



**Séance technique :  
Les applications des méthodes de l'Intelligence Artificielle en  
Mécanique des Roches**

Organisée par Muriel Gasc et Lina-María Guayacán-Carrillo

Jeudi 5 Mai 2022 à 14h00

Séance organisée en mode hybride :

[Ecole des Mines de Paris](#) (60 Bd Saint-Michel, Paris), Amphi V107

[Pour rejoindre la salle virtuelle](https://salles-zoom.mines-paristech.fr) : <https://salles-zoom.mines-paristech.fr> (login=mpt-zoom, mot de passe=kM2sE!UnD6Jw ["option vacataire"]), chercher « Salle V-107 » dans le menu à gauche et cliquer sur le lien zoom en bleu.

**14 : 00 Accueil et introduction à la séance.**

*Philippe Cosenza, Président du CFMR.*

*Muriel Gasc (Cerema) et Lina-María Guayacán-Carrillo (ENPC).*

**14 : 15 Analyse des données issues du creusement au tunnelier de 2 lignes de métro du Grand Paris Express.**

*Tatiana Richa (Setec, Laboratoire Navier, Ecole des Ponts ParisTech).*

**14 : 45 Apport de la micromécanique et de la machine-learning à la modélisation multi-échelle des matériaux hétérogènes.**

*JianFu Shao (Université de Lille, CNRS, Centrale Lille, LaMcube).*

**15 : 15 Pause**

**15 : 30 Projet RINA : utilisation de l'intelligence artificielle (IA) dans le contexte aléas rocheux lors d'événements météorologiques intenses, accentués par le changement climatique.**

*Clara Lévy (BRGM, Orléans).*

**16 : 00 Comment l'apprentissage automatique peut aider au contrôle des séismes et la mécanique des failles ?**

*Ioannis Stefanou (Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, Ecole Centrale de Nantes).*

**16 : 30 Discussion et fin de la séance.**

## Analyse des données issues du creusement au tunnelier de 2 lignes de métro du Grand Paris Express

Tatiana Richa<sup>1</sup>, Jean-Michel Pereira<sup>2</sup>, Selmane Lebdaoui<sup>1</sup>,  
Gilles Chapron<sup>1</sup> & Lina-María Guayacán- Carrillo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Terrasol, Setec, Paris, France.

<sup>2</sup>Navier, Ecole des Ponts, Univ Gustave Eiffel, CNRS, Marne-la-Vallée, France.

Le développement urbain entraîne une augmentation du développement des infrastructures souterraines. Pour répondre à ces besoins, de nombreux projets de tunnels sont construits sous des zones fortement urbanisées comme le Grand Paris Express (GPE) qui est le plus grand projet de transport en Europe. Pour garantir la sécurité des avoisinants, la prédiction des tassements induits en surface est nécessaire. Sur ce projet, les données de mesures des déplacements de cibles topographiques fixées sur les chaussées et bâtiments sont systématiquement acquises. De plus, le GPE étant creusé au tunnelier, tous les paramètres liés à l'avancement de la machine (vitesse, pression au front, volume de mortier injecté, etc.) sont également surveillés. L'auscultation des chantiers permet l'accès à une grande quantité de données qui sont un atout majeur pour réduire les incertitudes sur les tassements induits par le creusement et optimiser la conception des ouvrages souterrains. Le défi est de transformer les données brutes en informations compréhensibles et utiles. Dans le cadre de cette étude, les données relatives à l'excavation de la ligne 14 Sud et de la ligne 15 Sud-Ouest sont analysées. La première étape consiste à extraire et nettoyer les données. La seconde étape consiste à trouver le bon modèle de la base de données. Dans ce travail, une base de données relationnelle avec PostgreSQL est utilisée. Le défi suivant consiste à trouver la bonne architecture pour maintenir l'intégrité de la base de données tout au long de sa durée de vie. Une fois ce travail réalisé, il est possible d'analyser la qualité des données par de la modélisation statistique. Ensuite, il convient de tester et comparer les différents algorithmes d'apprentissage machine pour prédire les tassements induits en surface lors de l'excavation, comme les réseaux de neurones artificiels (Kim et al., 2001 ; Suwansawat & Einstein, 2006) et GRNN (Chen et al., 2019).

### References :

- AFTES. (2019). État de l'art concernant les évolutions des tunneliers et de leurs capacités de 2000 à 2019 (Groupe de Travail n°4 - GT4R6F1).
- Chen, R. P., Zhang, P., Kang, X., Zhong, Z. Q., Liu, Y., & Wu, H. N. (2019). Prediction of maximum surface settlement caused by earth pressure balance (EPB) shield tunneling with ANN methods. *Soils and Foundations*, 59(2), 284–295.
- Kim, C. Y., Bae, G. J., Hong, S. W., Park, C. H., Moon, H. K., & Shin, H. S. (2001). Neural network based prediction of ground surface settlements due to tunnelling. *Computers and Geotechnics*, 28(6–7), 517–547.
- Suwansawat, S., & Einstein, H. H. (2006). Artificial neural networks for predicting the maximum surface settlement caused by EPB shield tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(2), 133–150. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.06.007>.

# Apport de la micromécanique et de la machine-learning à la modélisation multi-échelle des matériaux hétérogènes

Jianfu Shao, Jing Xue, Wanqing Shen & Nicolas Burlion

Université de Lille, CNRS, Centrale Lille, LaMcube, UMR9013, 59000 Lille, France

Dans cet exposé, nous présentons quelques premiers résultats sur l'utilisation des outils de la micromécanique et de la machine-learning pour la modélisation des matériaux hétérogènes de type roches et béton. Dans un premier temps, quelques modèles analytiques issus des techniques d'homogénéisation sont rappelés. En se basant sur des résultats issus des simulations directes des VÉRs, les limitations de ces modèles sont soulignées. Nous introduisons ensuite des modèles issus de la machine-learning, en particulier ceux basés sur les réseaux de neurone artificiel (ANN). Nous montrons comment les modèles micromécaniques peuvent faciliter la construction d'une base de données pour entraîner et valider les modèles ANN. A l'inverse, les modèles ANN permettent de considérer des microstructures complexes. Deux exemples sont illustrés. Le premier concerne l'identification des paramètres de rupture locale des constituants pour calibrer un critère de résistance issue d'une homogénéisation non-linéaire. Le deuxième porte sur l'estimation des propriétés élastiques d'un matériau hétérogène contenant des pores et des inclusions.

# CFMIR

# Projet RINA : utilisation de l'intelligence artificielle (IA) dans le contexte aléas rocheux lors d'événements météorologiques intenses, accentués par le changement climatique

Clara Lévy<sup>1</sup> (BRGM) & Marie-Aurélié Chanut<sup>2</sup>

<sup>1</sup> BRGM

<sup>2</sup> Cerema

Le projet RINA proposé dans le cadre de l'AAP 2020 de la Fondation Férec (Intelligence artificielle appliquée aux infrastructures en service) vise à étudier la faisabilité de l'utilisation de l'intelligence artificielle (IA) dans le contexte des risques géologiques. L'objectif est de proposer une aide à la décision aux exploitants des réseaux routiers et ferroviaires afin de maintenir la qualité de service sur les infrastructures de transport menacées par des aléas rocheux lors d'événements météorologiques intenses.

Sur le site de la RN1 à la Réunion, les données d'observation de l'aléa rocheux (base de données chutes de blocs du service des routes du Conseil Régional) et les données climatiques (précipitation) sont analysées à l'aide des outils d'intelligence artificielle. Plus particulièrement, trois modèles issus du machine learning (arbres de décision, plus proches voisins et réseaux de neurones) ont été optimisés et leur capacité de prédiction évaluée et comparée à celle du modèle expert utilisé pour la gestion opérationnelle de la route.

Dans le cadre du projet RINA, outre les développements obtenus sur le site de la RN1 à la Réunion, une méthodologie complète a été mise en place pour traiter les données (événements et données météorologiques) : de la définition des types de modèles IA, à la manière d'optimiser les hyperparamètres et les paramètres des modèles, d'évaluer la performance du modèle et également de traduire les résultats en termes opérationnels. Ce cadre méthodologique peut être réutilisé pour d'autres sites avec des données similaires.

# CFMR

# Comment l'apprentissage automatique peut aider au contrôle des séismes et la mécanique des failles ?

## How Machine Learning can help in earthquake control and fault mechanics?

Ioannis Stefanou & Filippo Masi

Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (UMR CNRS 6183), Ecole Centrale de Nantes.

Les tremblements de terre ont lieu lorsque de grandes quantités d'énergie sont soudainement libérées en raison d'un glissement brusque sur des failles sismiques. Outre les causes physiques, cette libération d'énergie peut également être déclenchée par l'injection de grandes quantités de fluides dans la croûte terrestre. En effet, l'expérience récente montre que les injections des fluides peuvent réactiver des failles existantes et déclencher des séismes importants [voir 1,2].

Cependant, on peut voir le problème des injections de fluides sous un autre angle [3,4]. La dépendance du frottement sur la pression des fluides interstitiels peut être utilisée comme entrée pour la stabilisation du système. De nouveaux résultats basés sur la théorie mathématique du contrôle [5-7] montrent qu'il est en effet possible de stabiliser et d'assurer un glissement lent et aismique en ajustant adéquatement la pression des fluides injectées. En d'autres termes, il est démontré que les tremblements de terre peuvent être, en théorie, contrôlés.

Néanmoins, ces résultats mathématiques prouvent que le contrôle des séismes est robuste et possible, à condition que le frottement de faille soit borné. Le frottement de faille est un phénomène complexe impliquant plusieurs échelles spatio-temporelles et une dynamique complexe. Malgré sa complexité, le caractère fini de l'énergie de tout processus physique influençant le frottement ainsi que les expériences existantes en laboratoire et in situ, soutiennent l'hypothèse que le frottement est borné. Cependant, la quantification de ces bornes est difficile car les expériences sont impossibles à réaliser dans la croûte terrestre. Par conséquent, on doit s'appuyer sur des simulations numériques et des jumeaux numériques de failles sismiques, qui jusqu'à présent sont très exigeants en termes de calcul. À cette fin, nous avons développé une nouvelle approche d'apprentissage automatique pour la modélisation de matériaux complexes, en appliquant les lois universelles de la thermodynamique [9-12]. La méthode est précise, rapide et adaptable, et permet d'effectuer des simulations à grande échelle de matériaux multiéchelles sous couplages multiphysiques et dynamiques dans un environnement virtuel qui est piloté par les données et la physique et peut être exécuté sur un ordinateur portable.

Earthquakes nucleate when large amounts of elastic energy are suddenly released due to abrupt sliding over seismic faults. Besides physical causes, this energy release can also be triggered by injecting large amounts of fluids in the earth's crust. Indeed, recent experience shows that injections can reactivate existing seismogenic faults and induce/trigger important earthquakes [see 1,2].

However, one can see the problem of fluid injections from another perspective [3,4]. The dependence of fault friction on fluid pressure can be used as an input for stabilization. New results based on the mathematical theory of control [5-7] show that it is indeed possible to

stabilize and assure slow, aseismic slip by adequately adjusting the fluid injection pressures. In other words, it is shown that earthquakes can be, in theory, controlled.

Nevertheless, these mathematical derivations prove that earthquake control is robust and possible, provided that fault friction is bounded. Fault friction is a complex phenomenon involving several spatio-temporal scales and complex dynamics. In spite of complexity, the finiteness of energy of any physical process influencing friction as well as existing laboratory and in-situ experiments, support the boundedness of the friction. However, the quantification of these bounds is challenging as experiments are impossible to perform deep down in the earth. Therefore, we have to rely on numerical simulations and digital twins of seismic faults, which until now are computationally very demanding. To this end, we develop a novel deep learning approach for modeling complex materials, by enforcing the universal laws of thermodynamics [9-12]. The method is accurate, fast and scalable, and allows performing large scale simulations of microstructured under multiphysics couplings and complex dynamics in a virtual, data- and physics-driven environment, that fits on a laptop.

#### References :

- [1] Zastrow, M. (2019). South Korea accepts geothermal plant probably caused destructive quake, 2019, <https://doi.org/10.1038/d41586-019-00959-4>
- [2] [https://www.liberation.fr/societe/ville/meme-a-larret-un-projet-de-geothermie-profonde-provoque-un-nouveau-seisme-en-alsace-20210626\\_WOI43MV3HBCW7CJWLN6WCVXFJM/](https://www.liberation.fr/societe/ville/meme-a-larret-un-projet-de-geothermie-profonde-provoque-un-nouveau-seisme-en-alsace-20210626_WOI43MV3HBCW7CJWLN6WCVXFJM/)
- [3] Stefanou, I. (2020). Conference TEDx Rennes « Maîtriser les séismes... et pourquoi pas ? », <https://www.tedxrennes.com/project/ioannis-stefanou/#>
- [4] Tzortzopoulos G., Braun P., Stefanou I. (2021), Absorbent Porous Paper Reveals How Earthquakes Could be Mitigated, *Geophysical Research Letters* 48. <https://doi.org/10.1029/2020GL090792>.
- [5] Stefanou, I. (2019). Controlling Anthropogenic and Natural Seismicity: Insights From Active Stabilization of the Spring-Slider Model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(8), 8786–8802. <https://doi.org/10.1029/2019JB017847>
- [6] Stefanou, I., Tzortzopoulos, G. (2021). Preventing instabilities and inducing controlled, slow-slip in frictionally unstable systems, Submitted
- [7] Gutiérrez-Oribio D., Tzortzopoulos G., Stefanou I., Plestan F. (2021). Earthquake Control: An Emerging Application for Robust Control. Theory and Experimental Tests. <http://arxiv.org/abs/2203.00296>
- [8] Papachristos, E., Stefanou, I. (2021), Controlling earthquake-like instabilities using artificial intelligence. Pre-print: <http://arxiv.org/abs/2104.13180>.
- [9] Raissi, M., Perdikaris, P., Karniadakis, G.E. (2019), Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations, *Journal of Computational Physics* 378, 686–707. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>.
- [10] Masi, F., Stefanou, I., Vannucci, P., Maffi-Berthier, V. (2021). Thermodynamics-based Artificial Neural Networks for constitutive modeling, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 147. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2020.104277>.
- [11] Masi, F., Stefanou, I., Vannucci, P., Maffi-Berthier, V. (2021). Material modeling via thermodynamics-based artificial neural networks, in: Barbaresco, F., Nielsen, F. (Eds.), *Geometric Structures of Statistical Physics, Information Geometry, and Learning*, Springer International Publishing, Cham. pp. 308–329. doi:10.1007/978-3-030-77957-3\_16.
- [12] Masi, F., Stefanou, I. (2021), Thermodynamics-based Artificial Neural Networks (TANN) for multiscale modeling of materials with inelastic microstructure, Submitted, Pre-Print: <http://arxiv.org/abs/2108.13137>.