

**Apprentissage par un réseau neuronal profond à base physique
(*Physics Informed Neural Network*) pour la résolution des
équations d'écoulement diphasique liquide-gaz en milieu poreux**

Lieu :	Fontenay-aux-Roses et Paris
Unité :	IRSN (PSE-ENV/SPDR/UEMIS), Université Paris 13 (Laboratoire Analyse, Géométrie et Applications)
Durée :	6 mois
EOTP :	
Date de disponibilité :	Mars 2025

L'IRSN, Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial (EPIC) – dont les missions sont désormais définies par la Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (TECV) – est l'expert public national des risques nucléaires et radiologiques. L'IRSN concourt aux politiques publiques en matière de sûreté nucléaire et de protection de la santé et de l'environnement au regard des rayonnements ionisants. Organisme de recherche et d'expertise, il agit en concertation avec tous les acteurs concernés par ces politiques, tout en veillant à son indépendance de jugement.

Thématique :

Dans le cadre du stockage géologique de déchets radioactifs, on assiste à une production d'hydrogène due à la corrosion anoxique des métaux et à la radiolyse, en particulier après la fermeture. Cette production d'hydrogène peut être à l'origine d'un transitoire Hydraulique-Gaz qui peut durer 1 million d'années et qui conditionne fortement la durée de saturation totale du stockage en eau. Or, l'évaluation de cette durée d'une part et de la pression maximale de gaz atteinte au sein des ouvrages et son impact sur l'hydromécanique des scellements et de la roche hôte d'autre part sont nécessaires à la démonstration de sûreté du stockage.

Les méthodes numériques actuelles pour résoudre les EDPs de l'écoulement diphasique liquide-gaz en milieux poreux ont montré des limites en lien avec la complexité du modèle de stockage (hétérogénéité, temps de calcul...).

Récemment, l'intelligence artificielle (IA), en particulier le deep learning (DL), a montré qu'elle peut être une alternative à ces schémas numériques pour résoudre ces EDPs, à condition que l'apprentissage du réseau neuronal soit réalisé par une approche physique à base de PINNs (*Physics Informed Neural Networks*). Cette approche est très rapide de point de vue calculatoire et exacte de point de vue apprentissage du réseau neuronal.

Bibliographie

- [1] Andra, 2022. Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo - Pièce 7 - Version préliminaire du rapport de sûreté - PARTIE III : démonstration de sûreté - Volume 8 - La démonstration de sûreté après fermeture, document CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-0000-21-0007/A, Décembre 2022.
- [2] Zhang, Z., Yan, X., Liu, P., et al., 2023. A physics-informed convolutional neural network for the simulation and prediction of two-phase Darcy flows in heterogeneous porous media. *J. Comput. Phys.* 477, 111919.
- [3] Yan, X., Lin, J., Wang, S., Zhang, Z., Liu, P., Sun, S., Yao, J., Zhang, K., 2024. Physics-informed neural network simulation of two-phase flow in heterogeneous and fractured porous media. *Adv. Water Resour.*, 189, 104731, ISSN 0309-1708, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2024.104731>.
- [4] Amri A., Z. Saâdi, R. Ababou, 2022. Parametric sensitivity to gas-entry pressure in two-phase flow models for a deep geologic repository of radioactive waste, *Transp. Porous Med.* 145:13–43.

Missions :

Le stagiaire aura pour mission de développer des modèles d'écoulement diphasique liquide-gaz en milieu poreux hétérogène tridimensionnel à base de PINNs en résolvant les EDPs correspondantes, discrétisées en volumes finis (e.g., code TOUGH2), incluant les contraintes liées aux conditions initiales et aux limites imposées au domaine. Les tâches suivantes lui incomberont :

- Construire un réseau neuronal (RN) profond en utilisant la bibliothèque PyTorch ou TensorFlow's SciANN-Keras qui consistera en des couches d'entrée et de sortie, et plusieurs couches cachées, et une fonction d'activation à optimiser par l'algorithme d'Adam. Les modèles développés intégreront les contraintes des EDPs discrétisées. On pourra considérer également la bibliothèque NVIDIA MODULUS exploitant des opérateurs neuronaux type Fourier Neural Operators (FNO).
 - Vérifier les modèles à base de PINNs développés par des solutions numériques et/ou analytiques existantes, puis leur validation à travers une expérience d'injection de gaz dans une roche argileuse du Callovo-Oxfordien.
- Le stagiaire passera 50% de son temps au sein du Laboratoire Analyse, Géométrie et Applications (LAGA) de l'Université Paris 13 afin de faciliter la mise en œuvre de la première tâche, vue l'expérience de l'équipe de LAGA sur le développement du RN pour résoudre les EDPs de modèles physiques dans des plateformes informatiques adéquates.

La stagiaire percevra une rémunération nette mensuelle aux environs de 1250 €.

Profil recherché : M2R ou en dernière année du cycle d'ingénieur spécialisé en Math-Informatique, Analyse numérique et calcul scientifique – Des notions sur l'IA et le Deep Learning sous Python sont appréciées.

Personne(s) à contacter : Zakaria SAADI (zakaria.saadi@irsn.fr); Fayssal BENKHALDOUN
fayssal@math.univ-paris13.fr