

Implémentation d'une loi de comportement dans PLAXIS pour l'analyse anisotrope, viscoplastique et thermique des géomatériaux

Implementing a material model in PLAXIS for anisotropic, viscoplastic and thermal analysis of geomaterials

Borzouyeh KHANGHAHI-BALA¹, Siavash GHABEZLOO^{1*}

¹ Navier, ENPC, Institut Polytechnique de Paris, Univ Gustave Eiffel, CNRS, 77455, Marne-la-Vallée, France

* siavash.ghabzloo@enpc.fr

RESUME : Les logiciels d'éléments finis tels que PLAXIS sont devenus des outils incontournables pour la simulation et la conception des ouvrages géotechniques. Si les lois de comportement classiques sont généralement suffisantes pour les applications courantes, elles atteignent leurs limites lorsqu'il s'agit de problématiques plus complexes nécessitant la prise en compte de l'anisotropie, des déformations différées et du comportement thermoplastique des géomatériaux. L'interface User Defined Soil Model (UDSM) de PLAXIS permet d'implémenter des lois de comportement avancées intégrant différents phénomènes et couplages multiphysiques. Dans ce travail, un modèle UDSM élasto-viscoplastique anisotrope intégrant les couplages thermo-hydro-mécaniques (THM) est développé. Le modèle inclut plusieurs mécanismes d'écrouissage dépendant des déformations plastiques ainsi qu'une fonction d'écrouissage thermique permettant de reproduire les phénomènes d'effondrement thermique observés dans les argiles. Le modèle est validé à partir de plusieurs cas tests représentatifs, puis appliqué à la modélisation numérique d'un système de stockage d'énergie thermique en aquifère à haute température (HT-ATES).

ABSTRACT: Finite element software such as PLAXIS has become an essential tool for the simulation and design of geotechnical structures. While classical constitutive models are generally adequate for routine applications, they reach their limits when addressing more complex problems that require accounting for anisotropy, time-dependent deformations, and the thermoplastic behaviour of geomaterials. The User Defined Soil Model (UDSM) interface in PLAXIS allows the implementation of advanced constitutive models incorporating various physical mechanisms and multiphysical couplings. In this study, an anisotropic elasto-viscoplastic UDSM incorporating thermo-hydro-mechanical (THM) couplings is developed. The model includes several hardening mechanisms driven by plastic deformations, as well as a temperature-dependent hardening function that enables the simulation of thermal collapse phenomena observed in clays. The model is validated against several representative tests and subsequently applied to the numerical modelling of a high-temperature aquifer thermal energy storage (HT-ATES) system.

Mots-clés: Simulations numériques ; loi de comportement ; Plaxis

1 INTRODUCTION

L'analyse par éléments finis (EF) est devenue centrale pour la conception des ouvrages géotechniques, notamment les tunnels, les excavations profondes, les géostructures énergétiques et les systèmes de stockage souterrains. En pratique industrielle, le logiciel PLAXIS est largement utilisé car il combine des solveurs EF robustes avec des flux de travail adaptés à la géotechnique. Cependant, les lois de comportement standard et couramment utilisées peuvent s'avérer insuffisantes lorsque le problème implique (i) une forte anisotropie des matériaux, (ii) comportement différé ou (iii) une plasticité induite thermiquement.

Pour répondre à ces besoins, PLAXIS propose une interface User Defined Soil Model (UDSM) permettant aux utilisateurs d'implémenter des lois de comportement avancées sous forme de bibliothèques dynamiques compilées. Cet article présente un UDSM pour l'implémentation d'une loi de comportement élasto-viscoplastique avec la prise en compte des couplages thermo-hydro-mécaniques et l'anisotropie transverse du matériau. La surface de charge et le potentiel plastique utilisées sont de type Cam-Clay asymétrique (ACC) et une viscoplasticité par dépassement de seuil (Perzyna, 1966).

Cet article est organisé comme suit. La Section 2 présente la méthodologie d'implémentation du UDSM dans PLAXIS, en détaillant les étapes pratiques pour les nouveaux utilisateurs. La Section 3 présente la formulation théorique du modèle. La Section 4 présente la vérification du modèle par comparaison avec des essais élémentaires œdométriques sous chargements mécaniques et thermiques. La Section 5 illustre une application du modèle au problème de stockage d'énergie thermique en acquière à haute température (HT-ATES) par une simulation THM couplée axisymétrique.

2 MÉTHODOLOGIE UDSM DANS PLAXIS

Cette section propose une brève méthodologie pour implémenter et utiliser un User Defined Soil Model (UDSM) dans PLAXIS. Dans ce logiciel, pour définir un modèle de matériau ou une loi de comportement pour chaque couche de sol ou de roche, on peut choisir parmi les modèles par défaut déjà présents ou opter pour l'option UDSM. Cette option utilise un fichier DLL (Dynamic Link Library) compilé à partir du code développé pour le comportement du matériau, placé dans le répertoire du logiciel. La Figure 1 illustre comment PLAXIS utilise ce fichier DLL (UDSM) dans la procédure de calcul. Dans PLAXIS, un UDSM remplace la mise à jour constitutive intégrée aux points de Gauss. À chaque pas de charge et itération, PLAXIS appelle le UDSM pour mettre à jour les contraintes, les variables d'état et la matrice de rigidité constitutive algorithmique. En analyses couplées, la température et la pression interstitielle sont également fournies et doivent être prises en compte dans la mise à jour constitutive.

3 THÉORIE

La loi de comportement utilisés dans cette étude est développée au Laboratoire Navier et a été calibrée et utilisée pour différents géomatériaux comme les roches sédimentaires, les argilites, et les matériaux cimentaires. Une présentation détaillée de cette loi peut être trouvée dans Pierre et al. (2025) et Ren et al. (2026). Les éléments principaux du modèle sont présentés dans la suite.

La surface de charge utilisée dans ce modèle de matériau est le Cam-Clay asymétrique (ACC) (Samudio Lezcano, 2017). Il s'agit d'une extension du modèle Cam-Clay modifié avec la surface de charge présentée dans l'équation suivante :

$$f = q^2 e^{-k_f \left(\frac{2p' + P_t - P_c}{P_t + P_c} \right)} + M^2 (p' + P_t) (p' - P_c) \quad (1)$$

où p' et q sont respectivement la contrainte moyenne et la contrainte déviatorique; les paramètres du modèle sont définis dans le Tableau 1. Le potentiel plastique g est une équation similaire à l'Eq (1) dans laquelle le paramètre M est remplacé par N pour une règle d'écoulement plastique non-associée.

La fonction d'écrouissage pour le paramètre P_c est présentée en fonction de la déformation plastique volumique et la température, permettant la simulation de phénomène de l'effondrement thermique dans les argiles.

$$P_c = P_{c0} e^{[-\kappa_{pc} (\varepsilon_v^{pl} + 3\beta\Delta T)]} \quad (2)$$

L'écrouissage pour le paramètre d'état critique M est décrite en fonction de la déformation déviatorique plastique :

$$M = M_\infty + (M_0 - M_\infty) e^{-M_r \varepsilon_v^{pl}} \quad (3)$$

Une fonction similaire est utilisée pour le paramètre N du potentiel plastique. Si le matériau présente un comportement différé, l'utilisateur peut activer un comportement visqueux en utilisant le modèle à dépassement de seuil de Perzyna (1966) sous la forme :

$$d\varepsilon^{pl} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{F}{F_{ref}} \right)^m \frac{\partial g}{\partial \sigma} \quad (4)$$

où $\dot{\varepsilon}^{pl}$ est la vitesse de déformation viscoplastique. Pour le calcul des contraintes, cinq paramètres d'isotropie transverse sont utilisés pour former la matrice de rigidité élastique (Tableau 1). Pour simplifier la prise en compte de l'anisotropie en plasticité, on utilise la méthode des contraintes mises à l'échelle (scaled stress) afin d'augmenter les contraintes apparentes dans la direction la plus faible (Mánica et al., 2016). De plus, pour tenir compte de l'orientation de plan de l'anisotropie, une rotation est utilisée pour transformer les matrices entre les repères.

4 VÉRIFICATION

Afin de vérifier la loi de comportement implémentée dans PLAXIS, plusieurs essais triaxiaux et œdométriques ont été simulés et les résultats ont été comparés avec des solutions au point matériel. Les résultats ont été également comparés avec ceux de même modèle implémenté dans FEniCS. Dans cet article, deux essais œdométriques, réalisés sous sollicitations mécaniques et thermiques (soit quatre

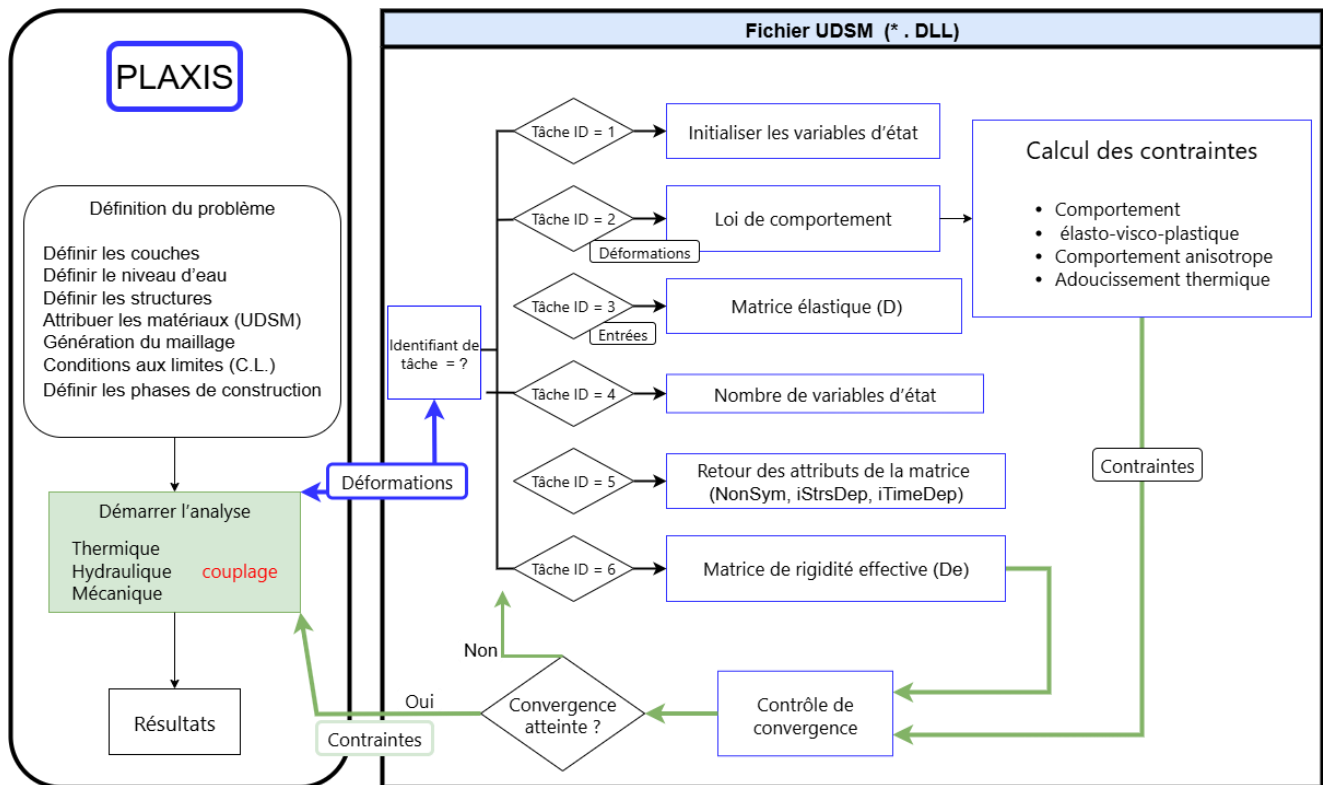


Figure 1. Organigramme de la mise en œuvre du modèle de sol défini par l'utilisateur (UDSM) dans PLAXIS.

cas au total), sont présentés. Les paramètres utilisés sont indiqués au Tableau 1.

Dans ces simulations, une déformation verticale de $6e-3$ est appliquée à une éprouvette pendant 600 secondes, puis, tandis que le déplacement vertical est maintenu constant, la température est augmentée de 20°C en 5000 secondes. Le modèle est vérifié en comparant le chemin de contraintes de l'échantillon obtenu par un calcul au point matériel et par simulation numérique PLAXIS. Dans ce premier cas, un comportement thermo-élasto-plastique est considéré pour le matériau, sans la prise en compte du comportement différé. Dans le deuxième cas, un comportement thermo-élasto- viscoplastique est considéré. Par souci de simplicité, le matériau est considéré isotrope ; pour les simulations numériques des sections suivantes, le matériau sera considéré comme isotrope transverse.

4.1 Cas 1 : Comportement élasto-thermo-plastique

L'objectif de la simulation du cas 1 est la vérification et l'évaluation du modèle de matériau développé pour une utilisation dans PLAXIS lorsque le matériau ne présente pas de comportement visqueux. Dans ce cas, le modèle doit fonctionner correctement en l'absence de viscosité, bien que l'on puisse activer la viscosité avec des paramètres temporels proches de zéro. À cette

fin, un essai œdométrique est simulé avec application successive des sollicitations mécaniques et de la variation de température. Le résultat est illustré par les chemins de contraintes (Figure 2). Le modèle numérique développé montre une cohérence avec la solution au point matériel pour les parties mécanique et thermique.

Pendant le chargement mécanique (ligne verte), on observe qu'après l'atteinte de la surface de charge, l'écroutissage en cisaillement se manifeste par la variation du paramètre M , tandis que le paramètre P_c présente d'abord un radoucissement volumique puis un écroutissage. Dans la seconde partie (ligne rouge), la température augmente alors que la déformation est maintenue constante. On constate que, bien que l'état de contrainte reste sur la surface de charge ($f = 0$), le matériau s'affaiblit et la surface de charge subit un radoucissement thermique dû à la hausse de température.

4.2 Cas 2 : Comportement thermo-élasto-viscoplastique

Lorsque le matériau présente un comportement différé, on peut utiliser les paramètres visqueux du modèle. Comme précédemment, les sollicitations mécaniques et la variation de température sont appliquées successivement. Le résultat est illustré par les chemins de contraintes (Figure 3). La simulation numérique est

Tableau 1. Nomenclature, unités et valeurs

Comportement	Paramètres	Description	Vérification Cas I	Vérification Cas II	Simulation	Unité
Elastique	E_v	Module d'Young (v \downarrow)	3e6	3e6	5e6	kPa
	E_h	Module d'Young (h \leftrightarrow)	3e6	3e6	3e6	kPa
	ν_{hh}	Coeff. de Poisson (hh \leftrightarrow)	0.2	0.2	0.28	-
	ν_{vh}	Coeff. de Poisson (vh \perp)	0.2	0.2	0.3	-
	G_{vh}	Module de cisaillement (vh \perp)	1.25e6	1.25e6	2.5e6	kPa
Plastique	P_{c0}	Cont. de préconsolidation initiale	5000	5000	9600	kPa
	P_t	Limite de plasticité isotrope en traction	500	500	2100	kPa
	k_f	Paramètre d'inclinaison de f	1	1	1	-
	k_g	Paramètre d'inclinaison de g	1	1	1	-
	M_0	Paramètre d'état critique ini (f)	1	1	1.64	-
	M_∞	Paramètre d'état critique fin (f)	1.2	1.2	1.8	-
	M_r	Taux de changement paramètre d'état critique (f)	1400	1400	1400	-
	N_0	Paramètre d'état critique ini (g)	1	1	1.64	-
	N_∞	Paramètre d'état critique fin (g)	1.2	1.2	1.8	-
	N_r	Taux de changement paramètre d'état critique (g)	1400	1400	1400	-
	C_N	Coef. de mise à l'échelle normal	1	1	1.07	-
	C_S	Coef. de mise à l'échelle cis.	1	1	1.07	-
	k_{pc}	Coef. de l'écroutissage volumique	50	50	50	-
	β	Coef. de l'écroutissage thermique	9e-6	9e-6	9e-6	-
Différé	η	Viscosité	-	4.32e8	1e6	kPa.sec
	m	Paramètre de Perzyna	-	1	1	-
	F_r	Pression de référence Perzyna	-	4e6	2.5e7	(kPa) ²
Hydraulique	K_v	Conductivité hydraulique (v \downarrow)	2e-7	2e-7	3.47e-6	m/sec
	K_h	Conductivité hydraulique (h \leftrightarrow)	2e-7	2e-7	3.47e-6	m/sec
Thermique	α_v	Expansion therm. linéaire (v \downarrow)	1.28e-6	1.28e-5	1e-5	1/°C
	α_h	Expansion therm. linéaire (h \leftrightarrow)	1.28e-6	1.28e-5	1.28e-5	1/°C
	C_T	Chaleur spécifique	978	978	978	KJ/°C/sec
	λ_T	Conductivité thermique	9.667e-3	9.667e-3	1.667e-3	KW/m°C

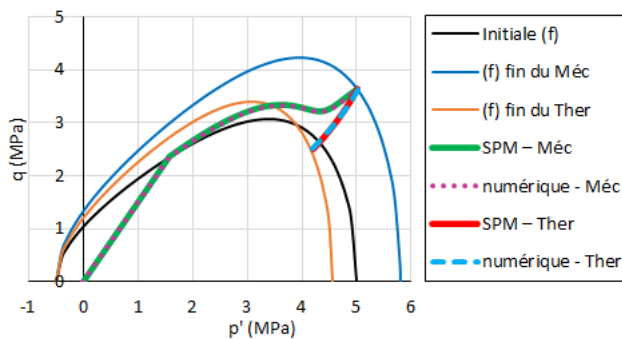


Figure 2. Chemin de contrainte (p' - q) pour le cas élasto-thermo-plastique; SPM : simulation point matériel; Méc : chargement mécanique; Ther : chargement thermique.

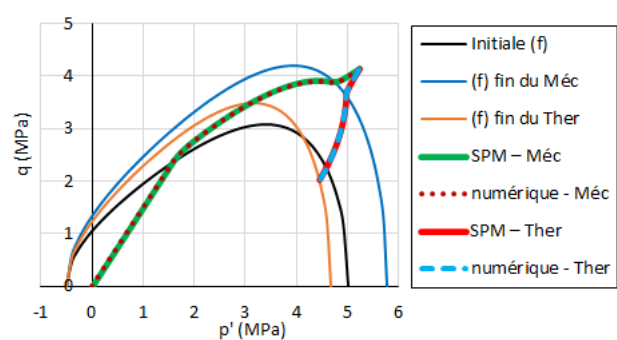


Figure 3. Chemin de contrainte (p' - q) pour le cas élasto-thermo-viscoplastique; SPM : simulation point matériel; Méc : chargement mécanique ; Ther : chargement thermique.

cohérente avec la solution au point matériel pour les parties mécanique et thermique.

Lorsque la déformation verticale augmente à température constante (ligne verte), on observe qu'après l'atteinte de la surface de charge, l'état de

contrainte dépasse la surface par rapport au cas 1 en raison du modèle de dépassement de seuil de Perzyna. On peut observer l'état de contrainte à la fin du chargement mécanique. Dans le même temps, le matériau subit l'écroutissage en cisaillement, le

dépassement de seuil, le comportement visqueux, puis un radoucissement volumique suivi d'un écrouissage. Pendant le chargement thermique (ligne rouge), la température augmente tandis que la déformation est maintenue constante. À ce stade, au fil du temps, l'état de contrainte montre une relaxation à déformations fixées et rejoint la surface de charge ($f = 0$) alors que la température augmente lentement. Ensuite, la température continuant d'augmenter et la surface de charge se contracte.

5 SIMULATION NUMÉRIQUE

L'adoucissement thermique et la réduction de résistance dues aux variations de température jouent un rôle dans de nombreuses problématiques d'ingénierie, telles que le stockage d'énergie géothermique, le stockage de déchets nucléaires, les décharges urbaines, etc. Une simulation axisymétrique THM couplée dans PLAXIS 2D est présentée pour démontrer l'application du UDSM développé au stockage d'énergie thermique en aquifère à haute température (HT-ATES).

HT-ATES suscite un intérêt croissant en tant que technologie permettant de transférer l'énergie thermique excédentaire des périodes hors-pics vers les périodes de pointe et de valoriser la chaleur fatale. Les synthèses et études de cas récentes montrent que le HT-ATES peut améliorer l'efficacité globale des réseaux de chaleur et des systèmes énergétiques industriels, mais soulève également des préoccupations géomécaniques telles que le soulèvement de surface, la redistribution des contraintes et d'éventuels endommagements du réservoir dus aux processus thermo-hydro-mécaniques (THM) couplés (Fleuchaus et al., 2018; Vidal et al., 2022; Stricker et al., 2024; Heldt et al., 2024).

Dans l'exemple présenté ici, de l'eau chaude à 90 °C est injectée pendant 200 jours dans une couche de 10 m d'épaisseur à 500 m de profondeur. Des puits de pompage, situés à 80 m autour du puits d'injection principal, extraient de l'eau au même débit total. Dans un modèle axisymétrique, les puits de pompage représentent un anneau continu autour du puits d'injection pour évaluer les effets liés à l'augmentation de température.

Les paramètres du matériau considéré sont présentés au Tableau 1. Les paramètres de la loi de comportement ont été sélectionnés de manière à représenter des cas réalistes, en s'appuyant sur les valeurs proposées par Ren et al. (2026) et Rutqvist et al. (2025). Le domaine modélisé est de 600 m de profondeur et de 100 m de rayon. Les forages s'étendent depuis la surface du sol jusqu'à la

profondeur de 500 m et la couche cible a 10 m d'épaisseur. 1476 éléments triangulaires, avec raffinement près des puits (Figure 4), sont utilisés dans cette simulation, dont le calcul a pris moins de 3 minutes. La surface du sol est supposée à température constante de 12 °C pendant tout le calcul et un gradient géothermique de 30 °C/km est considéré. Le niveau piézométrique est maintenu à la surface du sol et le poids volumique de la couche est fixé à 23 kN/m³. Ainsi, à la cote d'injection, la température, la pression interstitielle et la contrainte moyenne initiales sont respectivement d'environ 27,3 °C, 5 MPa et 11,5 MPa. Pour les conditions aux limites, le puits d'injection de 10 cm de diamètre est placé sur l'axe de symétrie. La frontière supérieure est libre en déplacement vertical, tandis que les frontières droite et inférieure sont bloquées dans la direction normale. Le bas du domaine est considéré imperméable.

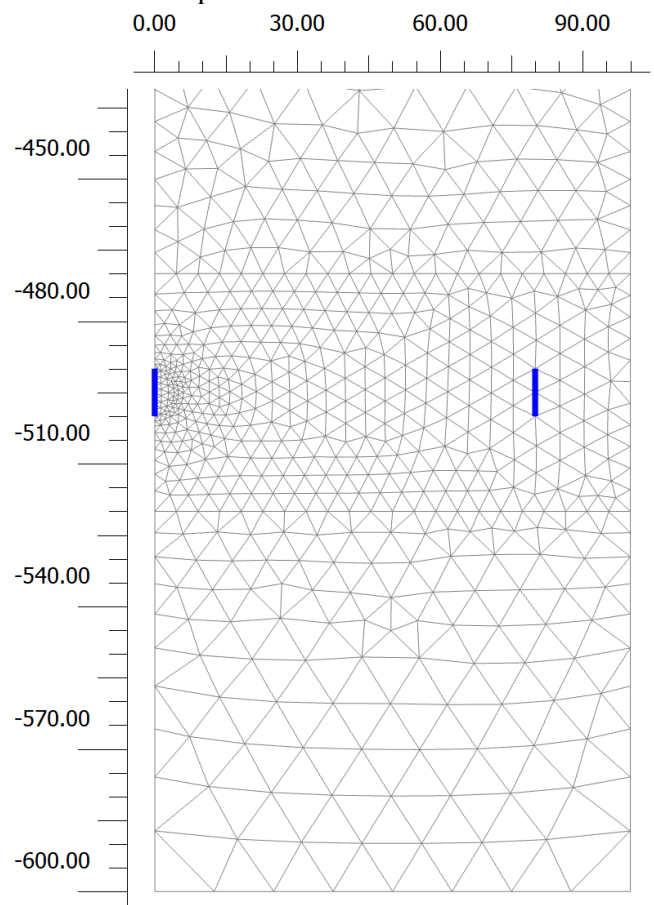


Figure 4. Maillage et raffinement

L'injection et le pompage se poursuivent pendant 200 jours au même débit de 400 m³/jour/m dans les puits, avec circulation d'eau à 90 °C. Les Figures 5 et 6 montrent respectivement l'élévation de température et la pression interstitielle en fin de période. Sous l'effet de cette élévation thermique, à mesure que l'onde de chaleur progresse, une réduction de résistance se produit dans la roche sous forme de

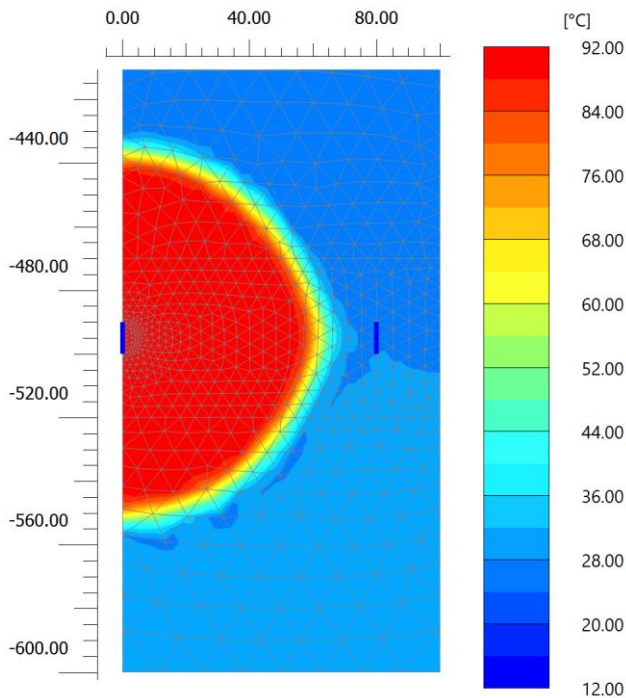


Figure 5. Distribution de la température après 200 jours.

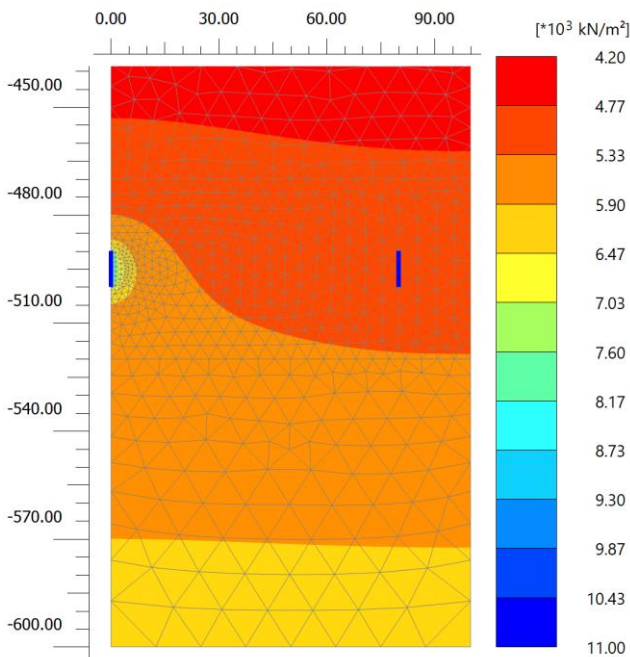


Figure 6. Distribution de la pression interstitielle après 200 jours.

diminution de P_c . La Figure 7 illustre l'état de contrainte pour des points situés au même niveau que les puits ($y = -495$ m) à différentes distances du puits d'injection. La Figure 8 montre la propagation des points plastiques. Comme on l'observe sur le chemin de contraintes (Figure 7), pendant l'injection d'eau chaude, les points se déplacent vers la zone de contraction de la surface de charge en raison de l'expansion thermique et de l'augmentation de la

contrainte, ce qui signifie que le matériau tend à se compacter au passage de l'onde de chaleur. Ce phénomène induit une tension sur les points déjà traversés par l'onde de chaleur, ce qui ramène ces points dans le domaine élastique ; c'est pourquoi certains points deviennent d'abord plastiques puis redeviennent élastiques (Figures 7 et 8).

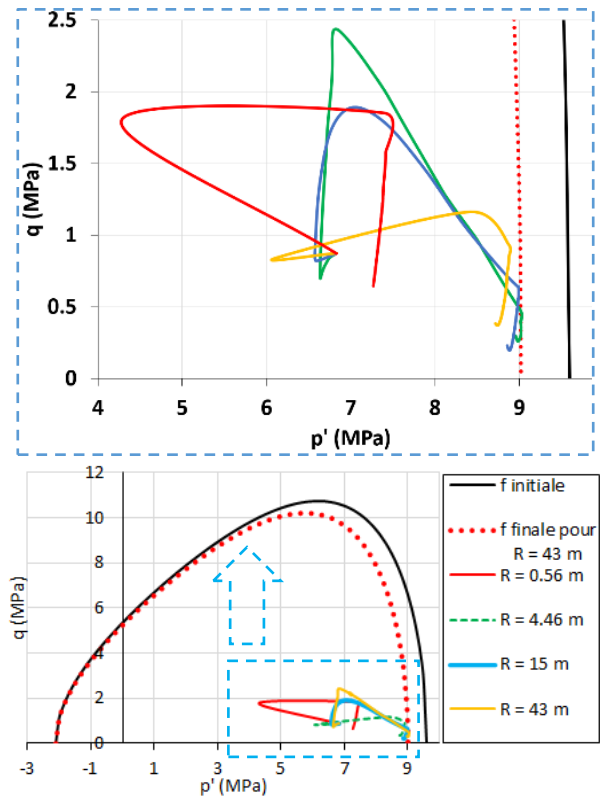


Figure 7. Chemins de contrainte de quatre points situés à différentes distances du puits d'injection.

Pour illustrer l'impact de la propagation de la chaleur sur le comportement, l'évaluation de la résistance apporte de nombreuses informations. La coupe transversale de la couche à ce niveau (Figure 9) montre l'évolution de P_c au fil du temps à mesure que la chaleur se propage dans la couche. Elle met en évidence la variation de P_c résultant de la combinaison de l'adoucissement thermique et de l'écrouissage en déformation, à mesure que l'onde thermique et l'onde mécanique (issue de l'expansion thermique) atteignent les différents points. Cette observation ressort également de la Figure 10 qui montre la variation de P_c au cours du temps pour un point situé à 43 m. Le chemin de contraintes des points proches du puits, en Figure 7, indique qu'ils restent élastiques sous l'effet de l'expansion thermique car la frontière proche du puits est libre de se déplacer sous l'augmentation de température. La Figure 9 montre que, bien que les points proches du puits restent élastiques, P_c diminue aussi par adoucissement thermique. En revanche, du

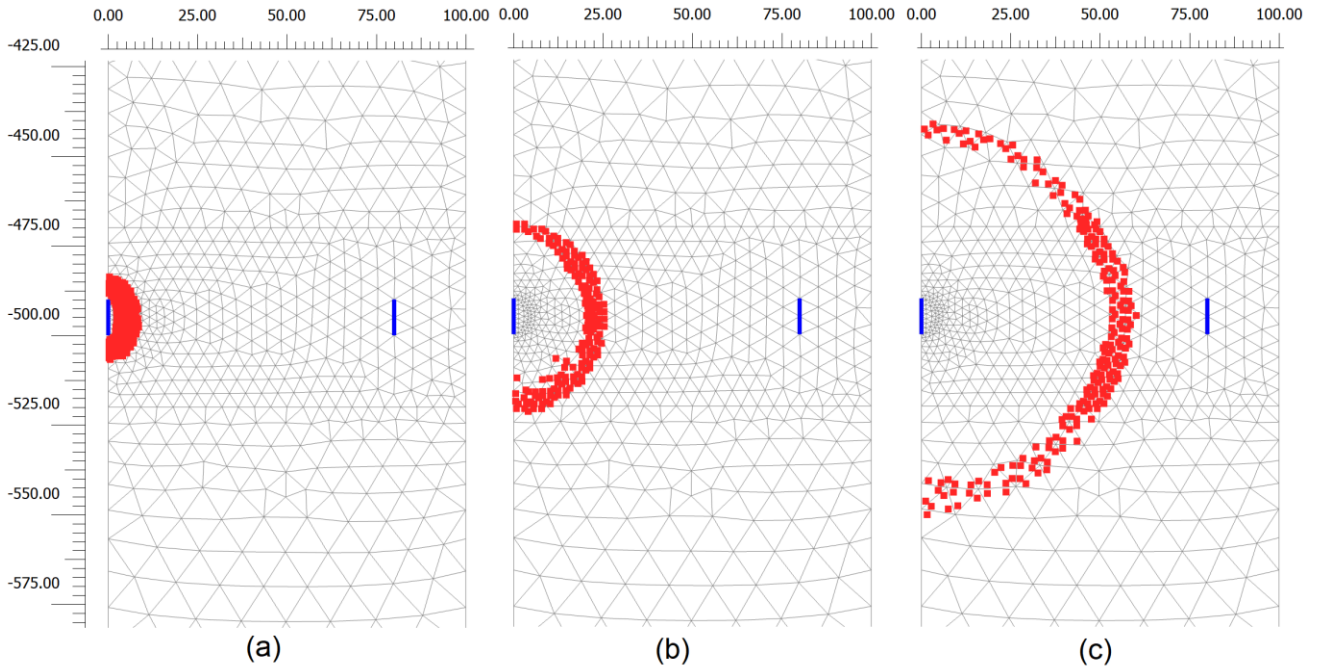


Figure 8. Propagation des points plastifiés après a) 2 jours b) 20 jours c) 200 jours.

fait de la compaction plastique et de l'écroissage, les points plus éloignés du puits montrent une réduction de résistance moindre (diminution plus faible de P_C). Les Figures 10-12 montrent l'évolution de P_C , de la température et de M pour un point situé à 43 m du puits d'injection.

6 CONCLUSION

Un UDSM PLAXIS a été développé pour un comportement élasto-thermo-viscoplastique isotrope transverse, utilisant une surface de charge Cam-Clay asymétrique et une viscoplasticité par dépassement de seuil de Perzyna. L'évolution de la surface de charge en fonction de la température permet de simuler le comportement dépendant du temps et l'adoucissement thermique des géomatériaux.

Une simulation THM axisymétrique couplée de HT-ATES a démontré la capacité du modèle à prédire l'évolution de la température, des zones plastiques et de la réduction de résistance sous injection d'eau chaude.

Le modèle est applicable à un large éventail de problèmes géotechniques où l'anisotropie, les effets de température et la dépendance temporelle sont importants, notamment l'excavation souterraine, les géostructures énergétiques, le stockage d'énergie en sous-sol et les dépôts de déchets nucléaires.

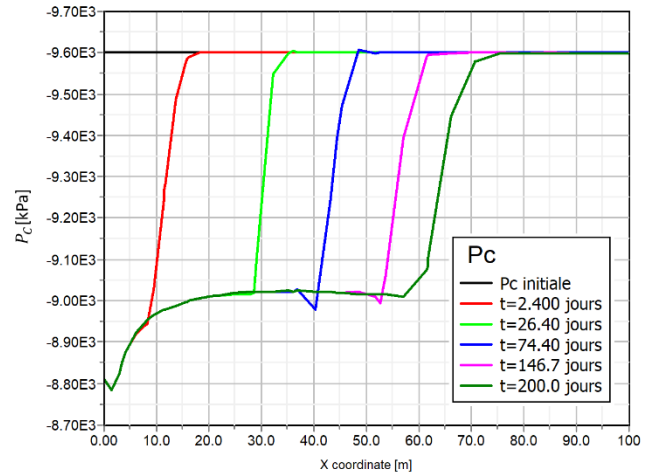


Figure 9. Évolution de P_C le long de la couche au cours du temps.

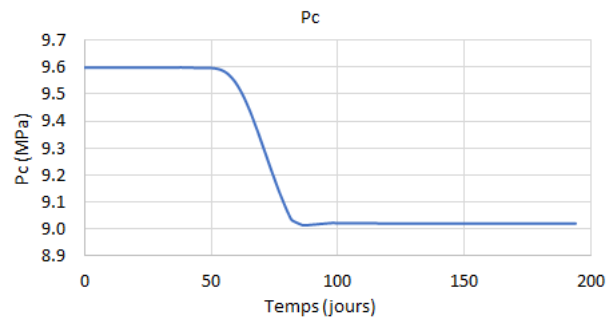


Figure 10. Évolution de P_C au cours du temps pour un point situé à 43 m du puits d'injection.

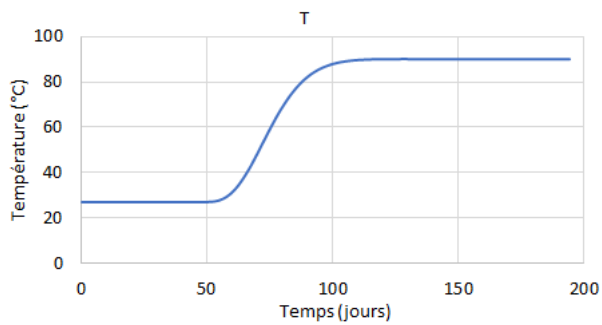


Figure 11. Évolution de la température au cours du temps pour un point situé à 43 m du puits d'injection.

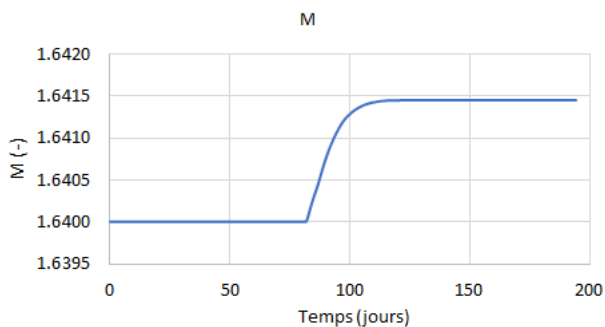


Figure 12. Évolution de M au cours du temps pour un point situé à 43 m du puits d'injection.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Fleuchaus, P., Godschalk, B., Stober, I., Blum, P. (2018). *Worldwide application of aquifer thermal energy storage - A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 94, 861-876. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.057>
- Heldt, S., Beyer, C., Bauer, S. (2024). *Uncertainty assessment of thermal recovery and subsurface temperature changes induced by high-temperature aquifer thermal energy storage (HT-ATES): A case study*. Geothermics, 122, 103086. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.103086>
- Perzyna, P. (1966). *Fundamental problems in viscoplasticity*. Advances in Applied Mechanics, 9, 243-377. [https://doi.org/10.1016/S0065-2156\(08\)70009-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2156(08)70009-7)
- Pierre, M., Samudio, M., Ghabezloo, S., Dangla, P., 2025. *Modelling the poromechanical behaviour of class G cement paste: A multiphysics approach from early age to hardened state*. Cement and Concrete Research 193, 107852. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.107852>
- PLAXIS (2015). *Material Models Manual. User-defined soil models (UDSM)*. Bentley Systems. (Software documentation).
- Ren, J., Braun, P., Plua, C, Vu, M.N., Armand, G., Ghabezloo, S. (2026) *Porosity-elasto-viscoplastic behaviour of in-situ heated Callovo-Oxfordian claystone: Laboratory investigation and constitutive modelling*, Rock Mechanics and Rock Engineering (under revision).
- Samudio Lezcano, M. E. (2017). *Modelling of an oil well cement paste from early age to hardened state: hydration kinetics and poromechanical behaviour*, PhD thesis, Université Paris-Est. <https://pastel.hal.science/tel-01781441v1>
- Stricker, K., Egert, R., Schill, E., Kohl, T. (2024). *Risk of surface movements and reservoir deformation for high-temperature aquifer thermal energy storage (HT-ATES)*. Geothermal Energy, 12, 4. <https://doi.org/10.1186/s40517-024-00283-9>
- Vidal, R., Olivella, S., Saaltink, M.W., Diaz-Maurin, F. (2022). *Heat storage efficiency, ground surface uplift and thermo-hydro-mechanical phenomena for high-temperature aquifer thermal energy storage*. Geothermal Energy, 10, 23. <https://doi.org/10.1186/s40517-022-00233-3>
- Rutqvist, J., Zhang, Y., Alcolea, A., Castilla, R., Meier, P., Dobson, P. (2025). *Insights from a coupled thermo-hydro-mechanical analysis of a layered high-temperature thermal energy storage reservoir*. SSRN preprint. <https://ssrn.com/abstract=5701746>