

# RÉSUMÉ

Dans de nombreux réservoirs géothermiques profonds, l'échangeur thermique est un massif de roches chaudes fracturées. Comment la morphologie des fractures influence-t-elle le flux hydraulique et le champ de température lorsque de l'eau froide est injectée dans ce milieu ? Cette question est abordée à l'échelle de la fracture, de manière numérique, à l'aide de deux méthodes : par différences finies, en 2D, et par méthode de Boltzmann sur réseau, en 3D.

Les calculs en différences finies montrent qu'une ouverture auto-affine induit une variabilité spatiale du flux hydraulique et du champ de température. Dans certains cas, il se crée une chenalisation du fluide, qui réduit l'efficacité du transfert thermique entre la roche et le fluide. Ces caractéristiques hydrothermiques sont essentiellement engendrées par les plus grandes longueurs d'ondes de ces ouvertures auto-affines.

Une première application à grande échelle, dimensionnée suivant les caractéristiques du site géothermique de Soultz-sous-Forêts (Alsace, France), est proposée. Une deuxième application consiste à évaluer la perméabilité du sous-sol de Draix (Alpes, France). Pour cela, la géométrie de fractures présentes dans le sous-sol est caractérisée précisément à partir de carottes géologiques. La topographie des fractures, mesurée avec un laser, est utilisée pour reconstituer la morphologie de l'ouverture des fractures. Ces données sont utilisées pour quantifier la perméabilité, ici élevée – de l'ordre de  $10^{-9} - 10^{-8} \text{ m}^2$ .

À l'aide de méthodes de Boltzmann sur réseau, la modélisation du comportement hydro-thermique dans des fractures présentant une topographie avec de fortes pentes est abordée. Au voisinage d'une aspérité de forme simple, le comportement hydro-thermique modélisé est très différent (recirculation) de celui dans le reste de la fracture.

L'ensemble de ces modélisations suggère qu'il est nécessaire de prendre en compte la morphologie des fractures pour estimer le comportement hydro-thermique en géothermie.

**Mots clefs :** Fracture, couplage hydro-thermique, advection-diffusion de la chaleur, géothermie, chenalisation, recirculation, différences finies, Boltzmann sur réseau, étude de la rugosité, reconstruction d'ouverture.

# ABSTRACT

For many deep geothermal systems, the heat exchanger consists in a hot fractured bedrock. How does the morphology of the fractures influence the hydraulic flow and the temperature field when cold water is injected into this medium ? This question is numerically addressed at the fracture scale, using two methods : finite differences, in 2D, and lattice Boltzmann methods, in 3D. The finite difference computations show that a self-affine aperture induces space variability of the hydraulic flow and temperature field. It can create a channeling of the fluid, which reduces the efficiency of the heat transfer between the rock and fluid. These hydrothermal characteristics are mostly generated by the largest wavelengths of these self-affine apertures.

A first application at large scales, dimensioned according to the characteristics of the geothermal site of Soultz-sous-Forêts (Alsace, France) is proposed. A second application aims at evaluating the permeability of the basement of Draix (French Alps). To do so, the geometry of fractures is precisely characterized using geological cores. The topography of the fractures, measured with a laser, is used to reconstruct the morphology of fracture apertures. These data are used to estimate the permeability, here of the order of  $10^{-9} - 10^{-8} \text{ m}^2$ , which is a relatively high value.

Lattice Boltzmann methods are used to model the hydrothermal behavior in fractures whose topography is very steep. The hydrothermal behavior near a simple-shaped asperity is very different (recirculation) from the one in the remaining parts of the fracture.

All these modelings suggest that it is necessary to take into account the morphology of the fractures to estimate the hydrothermal behavior for geothermal purposes.

**Keywords :** Fracture, hydro-thermal coupling, heat advection-diffusion, geothermics, channeling, vortex, finite differences, lattice Boltzmann, roughness characterization, aperture reconstruction.