

Développement de méthodes de réseaux de neurones informés par la physique (PINNs) pour la caractérisation et la prédiction quantitative des circulations profondes de fluides en géothermie

Directeur de thèse : Morgan Pierre (morgan.pierre@math.univ-poitiers.fr)

Co-encadrants :

- Julien Dambrine (julien.dambrine@math.univ-poitiers.fr)
- Romain Chassagne (r.chassagne@brgm.fr)

Établissement : BRGM Orléans & Laboratoire de Mathématiques et Applications (UMR 7348)

Lieu : BRGM Orléans

Début de la thèse : octobre 2026

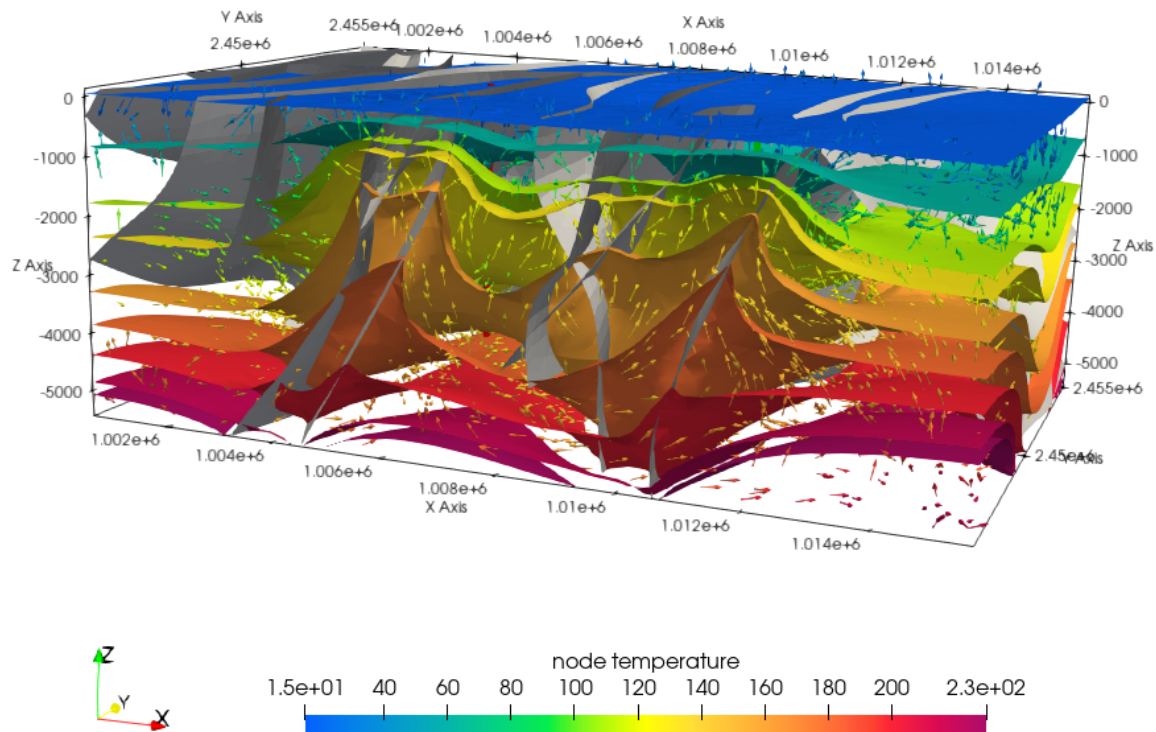
Financement : PEPR Sous-sol, PC9 « Fossé Rhéna »

La compréhension des écoulements sous-terrains de fluides est essentielle pour optimiser les systèmes géothermiques et limiter les risques associés, tels que la sismicité induite. Les modèles actuels demeurent toutefois limités par la rareté, l'hétérogénéité et le bruit des données disponibles, ainsi que par une connaissance incomplète du sous-sol. Les réseaux de neurones informés par la physique (Physics-Informed Neural Networks, PINNs) constituent une réponse à ces limitations en intégrant des lois physiques, formulées sous la forme de systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP), à des données complexes. Leur efficacité reste néanmoins entravée par des incertitudes portant à la fois sur les données et sur les modèles. Renforcer leur robustesse suppose de prendre explicitement en compte ces incertitudes au moyen de « contraintes souples », afin de produire des simulations plus fiables et plus pertinentes.

Ce projet de thèse s'inscrit dans la tâche 2.2 « Développement de méthodes d'intelligence artificielle pour la caractérisation quantitative et la prévision des circulations profondes de fluides » (responsable de tâche : R. Chassagne), au sein du projet « PEPR Sous-sol, bien commun, PC9 », et s'appuiera par conséquent sur les données du Fossé Rhéna.

L'objectif principal de cette thèse est de contribuer au développement d'un modèle global et robuste (assimilation de données) du Fossé Rhéna. L'approche retenue reposera sur une assimilation de données hybride, couplant un modèle physique à un réseau de neurones (PINNs). Le recours à des PINNs à contraintes souples constitue une avancée majeure : il permet de moduler l'importance des contraintes physiques en fonction de la qualité des données et des connaissances disponibles, offrant ainsi une meilleure tolérance aux incertitudes et aux lacunes. Afin d'assouplir ces contraintes et de renforcer la robustesse des PINNs, plusieurs approches

peuvent être envisagées selon le contexte, chacune proposant une manière différente de traiter les incertitudes en modélisation physique : les PINNs pondérés ajustent l'importance des contraintes physiques au sein de la fonction de coût en fonction de leur fiabilité ; les PINNs bayésiens traitent les poids du réseau ou les paramètres physiques comme des variables aléatoires, permettant des prédictions tenant compte de l'incertitude, assorties d'intervalles de confiance ; les PINNs stochastiques introduisent des termes aléatoires dans les équations physiques, ce qui les rend adaptés aux milieux hétérogènes ; les PINNs d'ensemble combinent plusieurs modèles entraînés indépendamment afin d'estimer la variabilité des prédictions ; les PINNs à décomposition de domaine divisent le domaine en régions présentant des niveaux d'incertitude différents, afin d'affiner localement les contraintes. Les approches retenues seront testées au sein d'un cadre d'assimilation de données dédié. Leur performance dépendra de la quantité et de la qualité des données disponibles. L'objectif est une quantification rigoureuse des incertitudes affectant les prédictions finales. À terme, l'étude vise à déterminer comment les PINNs peuvent être intégrés de manière optimale dans une chaîne d'assimilation de données géothermiques.



Le/la candidat(e) recherché(e) présente le profil suivant :

- Un diplôme de master (ou équivalent) en mathématiques appliquées, en physique, ou dans un domaine connexe
- De solides compétences numériques et en programmation
- Une bonne compréhension des écoulements de fluides en milieu poreux et des modèles mathématiques associés

- De bonnes capacités de communication et de rédaction, en anglais, ainsi qu'une aptitude au travail collaboratif

Constitueront un atout :

- Une expérience en réseaux de neurones
- Une expérience en modélisation des écoulements en milieu poreux
- Des connaissances en systèmes géothermiques

Le dossier de candidature devra comprendre :

- Une courte lettre de motivation (une demi-page) présentant les intérêts de recherche du candidat et son expérience pertinente
- Un CV comprenant, le cas échéant, la liste des publications, ainsi que les coordonnées de deux personnes de référence, sauf si des lettres de recommandation sont jointes
- Les copies des diplômes universitaires

Le financement est prévu pour trois ans, le poste étant basé à Orléans, en France.

Merci d'envoyer votre candidature à julien.dambrine@math.univ-poitiers.fr