

**IFP Energies nouvelles**  
**Earth Sciences and Environmental Technologies Division**  
**Computational Physics of Porous Media Department**  
1 et 4 avenue de Bois-Préau, 92852 Rueil-Malmaison Cedex – France

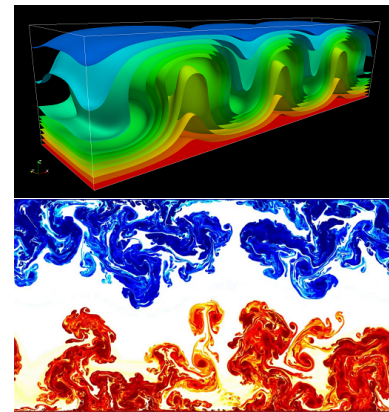
## Open Ph.D. Thesis Position (3 years, starting in Autumn 2024)

**Field of skills:** Quantitative geosciences, physics, applied mathematics, programming, numerical simulation

**Selection of convection cells during convective instabilities in heterogeneous porous media: Application to heat flux determination and solute transport in geothermal structures**

**T**HE EXISTENCE OF FREE CONVECTION in geological structures, which has become a matter of course in recent decades, is currently attracting renewed interest in geothermal energy for heat production and solute transport (Lithium). The rolls, and more generally the convection cells, that may develop, localize the thermal anomaly, drive the transport of heat and solutes, and control the characteristic time of thermal recharge. This process is due to an instability known as Rayleigh-Bénard in pure fluids, or Horton-Rogers-Lapwood in porous media. Its existence is characterized by the Rayleigh number  $Ra = \frac{\alpha \Delta T g L^3}{\nu \kappa}$  in pure fluid, where  $\alpha$  denotes the coefficient of thermal expansion,  $L$  the characteristic length of the medium across which the temperature difference  $\Delta T$  is applied,  $\nu$  the kinematic viscosity of the fluid and  $\kappa$  the thermal diffusivity. For instability to occur,  $Ra$  must exceed a critical threshold.

Past works have all focused on determining the critical  $Ra$  by adapting the physics to the specific case of the porous medium, most often considering a homogeneous medium. In the unstable case, these approaches say little about the selection of unstable modes that will develop in the form of convection cells, likely to considerably increase local heat flow and solute transport in the medium. Using an approach combining theoretical analysis and simulation, the Ph.D. candidate will study the coupling between the heterogeneity of the porous medium and hydrodynamic instability, in the presence of heterogeneities in permeability and/or in the local thermal diffusion coefficient. The effective transport coefficients obtained on a large scale will be characterized, as well as the important flow localization effects induced by the instability, likely to be of great importance for the setting up of geochemical transformations.



*Examples of unstable thermal pattern*

**Supervision** by a **joint team of two physicists** (Benoît Nøetinger, director; Frédéric Douarche, promoter) **and a mathematician** (Benjamin Braconnier, copromoter), specialized in fluid flow, transport and transfers in porous media. It will also be possible to interact with an academic researcher as part of an expertise agreement.

**F**OR FURTHER INFORMATION, PLEASE CONTACT US  
Frédéric Douarche [frederic.douarche@ifpen.fr](mailto:frederic.douarche@ifpen.fr)  
Benoît Nøetinger [benoit.noetinger@ifpen.fr](mailto:benoit.noetinger@ifpen.fr)  
Benjamin Braconnier [benjamin.braconnier@ifpen.fr](mailto:benjamin.braconnier@ifpen.fr)

IFP Energies nouvelles

Direction Sciences de la Terre et Technologies de l'Environnement

Département Physique Numérique des Milieux Poreux

1 et 4 avenue de Bois-Préau, 92852 Rueil-Malmaison Cedex – France

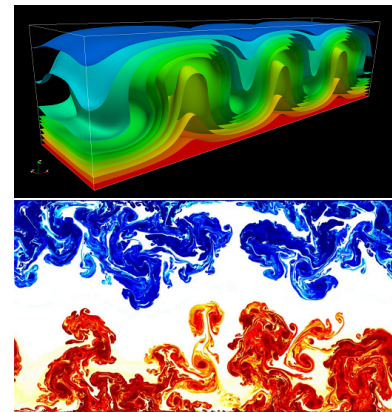
## Poste de Thèse de Doctorat (3 ans, démarrage à l'automne 2024)

**Domaine de compétences :** Géosciences quantitatives, physique, mathématiques appliquées, programmation, simulation numérique

**Sélection des cellules de convection lors d'instabilités convectives en milieu poreux hétérogène : Application à la détermination des flux thermiques et au transport de solutés dans des structures géothermiques**

L'EXISTENCE DE CONVECTION LIBRE dans les structures géologiques, devenue une évidence depuis quelques décennies, connaît actuellement un regain d'intérêt en géothermie pour la production de chaleur et le transport de solutés (Lithium). Les rouleaux et plus généralement cellules de convection, susceptibles de se développer, localisent en effet l'anomalie thermique, assurent le transport de chaleur mais aussi de solutés, et pilotent le temps caractéristique de la recharge thermique. Ce processus est dû à une instabilité dite de Rayleigh Bénard en fluide pur, et de Horton Rogers Lapwood en milieu poreux. Son existence est caractérisée par le nombre de Rayleigh  $Ra = \frac{\alpha \Delta T g L^3}{\nu \kappa}$  en fluide pur, où  $\alpha$  désigne le coefficient de dilatation thermique,  $L$  la longueur caractéristique du milieu aux bornes duquel s'exerce la différence de température  $\Delta T$ ,  $\nu$  la viscosité cinématique du fluide et  $\kappa$  la diffusivité thermique. Pour que l'instabilité se déclenche, il est nécessaire que  $Ra$  dépasse une valeur critique.

Les travaux passés se sont tous focalisés sur la détermination du  $Ra$  critique en adaptant la physique au cas spécifique du milieu poreux, en considérant le plus souvent un milieu homogène. Dans le cas instable, ces approches disent peu de choses sur la sélection des modes instables qui vont se développer sous la forme de cellules de convection, susceptibles d'augmenter considérablement le flux thermique local et le transport de solutés dans le milieu. Par une approche combinant analyse théorique et simulation, le doctorant étudiera le couplage entre l'hétérogénéité du milieu poreux et l'instabilité hydrodynamique, en présence d'hétérogénéités de perméabilité et/ou du coefficient de diffusion thermique local. Les coefficients de transports effectifs obtenus à grande échelle seront caractérisés, ainsi que les effets de localisation importants de l'écoulement induits par l'instabilité, susceptible d'avoir une grande importance pour la mise en place de transformations géochimiques.



Exemples de pattern thermique instable

**Encadrement** par une **équipe mixte de deux physiciens** (Benoît Noëtinger, directeur ; Frédéric Douarche, promoteur) **et un mathématicien** (Benjamin Braconnier, copromoteur), spécialisés dans les problèmes d'écoulement, de transport et de transferts en milieu poreux. Il sera également possible d'interagir avec un chercheur académique dans le cadre d'une convention d'expertise.

**P**OUR EN SAVOIR PLUS, MERCI DE NOUS CONTACTER  
Frédéric Douarche [frederic.douarche@ifpen.fr](mailto:frederic.douarche@ifpen.fr)  
Benoît Noëtinger [benoit.noetinge@ifpen.fr](mailto:benoit.noetinge@ifpen.fr)  
Benjamin Braconnier [benjamin.braconnier@ifpen.fr](mailto:benjamin.braconnier@ifpen.fr)