes de contrôle-commande et offre toute une gamme de services destinés aux réacteurs.

Grâce à ses 14 000 collaborateurs à travers le monde, Framatome met chaque jour son expertise au service de ses clients pour leur permettre d'améliorer la sûreté et la performance de leurs centrales nucléaires et de contribuer à atteindre leurs objectifs économiques et sociétaux.

Au sein de Framatome, la Direction Technique et Ingénierie assure le développement, la conception et le suivi des chaudières nucléaires et des équipements associés. Elle propose également aux exploitants des études d'ingénierie de conception, de réalisation et de services. Elle intervient, à ce titre, comme autorité technique en apportant toute son expertise afin d'offrir un haut niveau de sûreté et de performance. Dans ce contexte de nombreux logiciels de calculs par éléments finis modélisant la physique sont utilisés, dont une partie importante pour la mécanique des solides et des structures. Les performances en régimes linéaires sont en général satisfaisantes, cependant il arrive fréquemment des phénomènes non linéaires dû aux contacts, aux frottements ou aux impacts, ceux-ci en régimes nominal ou accidentel (par exemple lors d'un séisme). Ces dernières décennies ont vu apparaître de nombreux travaux scientifiques académiques visant à améliorer les modèles impliquant du contact, cependant beaucoup de problèmes théoriques comme numériques restent ouverts.

C'est à ce titre qu'une collaboration scientifique entre l'Inria et Framatome a été lancée.

Le besoin de précision pour répondre aux exigences de sûreté n'a cessé d'augmenter mais nous sommes confrontés actuellement à des problématiques inhérentes à la dynamique non-lisse avec contact en mécanique. Le traitement industriel de la dynamique non-lisse avec contact chez Framatome fait notamment face au dilemme entre temps de calculs prohibitifs et finesse du pas de temps et au dilemme de calculs non répétables. Parmi les multiples approches permettant de réduire les temps de calcul figure notamment celle de la réduction de modèle. En ce qui concerne les problèmes de non-répétabilité, ceux-ci sont principalement dus à la non-adéquation des algorithmes du traitement du contact.

Le développement d'algorithmes adaptés à modélisation de la dynamique non-lisse avec contact combiné à des méthodes de réduction de modèle permettrait à Framatome d'obtenir des solutions fiables avec des pas de temps industriellement compatibles.

Aussi, avec le développement de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique ces dernières années, il devient possible de reconstruire des équations différentielles en se basant sur des données expérimentales, numériques ou mixtes. La méthode « NODE », pour Neural ODE, permet d'approximer la fonction non-linéaire non-lisse d'une équation différentielle ordinaire à l'aide d'un réseau de neurone [1]. Cette méthode a par la suite été généralisée aux équations différentielles partielles [1] et [3]. En revanche, les fonctions résultantes bien qu'étant des approximateurs universels n'en sont pas moins non interprétables. Ainsi cette méthode pourrait être couplée à des méthodes, telles que SINDY et SSMLearn, déjà appliquées dans de nombreux domaines scientifiques. La méthode SINDy permet l'obtention des modèles réduits symboliques sous forme d'équations différentielles en temps non-linéaires comme dans [4] et [5]. La méthode SSMLearn permet quant à elle d'obtenir non pas une équation différentielle réduite en nombre de termes mais une dynamique réduite basée sur un nombre réduit de variétés invariantes sur lesquelles la dynamique varie lentement (« slow spectral submanifold »).

Un pas conceptuel supplémentaire reste à faire pour identifier symboliquement des équations aux dérivées partielles soumises à des contraintes à seuils comme dans les problèmes multiphasiques, de contrôle optimal, de plasticité ou encore de contacts.

Le but de cette thèse, s'inscrit donc dans la suite de ces travaux récents et novateurs, pour explorer la faisabilité d'une telle approche quand les données recueillies représentent des dynamiques non-lisses.

Cette proposition de thèse fait suite aux difficultés récurrentes dans la réalisation de calculs dynamiques implicites à partir de modèles éléments finis intégrant des non-linéarités de types contact ou d'impact pouvant avoir lieu aux interfaces de composants comme des tubes, des tuyaux, des plaques, des coques en fonctionnement nominal ou un lors séisme. L'obtention de modèles réduits ou de dynamiques simplifiées déduits des données permettrait un gain de temps de calculs

non-négligeable et une meilleure représentativité des phénomènes physiques, et donc une sureté accrue.

### **Déroulement de la thèse et planning de l'avancement sur 3 ans**

Cette thèse sera conduite conjointement par FRAMATOME et l'Institut Camille Jordan, laboratoire de recherche en mathématiques de Lyon (ICJ).

L'encadrement académique sera assuré à l'ICJ par Simon Masnou, professeur de mathématiques à l'Université Claude Bernard Lyon 1 et Roland Denis, Ingénieur de recherche CNRS / Institut Camille Jordan. L'encadrement côté industriel sera porté par Clément Grenat et Cédric Pozzolini chez FRAMATOME.

L'objectif de la thèse et donc de proposer des modèles simplifiés approchant des EDP sous contraintes non-lisses en tirant partie des récents outils de modélisation du contact d'une part, et d'autre part des techniques de reconstructions d'EDP à partir de données.

La première année débutera avec une étude bibliographique des techniques de modélisation du contact et des structures mécaniques. Le cadre applicatif sera orienté dans un premier temps vers la reconstruction des inéquations régissant le contact de structures minces ou élancées, d'abord en statique sans frottement, puis éventuellement en présence de frottement, ou d'impacts. Des solutions numériques seront générées via le logiciel SYSTUS ou la librairie GETFEM++, elles fourniront des données auxquelles seront appliquées des méthodes d'identifications de types : Neural ODE, SSMLearn, SINDy, ou des variantes et adaptations jugées plus pertinentes.

La seconde année consistera à développer dans un environnement informatique ad hoc l'ensemble des stratégies de reconstructions de comportements mécaniques non lisses étudiées de façon théoriques et explorées sur exemples simples. Leurs pertinences et leurs performances seront comparées à des modèles 3D, dans le but d'identifier les choix de techniques les plus optimales. La robustesse pourra être mise en évidence par l'introduction de bruits ou de troncatures sur les données d'entrées. D'autre part, ces modèles réduits ainsi obtenus permettront de justifier un choix judicieux de la méthode de calculs de non-pénétration des interfaces comme les méthodes standard de pénalités, lagrangiens, ou plus récentes de types Nitsche. En effet, les méthodes de types Nitsche ont rencontré un franc succès pour les discrétisations éléments finis en présence de contacts entre solide 3D, voir [9] ou [9]. Des travaux exploratoires comme dans [11] ont été entrepris récemment en vue de les étendre aux structures minces. La thèse pourrait être une bonne contribution pour valider et les adapter des modèles réduits de lois à seuil aux éléments types poutres, barres, plaques, coques, ou éléments solides.

Enfin, la troisième année sera consacrée, en fonction de l'avancée et des obstacles rencontrés, à la mise en œuvre des nouvelles approches pour améliorer la prise en compte des impacts ou des lois de frottement. En effet, la modélisation des champs de pression est un enjeu majeur pour décrire les mécanismes d'endommagement et d'usure dans les configurations d'impact, ou de frottement. Aujourd'hui les moyens d'essais d'impacts glissants Aurore au Centre Technique FRAMATOME du creusot

ou Thor au LTDS produisent des cinétiques d'usures macroscopiques. Ils ne permettent donc pas de modéliser les usures pour des contacts ayant des géométries ou des sollicitations différentes de celles testées. La thèse proposée ici permettra de mieux décrire les champs de pression et de vitesse dans le contact, et également pourra servir de base pour développer des lois d'endommagement et d'usure plus locales. Ces lois pourraient à terme alimenter des modèles permettant de dimensionner ou de valider la durabilité des composants soumis à des vibrations.

L'obtention de ces solutions de gestion du contact aux interfaces de structures 1D, 2D ou 3D assurera une levée des problèmes de non-répétabilité, une meilleure représentativité des phénomènes physiques, et donc une sureté accrue.

Il est prévu en deuxième et troisième année de thèse des communications scientifiques dans des conférences nationales et internationales, et au moins une publication dans une revue internationale à comité de lecture au cours de la thèse.

Le temps de travail du futur doctorant sera réparti en fonction des besoins entre le laboratoire ICJ à Villeurbanne et le site FRAMATOME Gerland à Lyon.

#### **Profil souhaité :**

- Des connaissances en dynamique des structures,
- Des connaissances en mécanique des milieux continus solides,
- Première expérience d'utilisation d'un logiciel commercial type ANSYS/ ABAQUS en mécanique des solides,
- Des bases concernant la théorie et l'analyse numérique des EDP, EDO, et des réseaux de neurones,
- Des notions de développement dans un code de calcul éléments finis,
- Capacité d'adaptation et d'autonomie dans un environnement de développement de code informatique en C++/ Python, FORTRAN
- un attrait particulier pour la filière nucléaire.

#### **Bibliographie**

- [1] Chen, R. T., Rubanova, Y., Bettencourt, J., & Duvenaud, D. K. (2018). Neural ordinary differential equations. *Advances in neural information processing systems*, 31.
- [2] Ruthotto, L., & Haber, E. (2020). Deep neural networks motivated by partial differential equations. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 62, 352-364.
- [3] Liu, X. Y., Sun, H., & Wang, J. X. (2022). Predicting parametric spatiotemporal dynamics by multi-resolution PDE structure-preserved deep learning. *arXiv preprint arXiv:2205.03990*.
- [4] S. Brunton, J. Proctor, J. Nathan Kutz Discovering governing equations from data by sparse identification of nonlinear dynamical systems
- [5] S. Rudy, A. Alla, S. Brunton, J.Kutz Data-driven identification of parametric partial differential equations
- [6] Haller, G., & Ponsioen, S. (2016). Nonlinear normal modes and spectral submanifolds: existence, uniqueness and use in model reduction. *Nonlinear dynamics*, 86, 1493-1534.
- [7] M. Cenedese, J. Axàs, B. Bäuerlein, K. Avila and G. Haller. Data-driven modeling and prediction of non-linearizable dynamics via spectral submanifolds. *Nature Communications*, 13 (2022) 872.
- [8] B. Kaszás, M. Cenedese & G. Haller, Dynamics-based machine learning of transitions in Couette flow, *Physical Review Fluids* 7 (2022) L082402.

- [9] F. Chouly, M. Fabre, P. Hild, R. Mlika, J. Pousin, Y. Renard. An overview of recent results on Nitsche's method for contact problems. *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*, 121:93--141, 2018.F. Chouly, P. Hild, V. Lleras, Y. Renard.
- [10] Nitsche method for contact with coulomb friction: existence results for the static and dynamic finite element formulations. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 416:114557, 2022
- [11] M. Fabre, C. Pozzolini, Y. Renard. Nitsche-based models for the unilateral contact of plates. *ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis*, 55:941--967, 2021