

## Étude des instabilités hydro-mécaniques dans les géomatériaux

Les instabilités hydro-mécaniques dans les géomatériaux font référence à une variété de phénomènes non-linéaires qui peuvent être déclenchés par les hétérogénéités intrinsèques de ces matériaux. Les instabilités hydrauliques dans des conditions partiellement saturées peuvent se manifester comme invasion hétérogène d'un fluide 'par digitation'. Les instabilités mécaniques, d'autre part, peuvent se présenter sous la forme de localisations de déformations et/ou de fissures. Ces instabilités potentiellement couplées constituent un obstacle majeur pour une myriade d'applications impliquant les géomatériaux comme la séquestration du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), l'infiltration des eaux pluviales et aussi pour des prédictions fiables telles que le flux de contaminants dans les eaux souterraines. Les modèles classiques existants ne résolvent pas ce comportement en raison de leur manque d'éléments capable de modéliser la formation d'une microstructure dans leur formulation et sont donc stables contre toute perturbation. Cette thèse vise à proposer et étudier des techniques de modélisation permettant de décrire ces instabilités de manière simple et naturelle. L'approche en loi de comportement adoptée est celle des milieux continus à micro-structure, en particulier celle des milieux continus équipés d'une loi de comportement dépendant du gradient de variables de type champ de phase.

La première partie du travail porte sur la description d'un front fluide-fluide qui a été modélisé comme une interface diffuse. Cela a été fait en interprétant la présence de deux fluides dans l'espace poreux comme un seul fluide non-uniforme et le degré de saturation de l'un des fluides comme un champ de phase. Alors qu'on s'attend à ce que la relation bijective classique entre la pression capillaire et le degré de saturation décrive les propriétés de rétention du réseau poreux en raison de sa texture, une relation enrichie est obtenue en prescrivant un potentiel chimique dans l'esprit de la modélisation de type Cahn-Hilliard de fluides multiphasiques. Cette relation enrichie, associée à une contribution énergétique non-locale, fournit les ingrédients nécessaires pour décrire les écoulement par digitation et les phénomènes non-locaux tels que le pincement et la coalescence des fluides dus aux variations des forces capillaires. En utilisant des techniques de développement asymptotique, il a été démontré analytiquement, dans le cadre d'un modèle unidimensionnel, que le choix des contributions énergétiques utilisées permet de reproduire des profils de saturation non-monotones de type 'overshoot' lors d'une infiltration à vitesse constante dans un milieu relativement sec. Cela s'est avéré correspondre qualitativement à l'observation expérimentale. De plus, l'introduction d'une légère non-convexité dans la fonction de perméabilité relative a permis, numériquement, de modéliser des fronts de drainage, en plus de l'imbibition, sans employer de complexités supplémentaires dans le modèle. Une soigneuse analyse de stabilité linéaire (ASL) des solutions homogènes contre des perturbations arbitraires a été effectuée. La croissance dans le temps de l'amplitude des perturbations transversales imposées est comprise comme le phénomène de digitation. Les prédictions de l'ASL ont été suivies par des simulations 2D mettant en lumière la capacité du modèle proposé de décrire le phénomène de digitation et la ségrégation des fluides.

Dans la deuxième partie, le déclenchement d'une fissure au sein d'un milieu poreux asséchant a été étudié. Dans l'esprit de la modélisation à gradient d'endommagement, un modèle de milieu poreux endommagé a d'abord été testé pour sa capacité à reproduire la formation de fissures périodiques telle qu'observée dans des expériences de laboratoire. À partir de ce cadre de la modélisation une généralisation de cette approche a été proposée en interprétant la présence d'une fissure dans un milieu poreux en train de sécher comme une perte de ses propriétés capillaires, permettant ainsi le passage d'un fluide non mouillant sous une pression capillaire évanescence. Ce paradigme est particulièrement intéressant dans la modélisation des sols à grains fins sans cohésion et non-consolidés, où la résistance à traction est négligeable et donc la fissuration induite en raison du développement des contraintes de traction n'est pas le phénomène dominant. Partant des principes qui caractérisent l'approche variationnelle utilisés pour construire le modèle, il a été montré que une dessiccation suffisamment forte peut amorcer l'endommagement de manière homogène sur la face en train de sécher tout en progressant dans le domaine dans le temps. L'apparition éventuelle de bifurcations de cette solution de base a été analysée, toujours dans le cadre de l'ASL.

Ce travail ouvre la voie à plusieurs pistes de recherche, la plus naturelle étant l'étude du couplage entre les instabilités présentées ci-dessus. En dehors de cela, des simulations bidimensionnelles de l'écoulement par digitation ont montré que le modèle prédit des caractéristiques supplémentaires d'écoulement instable, telles que le pincement et la coalescence de la phase de mouillage, qui doivent être étudiées à l'aide d'une campagne expérimentale soigneusement conçue. L'initiation de l'endommagement induit par l'évolution des doigts de drainage présente également un intérêt particulier dans le cadre des applications mentionnées précédemment. Enfin, des techniques numériques avancées peuvent être recherchées pour la résolution des problèmes ci-dessus dans le but de fournir des solutions précises plus efficacement.

**Mots-clés :** saturation partielle; géomatériaux; modélisation de champ de phase; fluide non-uniforme; gradient d'endommagement;