

Résumé long en français

Comportement hydromécanique en fonction du temps de l'argile callovo-oxfordienne par des méthodes analytiques et numériques multi-échelles

Dans le contexte du stockage géologique profond des déchets radioactifs, les roches argileuses sont étudiées comme l'une des roches hôtes potentielles car elles ont généralement une très faible conductivité hydraulique, une faible diffusion moléculaire et une capacité de rétention importante pour les radionucléides, ce qui offre des conditions favorables pour un stockage de déchets radioactifs. En France, l'Agence nationale des déchets radioactifs (ANDRA) est responsable de la gestion à long terme des déchets radioactifs et a été chargée, dans le cadre du projet Cigéo, de concevoir un système de stockage sûr et réversible. L'ANDRA a commencé en 2000 à Bure (près de 300 km à l'est de Paris) à construire le Laboratoire souterrain de recherche Meuse/Haut-Marne pour démontrer la faisabilité d'un stockage de déchets radioactifs dans des formations argileuses. La formation hôte est constituée d'argilites à COx à des profondeurs comprises entre 420 et 550 m. Les argilites à COx sont recouvertes de formations carbonatées peu perméables.

À l'échelle macroscopique, des études approfondies en laboratoire ont montré que le comportement mécanique des roches argileuses peut être caractérisé par un endommagement plastique couplé et présente des caractéristiques telles que des déformations plastiques irréversibles, une sensibilité à la pression et un ramollissement significatif après avoir atteint une résistance maximale à des pressions de confinement faibles et modérées. La déformation par fluage en fonction du temps est une autre caractéristique importante des roches argileuses. Classiquement, la déformation inélastique d'un matériau en fonction du temps est décrite par des modèles viscoplastiques phénoménologiques. Bien que ces modèles fournissent des outils mathématiques efficaces pour les analyses à long terme des structures, les mécanismes physiques de la déformation par fluage ne sont pas explicitement pris en compte. Par conséquent, ces modèles ne peuvent pas rendre compte des effets de la composition minérale et de la géométrie des microstructures sur la réponse mécanique des roches argileuses. Il est donc nécessaire et utile d'étudier le comportement à petite échelle des roches argileuses pour mieux expliquer les mécanismes dépendant du temps observés à petite et grande échelle, et aussi pour fournir une meilleure base pour l'extension des modèles constitutifs à grande échelle.

À mésoéchelle, les roches argileuses sont hétérogènes et composées de plusieurs types d'inclusions minérales noyées dans une matrice argileuse. À cette échelle, le comportement des roches est caractérisé par les propriétés morphologiques (taille et forme) et matérielles des composants et leurs interactions. L'échelle mésoscopique joue un rôle important dans les mécanismes de déformation sous chargement mécanique par fissuration et fluage. Compte tenu de la mésostructure complexe des roches argileuses, une possibilité d'évaluer leurs réponses mécaniques globales à méso-échelle et à macro-échelle consiste à utiliser une approche multi-échelle. Une telle approche permet d'étudier un volume/surface élémentaire représentatif (REV/REA) statistiquement équivalent pour déterminer le comportement du milieu homogène équivalent. En particulier, des méthodes d'homogénéisation informatique, également connues sous le nom d'analyses multi-échelles, ont vu le jour. Elles incluent, entre autres, les méthodes d'éléments finis carrés (FEM×FEM ou FE²) et FEM×DEM pour les milieux continus à grande échelle et les matériaux

hétérogènes/discrets à petite échelle. Cette approche n'introduit aucune expression explicite pour les équations constitutives à l'échelle macro, car la réponse homogénéisée du calcul à l'échelle méso sert de relation constitutive numérique dans le continuum à l'échelle macro. Théoriquement et numériquement, cela implique des descriptions séparées de chaque constituant matériel et de leurs interactions à l'échelle microscopique, la disposition spatiale et l'hétérogénéité des constituants à l'échelle méso, puis une transition d'échelle vers le comportement du matériau à l'échelle macro. À ce jour, la modélisation du comportement dépendant du temps des roches argileuses, y compris les caractéristiques à petite échelle et la transition d'échelle de la mésoéchelle à la macro-échelle, reste insuffisamment étudiée.

Après un bref chapitre introductif présentant les enjeux du sujet, le deuxième chapitre présente une revue de la littérature. Il traite des conditions et observations in situ (endommagement, fissuration, perméabilité) dans le laboratoire souterrain du site de l'ANDRA en Meuse/Haute Marne, France. La question de la microstructure, des multiples échelles du matériau et du comportement mécanique est ensuite abordée en détail, conduisant à un état de l'art assez dense.

Les deux premières parties de l'étude sont basées sur l'approche phénoménologique réalisée directement à l'échelle macroscopique. Dans le chapitre 3, un modèle quasi-analytique pour le comportement hydromécanique d'une cavité sphérique profonde creusée dans une masse rocheuse poro-viscoplastique dilatante est présenté, en considérant trois étapes d'un cycle de vie simplifié : excavation, convergence libre et post-fermeture. Pour chaque étape, des expressions entièrement explicites des champs de déplacement, de contrainte et de pression d'eau sont dérivées dans le domaine transformé de Laplace. Une inversion numérique selon l'algorithme Stehfest est ensuite adoptée pour obtenir les expressions correspondantes dans le domaine temporel. Quelques exemples numériques sont présentés pour illustrer l'applicabilité du modèle. Les résultats montrent que l'hypothèse d'un taux de déformation viscoplastique volumétrique comme une fonction linéaire de la norme de Frobenius du taux de déformation plastique déviatorique peut être utilisée pour construire un modèle analytique capable de décrire le comportement hydromécanique post-fermeture d'une cavité sphérique profonde. La dilatation viscoplastique de la masse rocheuse induit un mouvement vers l'extérieur en tout point (sauf à la paroi de la cavité) en raison de la symétrie sphérique particulière impliquant un domaine infini.

Dans le chapitre 4, les analyses sensibles et probabilistes sont effectuées à l'aide du code d'éléments finis Cast3M, afin d'étudier l'étendue de la zone endommagée par l'excavation (EDZ) en fonction du temps. Les résultats indiquent que le critère basé sur la déformation de Von Mises, qui est couplé à l'endommagement hydraulique, est considéré comme plus réaliste pour fournir une estimation plus précise de l'étendue de la zone endommagée après l'excavation. Les paramètres influençant le développement de la zone endommagée peuvent être classés dans l'ordre d'importance suivant : Module d'Young de la roche, module d'Young du remblai, seuil de contrainte de la roche, dilatation de la roche, espace entre le remblai et la paroi du tunnel.

Les argilites COx sont des milieux poreux multiphasés ayant une structure et un comportement complexes caractérisés par l'hétérogénéité, l'endommagement et la viscosité, existant sur une large gamme d'échelles. Une approche numérique multi-échelle est donc employée pour étudier son comportement de fluage et d'endommagement dans des conditions mécaniques.

Le chapitre 5 décrit le cadre des éléments finis carrés (FE²), en notant que le modèle de comportement à double échelle est inclus dans un formalisme de milieu enrichi du second type de gradient (avec longueur interne).

Au chapitre 6, un modèle basé sur la micromécanique dans le cadre FE² est développé pour modéliser les comportements à court et à long terme de l'argile saturée en COx. Une argile COx hétérogène est représentée à la mésoéchelle comme un matériau composite constitué d'inclusions minérales élastiques rigides (quartz, calcite et pyrite) noyées dans une matrice argileuse. Pour décrire le comportement des roches endommageables et leurs modes de rupture à petite échelle, les interfaces entre différentes phases minérales et au sein de la matrice argileuse sont considérées. Ces interfaces entre grains minéraux solides forment également un réseau de canaux poreux à travers lesquels le fluide peut pénétrer et s'écouler. La mésostructure de la roche argileuse est représentée dans des zones élémentaires représentatives (REA) numériques 2D. Pour la matrice argileuse, une loi de comportement élastoplastique est considérée pour le comportement à court terme alors qu'une loi de comportement visqueuse (élasto-viscoplastique ou viscoélastique) est considérée pour le comportement à long terme. Pour ce comportement visqueux, deux mécanismes microscopiques ont été introduits : la viscoplasticité des agrégats d'argile et la viscoélasticité de leurs contacts. Ensuite, le modèle est validé à méso-échelle par rapport aux données expérimentales obtenues à partir d'essais de compression triaxiale et de fluage sur des argiles COx. La variabilité de la réponse du matériau et l'évolution temporelle de l'état des dommages interfaciaux minéraux sont étudiées en relation avec les propriétés à petite échelle, les défaillances et en considérant la variabilité microstructurale. Cette partie du travail peut fournir des informations précieuses sur les mécanismes microscopiques du fluage et des dommages induits par le fluage dans une perspective à petite échelle.

Dans le chapitre 7, le modèle de fluage des argilites COx développé à petite échelle (micro- et méso-échelles) est appliqué pour modéliser le comportement de fluage à grande échelle en laboratoire et en galerie. La cohérence de la déformation par fluage entre les deux échelles est d'abord vérifiée. Ensuite, à partir des résultats de simulation à l'échelle du laboratoire, un processus de fluage clair en trois étapes est reproduit, y compris l'étape de fluage primaire, l'étape de fluage secondaire et l'étape de fluage tertiaire. La rupture induite par le fluage et l'effet anisotrope sur le fluage sont également étudiés. À l'échelle de la galerie, l'effet à long terme de la viscosité sur les convergences de la galerie, l'évolution de l'EDZ, le drainage à long terme et la pression interstitielle autour d'une galerie sont étudiés. La relation entre la déformation de cisaillement induite par le fluage et la rupture à travers l'échelle est un résultat important donné par la modélisation numérique multi-échelle du comportement et de la rupture des roches en fonction du temps. Il s'avère que le modèle multi-échelle développé est capable de fournir des informations précieuses sur le comportement de fluage à grande échelle des roches argileuses grâce à la caractérisation morphologique et matérielle à petite échelle de la REA.

Dans le chapitre 8, le modèle de fluage à double échelle développé ci-dessus et utilisé pour simuler un milieu fissuré saturé est étendu à un cas de saturation partielle pour étudier l'interaction entre la roche et l'atmosphère qui se produit par la circulation de l'air dans les galeries souterraines. La distribution de l'eau capillaire à l'échelle microscopique n'est pas modélisée, l'introduction de la pression capillaire est donc un phénomène macroscopique, mais dépend de la variation de la géométrie (ouverture normale de l'interface) à l'intérieur des galeries souterraines. Le flux de gaz est également négligé en supposant une pression de gaz constante. Le processus de ventilation est reproduit avec une

humidité relative de l'air constante à l'intérieur de la galerie et une imposition classique à la paroi de la galerie. L'accent est mis sur l'étude de l'effet de la ventilation de la galerie sur le comportement hydromécanique de la roche hôte, par exemple l'augmentation de la résistance du matériau, les bandes de cisaillement, le champ de déplacement, la pression de l'eau interstitielle, etc.

Enfin, le dernier chapitre présente un résumé final du travail effectué, ainsi que les perspectives d'avenir. Trois annexes sont également présentées, les deux premières sur des questions relatives à l'implémentation numérique de modèles de comportement en phase argileuse, et la troisième sur l'introduction d'un écoulement diphasique à l'échelle des interfaces du modèle méso, travaux préliminaires pour un modèle partiellement saturé introduit à petite échelle.

Sur la base des résultats obtenus et des discussions, les principales conclusions de cette thèse peuvent être résumées comme suit :

Un modèle quasi-analytique est développé pour le comportement hydromécanique d'une cavité sphérique profonde creusée dans une masse rocheuse poro-viscoplastique dilatante, prenant en compte trois étapes d'un cycle de vie simplifié : (1) excavation, (2) convergence libre et (3) contact avec le remblai et post-fermeture. Les résultats montrent que l'hypothèse d'un taux de déformation viscoplastique volumétrique en tant que fonction linéaire de la norme de Frobenius du taux de déformation plastique déviatorique peut être utilisée pour construire un modèle analytique capable de décrire le comportement hydromécanique post-fermeture d'une cavité sphérique profonde. La dilatation viscoplastique de la masse rocheuse induit un mouvement vers l'extérieur en tout point (sauf à la paroi de la cavité) en raison de la symétrie sphérique particulière impliquant un domaine infini.

Une analyse sensible et une analyse de probabilité ont ensuite été menées sur l'évolution temporelle de l'étendue de la zone d'endommagement autour d'une galerie de stockage profonde à l'aide du code FEM Cast3M. Les résultats montrent que le critère basé sur les contraintes, selon lequel tout point matériel où le critère est atteint appartient à la zone d'endommagement, conduira à une surestimation excessive et irréaliste de l'étendue à long terme de cette dernière. Un autre critère d'estimation de la zone d'endommagement, concomitant à l'endommagement hydraulique, est plus réaliste : l'état du matériau est considéré comme endommagé si sa déformation équivalente au sens de von Mises dépasse le seuil critique.

Un modèle basé sur la micromécanique a été développé pour étudier le comportement mécanique des roches argileuses hétérogènes en fonction du temps. Les résultats numériques indiquent que la viscosité, dans les deux cas, a une influence sur la déformation globale par fluage de la roche argileuse. La prise en compte de la viscosité dans les agrégats d'argile permet de reproduire l'évolution temporelle de la déformation de fluage de l'argilite COx avec une bonne concordance avec les mesures expérimentales des essais de fluage triaxiaux. Néanmoins, la prise en compte de la viscosité au niveau des contacts entre les agrégats d'argile génère une déformation de fluage plus faible de la roche par rapport aux mesures expérimentales. En ce qui concerne l'endommagement des matériaux, la déformation par fluage peut être un facteur déterminant des processus d'endommagement et de fissuration à micro-échelle dépendant du temps. Il a été constaté que le développement de la déformation par fluage peut induire l'accumulation de dommages au niveau des contacts entre les grains minéraux de manière localisée, ce qui conduit à l'apparition de microfissures. Les microfissures induites par la déformation par fluage tendent à se développer de préférence aux interfaces autour des inclusions minérales plutôt qu'entre les agrégats d'argile.

Les résultats de simulation des essais de fluage déviatorique biaxial en laboratoire ont permis de reproduire un processus de fluage en trois étapes. Il comprend un stade de fluage primaire avec décélération de la vitesse de déformation, un stade de fluage secondaire avec une vitesse de déformation constante et un stade de fluage tertiaire avec une accélération de la vitesse de déformation. Un tel comportement de fluage de l'argilite COx a été observé lors d'essais de fluage triaxial en laboratoire de l'argilite COx. La viscosité dans les contacts entre les agrégats d'argile a un faible effet sur les fluages primaire et secondaire, mais elle contribue de manière importante à la rupture de l'argilite induite par le fluage. Au cours du fluage tertiaire, la zone de localisation des contraintes de cisaillement induites par le fluage peut apparaître à l'échelle macroscopique, en raison de l'initiation, de la croissance, de l'accumulation, de la propagation et de la coalescence des microfissures et des mésosfissures au sein du matériau à l'échelle macroscopique. En outre, l'hétérogénéité à petite échelle de la roche argileuse et l'arrangement minéral conduisent à des schémas de rupture différents à grande échelle. Ces résultats mettent en évidence une relation claire entre la rupture induite par le fluage à différentes échelles. Enfin, l'anisotropie de la roche argileuse a un effet limité sur la vitesse de déformation par fluage.

Ensuite, l'excavation et la phase opérationnelle de la Galerie Expérimentale Deux (GED) in situ ont été modélisées. La convergence verticale modélisée des parois de la galerie présente une bonne cohérence par rapport aux mesures in situ ; cependant, la convergence horizontale est surestimée. La modélisation a montré que le fluage de la roche à long terme semble être principalement influencé par la déformation à l'intérieur d'une (ou peut-être de quelques) bande(s) de cisaillement la(les) plus importante(s). Ces bandes de cisaillement dominent le comportement à long terme de l'EDZ autour de la galerie. D'après les résultats numériques obtenus en laboratoire et à l'échelle de la galerie, la rupture par cisaillement induite par le fluage avec méso-fissuration par cisaillement peut se développer à travers la mésostructure, ce qui conduit à des bandes de localisation de macro-déformation par cisaillement induit par le fluage (précurseur de la macro-fissuration par cisaillement) à l'échelle macroscopique.

Enfin, le modèle FE² utilisé pour simuler un milieu saturé est étendu au cas de saturation partielle afin de prendre en compte l'effet de la ventilation de la galerie. Un drainage de l'eau et un processus de désaturation évident à proximité de la paroi de la galerie sont observés pendant la ventilation à long terme de la galerie. La ventilation des galeries engendre une diminution de la pression de l'eau interstitielle dans la roche, ce qui conduit à une aspiration et à une désaturation de la roche autour des galeries. Cette désaturation tend à disparaître plus profondément dans la masse rocheuse, où la roche argileuse reste entièrement saturée. De plus, la succion et la désaturation de la roche engendrent une augmentation de la résistance de la roche autour de la galerie, ce qui inhibe le développement de bandes de cisaillement à grande échelle autour de la galerie. À petite échelle, la ventilation de l'air influence le développement des dommages au niveau des contacts entre les grains minéraux et inhibe le développement ultérieur de microfissures.