

École polytechnique de Louvain

Modélisation du comportement thermo-hydro-mécanique du réservoir géothermique du site de Balmatt, en Belgique.

Auteur: **Astrid GAUTHIER**

Promoteur: **Hadrien RATTEZ**

Lecteurs: **Jens NICLAES, Pierre-Yves BOLLY**

Année académique 2022–2023

Master [120] : ingénieur civil des constructions

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire et à mon parcours académique.

Tout d'abord, je tiens à adresser mes remerciements à mon promoteur Dr. Hadrien Rattez qui m'a permis de réaliser ce travail sur un sujet qui me tient à cœur et qui m'a partagé son savoir et son expérience dans le domaine de la géothermie.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance envers Mr. Alexandre Sac-Morane, qui m'a accompagné tout au long de mon cheminement, ainsi qu'au Dr. Antoine Jacquey, qui m'a apporté une aide précieuse. Leur collaboration, leur partage de connaissances et leur disponibilité ont enrichi cette expérience de recherche et ont apporté une perspective précieuse à mes réflexions.

À mon compagnon Thomas Bader et ses parents, je dois un immense merci pour leur soutien sans failles, leur présence et leurs encouragements qui ont été source de réconfort et de motivation tout au long de cette aventure.

Enfin, je tiens à remercier ma famille et mes amis pour leur confiance en moi et leur soutien. Je remercie particulièrement Marine Savenberg, Astrid Vandebussche et Imane Jabari qui ont consacré leur temps à relire une partie de ce mémoire, ainsi qu'à Jimmy Fraiture qui m'a aidé à utiliser le Cluster de l'UCL.

Abstract

Cette étude se concentre sur l'exploration approfondie de la géothermie en tant que source d'énergie renouvelable. En Belgique, la géothermie possède un potentiel considérable malgré les défis qu'elle rencontre. Cette recherche se penche sur les aspects techniques et environnementaux liés à l'exploitation de la géothermie profonde, en mettant en évidence les défis posés par la sismicité induite et le "thermal breakthrough". À travers la modélisation en trois dimensions du réservoir géothermique de Mol et des simulations numériques, l'étude analyse l'impact des paramètres hydrauliques, mécaniques et thermiques sur le comportement du réservoir. Les résultats montrent l'influence des différents paramètres sur la pression de pore, les contraintes effectives et la stabilité du réservoir. Les conclusions soulignent l'importance d'améliorer la précision du modèle thermique et suggèrent des perspectives de recherche futures pour mieux comprendre et exploiter la géothermie en toute sécurité.

Table des matières

1 Introduction	1
2 État de l'art	3
2.1 La géothermie	3
2.1.1 Fonctionnement	4
2.1.1.1 Géothermie très basse énergie	5
2.1.1.2 Géothermie basse énergie	6
2.1.1.3 Géothermie moyenne énergie	6
2.1.1.4 Géothermie haute énergie	6
2.1.1.5 Enhanced Geothermal System	7
2.1.2 Origine du gradient géothermique	7
2.1.3 Situation belge	8
2.1.4 Les freins au développement de la géothermie	10
2.1.4.1 Limitations techniques	10
2.1.4.2 Aspects économiques et financiers	11
2.1.4.3 Aspects juridiques et acceptation sociale	12
2.2 La sismicité induite	12
2.2.1 Régimes tectoniques	13
2.2.2 Mécanismes de déclenchement	13
2.2.2.1 Cas de la géothermie	15
2.2.2.2 Glissements asismiques	16
2.2.3 Lois de frottement et critères de rupture	18
2.2.3.1 Critère de Mohr Coulomb	18
2.2.3.2 La loi de rate-and-state	19
2.2.3.3 Effet Kaiser	20
2.2.4 Solutions	20
2.3 Thermal breakthrough	22
2.4 Le projet Balmatt	22
2.4.1 Contexte géologique	25
2.4.2 Sismicité induite à Mol	25
3 Simulations	28
3.1 Logiciel d'analyse par éléments finis : Moose	28
3.1.1 Input file	29
3.1.2 Porous flow	30
3.1.3 Équations de PorousFlowFullySaturated	30
3.1.3.1 Hydraulique	30

3.1.3.2	Thermique	31
3.1.3.3	Mécanique	31
3.2	Modélisation du système en 3D	31
3.2.1	Géométrie et maillage	32
3.2.2	Critères de comparaison	33
3.2.3	Conditions initiales et limites	35
3.2.4	Propriétés des matériaux	35
3.2.4.1	Propriétés hydrauliques	35
3.2.4.1.1	Débit	35
3.2.4.1.2	Perméabilité	36
3.2.4.1.3	Porosité	38
3.2.4.1.4	Module d'élasticité isostatique et coefficient de Poisson	39
3.2.4.1.5	Coefficient de Biot	40
3.2.4.2	Propriétés mécaniques	42
3.2.4.2.1	Coefficient de Biot	42
3.2.4.2.2	Masse volumique de la roche	43
3.2.4.2.3	Cohésion et angle de frottement	43
3.2.4.2.4	Coefficient de poussée	44
3.2.4.3	Propriétés thermiques	44
3.2.4.3.1	Température du fluide et du réservoir	44
3.2.4.3.2	Capacité calorifique spécifique	45
3.2.4.3.3	Conductivité thermique	47
3.2.4.3.4	Coefficient d'expansion thermique	48
4	Résultats de l'étude	49
4.1	Raffinement du maillage	50
4.2	Analyse paramétrique	53
4.2.1	Perméabilité	53
4.2.2	Porosité	55
4.2.3	Débit d'injection	57
4.2.4	Coefficient de Biot	58
4.2.5	Masse volumique de la roche	62
4.2.6	Coefficient de poussée au repos $K_{0,h}$	63
4.3	Profil de pression interstitielle au point d'injection avec et sans couplage thermique.	65
4.4	Profil de température au point d'injection	66
4.5	Température au puits de production	67
5	Discussion	68
5.1	Analyse paramétrique	68
5.2	Profil de pression et température du réservoir	72
5.3	Limitations du modèle	75
6	Conclusion	76
6.1	Conclusion et perspectives	76

A Vue d'ensemble des événements sismiques induits sur le site géothermique de Balmatt	78
B Analyse paramétrique avec leurs critère de Mohr-Coulomb	80
C Exemple de code pour Moose	81

Listes des symboles

Symboles	Unités	Signification
σ_v	Pa	Contraintes principales verticales
σ_H	Pa	Contraintes principales horizontales maximales
σ_h	Pa	Contraintes principales horizontales minimales
τ	Pa	Cisaillement
μ_s	/	Coefficient de frottement statique
μ_d	/	Coefficient de frottement dynamique
c	Pa	Cohésion
ϕ	/	Porosité du solide
ρ	kg.m ⁻³	Masse volumique
v_s	m.s ⁻¹	Vitesse du solide
k_{ij}	m ²	Matrice de perméabilité
P_f	Pa	Pression interstitielle
g_j	m.s ⁻²	Gravité
ρ_R	kg.m ⁻³	Masse volumique de la roche
C_R	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	Capacité thermique spécifique
T	K	Température
$\mathcal{E}$	J.m ⁻³	Densité d'énergie du système roche-fluide
λ	J.s ⁻¹ .m ⁻¹ .K ⁻¹	Conductivité thermique du système roche-fluide
h	J.kg ⁻¹	Enthalpie spécifique
μ	Pa.s	Viscosité dynamique
σ'_{ij}	Pa	Contraintes effectives
α_B	/	Coefficient de Biot
Q_f	kg.s ⁻¹	Terme source hydraulique
q^T	J.m ⁻³ .s ⁻¹	Terme source thermique
q_f	m.s ⁻¹	Vitesse de Darcy
K	Pa	Module d'élasticité
ν	/	Coefficient de Poisson
E	Pa	Module de Young
$\epsilon^{elastique}$	/	Déformation élastique
α_T	K ⁻¹	Coefficient thermique

Listes des acronymes

Acronyme Signification

EGS	Enhanced Geothermal System
LANL	Los Alamos National Laboratory
VITO	Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek
ULg	Université de Liège
MC	Mohr Coulomb
TVD	True Vertical Depth
TLS	Traffic Light System
Ma	Millions d'années
INL	Idaho National Laboratory

Chapitre 1

Introduction

Lorsqu'on évoque les énergies renouvelables, les premières qui nous viennent à l'esprit sont généralement les énergies solaires ou éoliennes. Pourtant, la géothermie, rentre, elle aussi, dans cette catégorie et possède un potentiel considérable, même en Belgique. Cette source d'énergie, dont l'efficacité a déjà été démontrée dans d'autres pays, à l'instar de Islande où elle représente plus de 60 % de sa consommation énergétique primaire, n'en demeure pas moins confrontée à de multiples défis.

En effet, la répartition inégale de la chaleur sous la surface terrestre rend la quête de sources chaudes plus complexe, particulièrement dans des régions non volcaniques telles que les nôtres, où la température augmente d'environ 30°C par kilomètre de profondeur. En Belgique, la géothermie est donc principalement exploitée pour la production de chaleur plutôt que pour la production d'électricité, qui requiert des températures dépassant les 100°C. Pour envisager une exploitation électrique, il faudrait effectuer des forages profonds de plusieurs kilomètres pour localiser des zones perméables dotées de réserves d'eau adéquates.

La centrale de géothermie profonde implantée à Mol sur l'ancien site de Balmatt permet à VITO d'étudier en conditions réelles les enjeux techniques, la viabilité économique et le potentiel de la géothermie en Belgique. Cette installation extrait l'énergie géothermique en injectant de l'eau sous pression à une profondeur d'environ 4 km puis en pompant cette eau 2 km plus loin, une fois que la roche du sous-sol a cédée sa chaleur au fluide.

Il est crucial de noter que cette activité peut induire des séismes, même dans des zones qui ne sont pas historiquement sujettes aux secousses sismiques, comme cela s'est produit à Mol en juin 2019 et en novembre 2022. Dans le contexte de la géothermie, l'injection d'eau sous pression dans le réservoir géothermique peut, en effet, modifier la pression dans la roche environnante, potentiellement suffisamment pour déclencher des mouvements le long de failles préexistantes et déclencher des séismes. Par conséquent, il est essentiel de comprendre les mécanismes sous-jacents à ce phénomène afin d'assurer une exploitation durable et sécurisée de cette source d'énergie.

Un autre aspect d'intérêt est le *thermal breakthrough*. Lorsque de l'eau est injectée dans un réservoir géothermique, elle interagit avec les formations rocheuses environnantes et absorbe leur chaleur. Au fil du temps, cette eau chaude transporte cette chaleur vers le puits de production. Cependant, si l'injection d'eau n'est pas soigneusement gérée, une zone froide

autour du puits d'injection se crée et peut atteindre le puits de production au bout d'un certain temps. Cette intrusion d'eau froide peut réduire l'efficacité de la centrale géothermique en diminuant la température du fluide extrait, ce qui est connu sous le nom de *thermal breakthrough*.

La simulation et la modélisation de la sismicité induite et ainsi que du *thermal breakthrough* sont cruciales pour concevoir des opérations de production géothermique plus efficaces et durables. Ce mémoire a pour objectif d'explorer ces aspects spécifiques et de contribuer à l'avancement des connaissances dans le domaine de la géothermie et de ses interactions avec le sous-sol. Pour mieux appréhender les mécanismes conduisant à la sismicité induite et au "thermal breakthrough" sur le site géothermique de Mol, un modèle numérique en trois dimensions du réservoir a été élaboré. L'objectif de ce mémoire est de réaliser plusieurs simulations du comportement hydraulique, mécanique et thermique du réservoir grâce à un logiciel d'analyse par éléments finis appelé Moose. Ce mémoire s'inscrit dans la continuité du mémoire réalisé par Maximilien Van Breusegemen en 2021. Maximilien avait alors réalisé un modèle hydromécanique en deux dimensions et avait réalisé plusieurs simulations pour caractériser le sous-sol à 3830 m de profondeur, là où l'eau est injectée. Ces simulations avaient permis de comprendre l'influence de différents paramètres sur le comportement du réservoir. On peut anticiper que la transition d'un modèle en deux dimensions à un modèle en trois dimensions, prenant en compte les effets de température, modifiera les résultats obtenus, et il sera également intéressant d'évaluer dans quelle mesure.

Ce mémoire se consacre dans un premier temps à une exploration approfondie de la géothermie en tant que source d'énergie renouvelable prometteuse. En examinant les multiples facettes de cette technologie, il offre un aperçu complet de son fonctionnement, de l'origine du gradient géothermique et de son application en Belgique. De plus, il aborde les défis liés au développement de la géothermie, tels que les limitations techniques, les aspects économiques, financiers et juridiques. Une attention particulière est portée à la sismicité induite, analysant les mécanismes de déclenchement et les lois de frottement.

La suite du mémoire plonge dans la simulation numérique, explorant l'utilisation du logiciel d'analyse par éléments finis Moose pour modéliser plusieurs des scénarios géothermiques en trois dimensions. Cette section aborde en détail les paramètres clés, la création du maillage, les conditions initiales, les limites et les propriétés des matériaux.

Le cœur du mémoire réside dans la présentation et l'analyse des résultats obtenus à partir de ces simulations. Les variations de paramètres tels que la perméabilité, la porosité, le débit d'injection et d'autres sont étudiées en profondeur. Les profils de pression interstitielle et de température au point d'injection, ainsi que la température au puits de production, sont examinés et comparés.

Enfin, une discussion critique des résultats est présentée, suivie d'une conclusion qui synthétise les principales idées de cette étude. Ce mémoire vise à contribuer à la compréhension et à l'optimisation de l'utilisation de la géothermie, ouvrant la voie à de nouvelles recherches sur la sismicité induite et l'exploitation de réservoirs géothermiques à grande profondeur.

Chapitre 2

État de l’art

La géothermie se présente comme une option prometteuse aux ressources énergétiques conventionnelles. Ce chapitre vise à réaliser une analyse globale de ce domaine sous différentes facettes, abordant son fonctionnement, les bases fondamentales du gradient géothermique, son application dans le contexte belge ainsi que les défis qui conditionnent son développement. Par ailleurs, ce chapitre se penche sur la question de la sismicité induite, en explorant les mécanismes susceptibles d’être engendrés par les activités géothermiques. Enfin, ce chapitre conclura en évoquant le projet Balmatt, en analysant son contexte géologique et en examinant les implications de la sismicité induite à Mol.

2.1 La géothermie

Entre 1965 et 2015, la consommation d’énergie primaire mondiale a été multipliée par 3,7 [E. DE JAEGER, P. GERIN et H. JEANMART 2022], comme le montre la Figure 2.1. En cause, l’augmentation des besoins énergétiques de la population ainsi que l’accroissement de cette dernière. Ainsi, bien que l’efficacité énergétique, de son côté, augmente, elle ne permet pas de compenser la demande croissante en énergie. Dans le même temps, les conséquences du réchauffement climatique frappent chaque jour de nombreuses populations dans le monde. Même en Belgique, les épisodes de sécheresse ou d’inondations sont désormais redoutés chaque été.

Pour répondre à ces défis, les solutions les plus mises en avant sont l’électrification des usages fossiles, le développement des systèmes de stockage d’énergie et l’augmentation de l’utilisation d’énergies renouvelables. Actuellement, environ 60% de l’énergie renouvelable de l’Union Européenne vient de la biomasse [ROMANOV et LEISS 2022]. Cependant cette énergie est limitée en quantité et en potentiel et doit répondre à des critères stricts de durabilité. L’éolien et le solaire, quant à eux, ont vu leur capacité installée évoluer de manière considérable au cours de ces dernières années. Cependant, leur caractère intermittent nécessite l’utilisation de systèmes de stockage d’énergie. C’est dans ce cadre que la géothermie entre en jeu.

La géothermie rassemble l’ensemble des applications permettant de récupérer la chaleur contenue dans le sous-sol ou dans les nappes d’eau souterraines. En outre, le terme géothermie est souvent employé pour désigner l’énergie géothermique produite grâce à la chaleur naturelle de la Terre [WIKIPEDIA 2023]. Cette ressource est exploitée pour chauffer ou refroidir

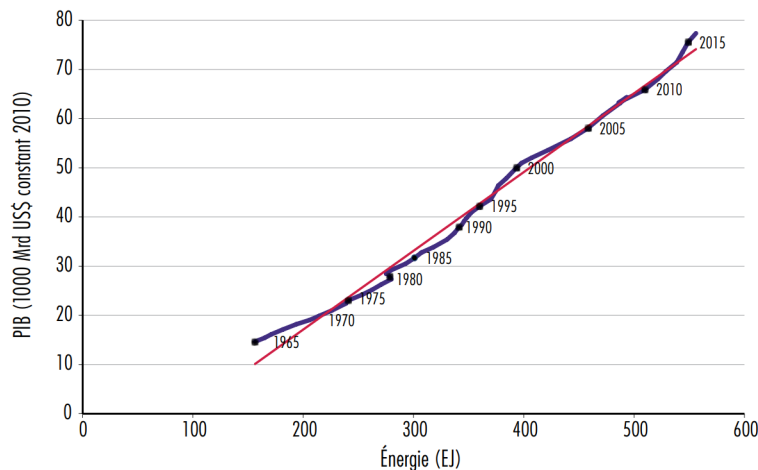


FIGURE 2.1 – Couplage entre consommation d’énergie et activité économique [E. DE JAEGER, P. GERIN et H. JEANMART 2022].

dir l’eau des habitations et pour la production d’électricité, en fonction des caractéristiques thermiques, hydrauliques et mécaniques du site, via différents types de systèmes. Ces caractéristiques varient évidemment de manière significative d’une région à une autre. Par exemple, en Islande, l’intense activité volcanique entraîne un gradient géothermique, c’est-à-dire un taux d’augmentation de la température dans le sous-sol avec la profondeur, atteignant jusqu’à 150°C degrés par kilomètre et permettant au pays d’exploiter grandement cet avantage pour sa production d’électricité [WIKIPEDIA 2022]. En Belgique, en revanche, la température augmente en moyenne de 20 à 30°C tous les kilomètres et on extrait généralement l’énergie grâce à une pompe à chaleur [LEMALE 2015].

2.1.1 Fonctionnement

Il existe plusieurs manières de différencier les types d’exploitations géothermiques. Dans un premier temps, on retrouve des systèmes géothermiques ouverts et fermés. Ceux-ci sont illustrés sur la figure 2.2 [BRUXELLES ENVIRONNEMENT 2020].

Dans le cas d’un système ouvert, on pompe l’eau d’une nappe souterraine afin d’en récupérer la chaleur. L’inverse est aussi possible : pomper de l’eau froide et réinjecter de l’eau chauffée par l’activité humaine. Pour cela, il faut que le débit extractible soit suffisant, que cette extraction n’impacte pas de manière négative la ressource en eau et que la demande en chaud et en froid soit à l’équilibre. De plus, pour être financièrement intéressant, ce type de système est plutôt utilisé dans le cas de bâtiments dont les besoins énergétiques dépassent le cadre d’une habitation unifamiliale [BRUXELLES ENVIRONNEMENT 2020].

Dans le deuxième cas, la chaleur du sol est récupérée via des sondes enterrées, dans lesquelles un fluide caloporteur circule. Le fluide se réchauffe grâce à la chaleur du sous-sol et est refroidi dans la pompe à chaleur lorsqu’il passe son énergie à l’environnement que l’on veut réchauffer. Il s’agit généralement d’un mélange d’eau et d’un produit antigel, comme le glycol. En outre, on retrouve des systèmes fermés verticaux et horizontaux. Cependant, ces

derniers ont un rendement bien moindre que les premiers. Les paramètres importants dans ce type d'installation sont le gradient géothermique, la température du sol et la conductivité du sol [LEMALE 2015].

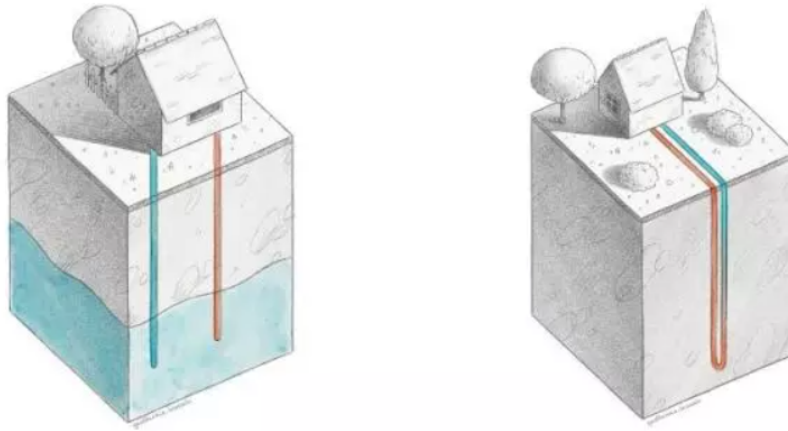


FIGURE 2.2 – Représentation d'un système ouvert à gauche et d'un système fermé à droite [BRUXELLES ENVIRONNEMENT 2020].

Ensuite, on peut également distinguer les différentes applications en fonction de la profondeur de forage. On parle de géothermie à faible profondeur entre 30 et 500m de profondeur. Au-delà de 500m, la géothermie est dite profonde et, à partir de 4km, elle est dite très profonde [LEMALE 2015].

La température d'exploitation et l'énergie de la source liée à cette température sont également des critères de distinction. Les différentes catégories d'utilisations sont présentées dans les sous-sections ci-dessous. Évidemment, les concepts de température et de profondeur sont liés par la notion de gradient géothermique, expliquée précédemment.

Finalement, les caractéristiques sismiques de la zone exploitée sont aussi une manière de séparer les applications géothermiques. On distingue dans ce cas les zones continentales stables qui sont caractérisées par une activité géologique relativement faible et les zones géodynamiques actives qui, au contraire, sont caractérisées par une activité géologique intense due aux interactions entre les plaques tectoniques [VARRET 2011].

2.1.1.1 Géothermie très basse énergie

Ce type de géothermie exploite généralement des sous-sols ou aquifères peu profonds (moins de 100m) dont la température est inférieure à 30°C [SPW s. d.]. La température du sous-sol à cette profondeur dépend alors principalement du rayonnement solaire et de la température de l'air. Dans ce cas, on fait généralement appel à une pompe à chaleur, qui permettra d'atteindre la température suffisante pour une utilisation domestique comme pour le chauffage d'un bâtiment par exemple.

2.1.1.2 Géothermie basse énergie

Grâce à des températures comprises entre 30 et 90°C, la géothermie basse énergie donne la possibilité d'utiliser directement la chaleur sans nécessité de pompe à chaleur. Pour cela, il faut forer un peu plus profondément : de 1 à 3km de profondeur dans nos régions [DOSSIERPOURLASCIENCE.2010].

2.1.1.3 Géothermie moyenne énergie

En Belgique, on peut trouver des fluides en sous-sol, dont la température atteint plus de 90°C. Dans les régions volcaniques on trouve ce type de gisements géothermiques à des profondeurs inférieures à 1500m mais ils se trouvent plutôt à des profondeurs supérieures à 4km pour les bassins sédimentaires [DOSSIERPOURLASCIENCE.FR 2010].

Dès lors, en plus d'une utilisation directe pour le chauffage et certaines activités industrielles, il est possible de produire de l'électricité. Cependant, pour cette utilisation, l'eau ne peut être utilisée directement en raison de sa forte teneur en sels minéraux qui risqueraient de boucher les conduites. Par conséquent, un fluide intermédiaire, dont la température d'ébullition est inférieure à 100°C, est utilisé pour capter la chaleur de l'eau et s'évaporer afin de faire tourner des turbines à vapeur. Après utilisation, l'eau refroidie est renvoyée dans la nappe souterraine pour éviter l'assèchement et prévenir les dommages à l'écosystème [LEMALE 2015].

Malgré leurs avantages, ces installations géothermiques ont une durée de vie limitée (de 30 à 100 ans) car elles entraînent un refroidissement de la roche et de la nappe. Par ailleurs, même si la géothermie est utilisée pour produire de l'électricité, seulement 20 % de l'énergie produite est utilisée à cette fin, tandis que 80 % est utilisée pour le chauffage.

2.1.1.4 Géothermie haute énergie

Au-delà de 150°C, l'eau se présente sous la forme de vapeur «sèche» ou «humide». La vapeur est dite humide si elle contient de l'eau sous forme liquide. Dans ce cas, il faut, entre autres, trouver un moyen de séparer ces deux états car seule la vapeur sèche peut servir à générer de l'électricité dans les turbines [LEMALE 2015].

Cependant, la géothermie haute énergie nécessite trois éléments importants :

- Température $\geq 150^{\circ}\text{C}$
- Présence de fractures (perméabilité suffisante)
- Présence d'eau (débit suffisant)

Plusieurs endroits dans le monde bénéficient de conditions géologiques favorables à ce type de géothermie, notamment en bordure de plaques tectoniques, où les tout premiers sites d'exploitation ont vu le jour. Cependant, la majorité des endroits dans le monde ne bénéficient pas de ces conditions et de nouvelles techniques ont dû être mises en place pour exploiter ces zones moins favorables. Plusieurs approches ont été développées depuis les années 1970, comme la technologie EGS présentée ci-dessous [WIKIPEDIA 2023].

La géothermie haute énergie est considérée comme davantage renouvelable que la géothermie moyenne énergie étant donné le très fort flux thermique rendant l'épuisement de la ressource moins probable.

2.1.1.5 Enhanced Geothermal System

Le concept EGS (*Enhanced Geothermal System*) a été développé au LANL (*Los Alamos National Laboratory*), aux États-Unis, en 1974. Cette technique est utilisée lorsqu'on rencontre une roche dont la température est élevée mais dont la perméabilité ou la saturation en eau est faible [DEPARTMENT OF ENERGY 2012]. Elle consiste à créer de nouvelles fractures dans la roche ou à en élargir des préexistantes afin d'augmenter la perméabilité de la matrice. Pour cela, on injecte un fluide, généralement de l'eau sous pression, jusqu'à création d'un réservoir géothermique. Cette étape est, sans aucun doute, la plus critique car il faut créer le chemin requis pour que le fluide se dirige efficacement du puits d'injection vers le puits de production. En effet, une fois cette phase réalisée, le fluide circule à travers les fractures et transporte la chaleur de la roche. Des puits sont creusés afin de le capter vers la surface où l'électricité sera générée grâce à la vapeur émise. On extrait généralement cette énergie entre 3 et 5 km de profondeur [ROMANOV et LEISS 2022].

D'autres fluides que l'eau peuvent être utilisés comme le CO₂ supercritique, avec différents avantages. Un de ceux-ci est qu'il est possible d'enfermer une partie du CO₂ utilisé dans le sol [ROMANOV et LEISS 2022]. P. Olasolo et al. expliquent également dans leur article [DEPARTMENT OF ENERGY 2012] que l'utilisation de CO₂ permettrait d'avoir un taux de chaleur extraite 50% plus élevé qu'avec de l'eau, avec l'avantage de pouvoir être utilisé efficacement à basse température, contrairement à l'eau.

La technologie EGS a pour avantage qu'elle n'utilise pas beaucoup de surface par rapport à l'énergie produite et qu'elle permet d'élargir le nombre de sites géothermiques exploitables. Néanmoins, il a été observé que, durant la création du réservoir et les phases de stimulation, des zones de roche peuvent glisser le long de fractures préexistantes et provoquer des événements sismiques. L'analyse des données sismiques provenant de diverses stimulations EGS montre qu'une relation claire existe entre l'injection du fluide et la réponse sismique [DEPARTMENT OF ENERGY 2012]. Cet aspect sera développé en détail dans la section 2.2.

2.1.2 Origine du gradient géothermique

Dans les régions non volcaniques, comme en Belgique, le gradient géothermique est principalement lié à la radioactivité que certaines roches émettent naturellement. Parmi celles-ci, on retrouve majoritairement l'uranium, le thorium et le potassium [WIKIPEDIA 2023]. Ces éléments peuvent entrer en contact avec l'eau souterraine et être transportés avec le flux dans des réservoirs géothermiques. Les substances radioactives peuvent alors être ramenées à la surface lorsque l'eau est pompée par la centrale.

Cependant, dans des conditions normales de fonctionnement, l'eau est maintenue en circuit fermé et une fois la chaleur extraite, elle est réinjectée. La chaleur est transférée vers un circuit secondaire voire tertiaire qui ne contiendra aucune eau géothermique [VITO s. d.].

2.1.3 Situation belge

En Belgique, le principal type de géothermie exploitée est la géothermie basse et très basse énergie.

En Flandres, le développement de la géothermie peu profonde a été encouragé par des exigences en termes de performances énergétiques des bâtiments et sur la provenance de cette énergie. Pour ce qui est de la géothermie profonde, le potentiel se concentre dans le bassin de la Campine, dans les réservoirs calcaires datant du Carbonifère [KINSCHER et al. 2022], et aux alentours d'Anvers. Cependant, les forages réalisés dans ces régions ont indiqué que la porosité moyenne, à des profondeurs supérieures à 3500m, était trop faible pour permettre d'extraire des débits d'eau ou de vapeur nécessaires à la production d'électricité [PETITCLERC et VANBRABANT 2011]. Pour pallier ce problème, les systèmes EGS peuvent être employés, même s'ils nécessitent un investissement nettement plus élevé que pour un système traditionnel. Par exemple, pour leur projet d'exploitation géothermique binaire sur le site Balmatt, près de Mol, VITO (Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek) a fait le choix d'employer cette technique. Ce projet sera décrit avec plus de détails dans la section 2.4.

Sur le plan juridique, un décret flamand, en vigueur depuis 2009, a permis de réguler les projets de géothermie forant à plus de 500m de profondeur. Il impose l'obtention de deux permis, un pour l'exploration (valable 5 ans) et un pour la production. Il est également nécessaire de posséder un permis environnemental. Depuis 2018, il existe aussi un système d'assurance pour prévenir des risques géologiques et ainsi encourager les investissements dans les projets géothermiques [LAGROU et al. 2019].

En Wallonie, les puits Saint-Ghislain et Douvrain produisent de l'eau chaude pour les réseaux de chaleur depuis 1985 [SPW s. d.]. Malheureusement, contrairement à celui de la Flandres, le sous-sol wallon est mal connu en profondeur car très peu de forages profonds ont été réalisés à ce jour. Cependant, depuis quelques années, la tendance s'inverse. En effet, la Wallonie a mis en place, en 2010, un appel d'offres public pour cartographier le potentiel de la géothermie profonde dans cette région. Cette étude a été réalisée par le Service Géologique de Belgique, en collaboration avec l'ULg et le bureau d'études géologique VS Geoforma, spécialisé dans les forages [PETITCLERC et VANBRABANT 2011]. Leur travail a permis la création de la carte suivante (Figure 2.3) :

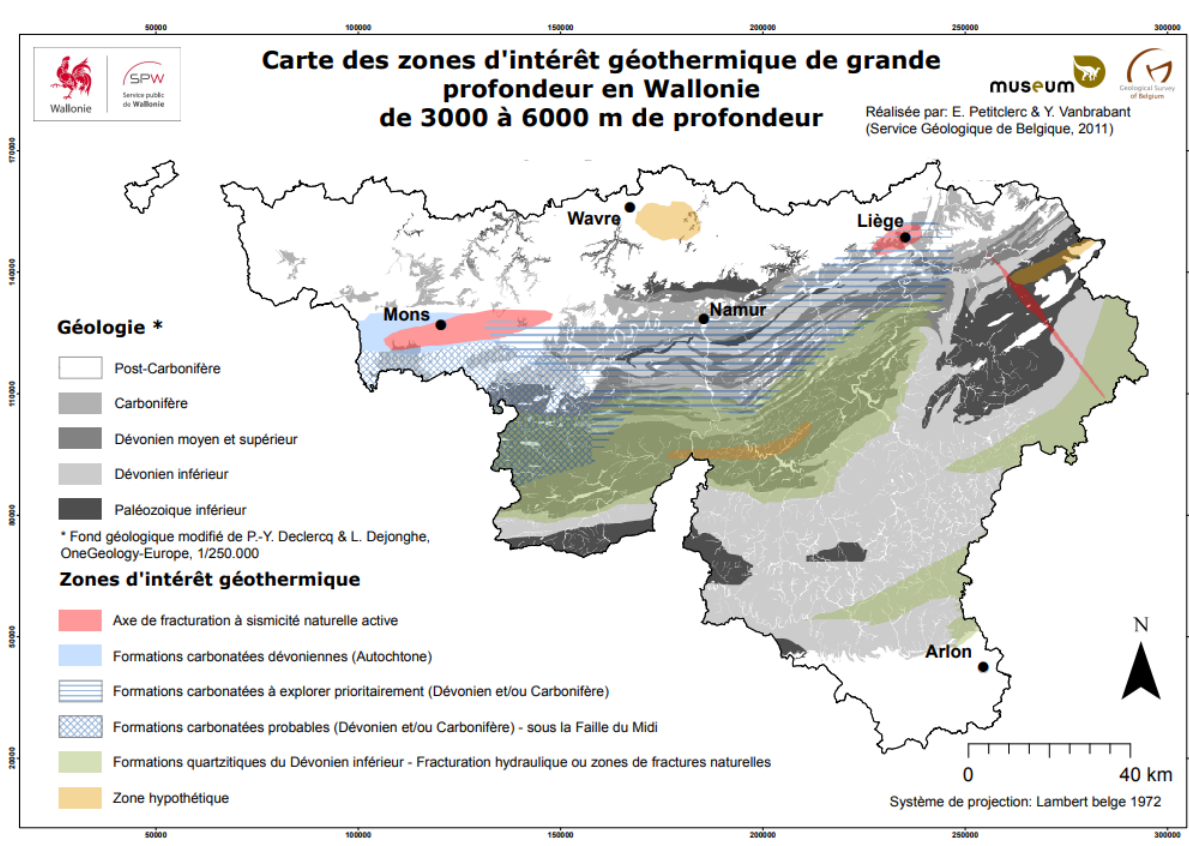


FIGURE 2.3 – Carte des zones d'intérêt géothermique de grande profondeur en Wallonie de 3000m à 6000m de profondeur [PETITCLERC et VANBRABANT 2011].

D'après leurs observations, le potentiel de géothermie profonde serait concentré principalement dans le Bassin Montois. D'autres études plus récentes ont été réalisées ou sont encore en cours de réalisation.

À Bruxelles, la croissance du secteur s'est accélérée suite l'obligation, depuis 2015, de ne plus construire que des bâtiments passifs, c'est-à-dire, ne dépassant pas une demande en chauffage de 15 kWh/m^2 [DALLA LONGA et al. 2020]. On y retrouve notamment des installations ouvertes, sur le site de Tour&Taxis, pour les bâtiments de la Gare Maritime, de Bruxelles Environnement et de l'administration flamande.

Cependant, un permis d'environnement y est aussi nécessaire pour pouvoir mettre en œuvre un système géothermique, que ce soit pour un système fermé ou un système ouvert. Dans ce dernier cas, le processus est un peu plus long à cause de la nécessité, notamment, d'évaluer la pollution de la nappe phréatique et la faisabilité hydrogéologique du projet [BRUXELLES ENVIRONNEMENT 2020].

Pour faciliter le développement de ces projets, l'outil Brugeo a été créé. Il cartographie les sous-sols de Bruxelles afin de permettre aux entrepreneurs d'obtenir des informations sur la profondeur des différentes couches géologiques ainsi que les caractéristiques thermiques et hydrogéologiques de celles-ci.

La carte ci-dessous (2.4) résume les différents sites exploités par le passé ou encore en usage en Belgique en 2016 avec les zones de potentiels géothermiques entre 300 et 3000 m de profondeur [REINOUT VERBEKE 2016] :

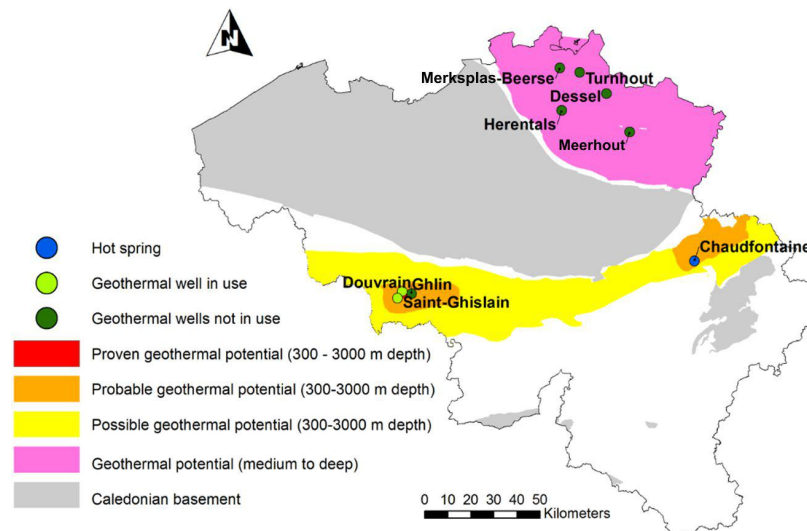


FIGURE 2.4 – Carte du potentiel géothermique (de profondeur moyenne à grande) et des puits géothermiques (naturels) en Belgique [REINOUT VERBEKE 2016]. Le terme "Hot spring" désigne un endroit où l'eau, chauffée par l'activité géothermique, jaillit naturellement du sol.

2.1.4 Les freins au développement de la géothermie

Pourtant connue depuis bien longtemps, la géothermie peine à se faire une place dans le mix énergétique mondial et à se faire connaître du grand public. Cette section présente une liste non exhaustive des différents obstacles auxquels les entrepreneurs de projets géothermiques doivent faire face. On retrouve par exemple des limitations techniques, des freins liés aux aspects économiques et financiers ainsi que des aspects juridiques et d'acceptation sociale.

Les auteurs de [DALLA LONGA et al. 2020] estiment malgré tout que, d'ici 2050, la production d'électricité à partir d'énergie géothermique pourrait représenter entre 4 à 7 % de la production totale en Europe. Son caractère non-intermittent, peu polluant et omniprésent permettrait de convaincre de nombreux pays d'investir dans cette énergie.

2.1.4.1 Limitations techniques

Dans le cas de la géothermie à grande profondeur, il s'agit de forer des puits pour rejoindre des couches chaudes du sol afin d'y injecter de l'eau (lorsqu'elle n'est pas présente naturellement) et d'en récupérer l'énergie. La technologie pour le forage ressemble à celle utilisée pour les puits de pétrole. Cependant, cette géothermie demande de forer à des profondeurs de 3000 à 10000 m contrairement à l'industrie pétrolière qui reste généralement entre 2000 et 4000 m. Ces grandes profondeurs impliquent d'avoir des roches de plus en plus dures ce qui use plus rapidement la mèche de forage [Le chauffage par géothermie : avantages et inconvénients s. d.].

À cela s'ajoute la chaleur de la roche, additionnée à la chaleur produite par la friction de la mèche. Cela demande donc d'avoir des alliages spéciaux qui sont coûteux. De plus, les fluides libérés par le forage peuvent être corrosifs pour le métal ainsi que pour le béton qui est coulé afin de stabiliser le puits. En outre, il existe un risque important lié aux incertitudes géologiques. En effet, la géothermie grande profondeur, et particulièrement la méthode EGS, demande d'avoir une bonne connaissance du sol, de sa nature, de l'orientation de ses fissures ainsi que de la quantité de tension tectonique préalablement accumulée [Géothermie profonde sur l'Eurométropole de Strasbourg / Strasbourg.eu s. d.].

2.1.4.2 Aspects économiques et financiers

Un des principaux freins à la géothermie est le coût élevé de l'investissement initial, que ce soit pour une installation chez un particulier ou un projet de géothermie profonde.

Dans le premier cas, ce coût peut varier entre 14 000 et 25 000 euros en fonction du système utilisé, de la puissance et du coefficient de performance de la pompe à chaleur choisie, ainsi que de la nature du terrain [SYLVAIN ZAFFINI 2023]. En plus, pour les capteurs horizontaux, cela nécessite une grande surface de terrain. Enfin, comme expliqué dans la section précédente et principalement dans le cas de systèmes géothermiques ouverts, la législation est stricte et impose une surveillance régulière de ces installations.

Dans le deuxième cas, ces coûts peuvent représenter entre 20 et 25 % du coût total du projet pour une centrale électrique et plus de 50 % dans le cas d'une centrale thermique [ROMANOV et LEISS 2022]. Il existe aussi un risque important lié aux incertitudes géologiques. A titre informatif, on estime que pour une centrale de 20MW, il faudra compter entre 20 et 30 millions d'euros pour la phase de forage initiale et pour la vérification de l'état du réservoir géothermique, ainsi que 30 millions d'euros pour le forage en lui-même. On ajoute ensuite le prix de la centrale qui peut varier entre 30 et 60 millions d'euros [BOMBARDA et GAIA 2017].

Pour contrer le problème du coût élevé des forages, D. Romanov et B. Leiss expliquent qu'il serait possible de transformer des puits anciennement utilisés pour l'extraction de pétrole ou de gaz [ROMANOV et LEISS 2022].

En outre, il existe également des problèmes liés aux opérations en elles-mêmes. En effet, selon Frash L. et al [FRASH et al. 2023], les protocoles mis en place pour prévenir la sismicité induite par les projets EGS mènent à des débits d'injection trop faibles pour une production économiquement viable. La sismicité induite, dans le cadre de la géothermie, fait référence aux tremblements de terre provoqués par des activités humaines liées à cette exploitation géothermique. La section 2.2 décrira ce sujet en détail.

Finalement, l'injection d'un fluide froid près de zones de rupture peut entraîner, à terme, un *thermal breakthrough* prématurée, c'est-à-dire, une diminution de la pression et de la température du fluide dans le réservoir. Lorsque ce phénomène se produit, la capacité de production de la centrale géothermique s'en trouve évidemment réduite [FRASH et al. 2023]. Cet épuisement de chaleur peut également se produire lorsque le rythme d'exploitation de la

géothermie est supérieur au rythme de renouvellement naturel de la chaleur. Le caractère in-épuisable donc durable de la ressource dépend ainsi des conditions d'utilisation [WIKIPEDIA 2023].

2.1.4.3 Aspects juridiques et acceptation sociale

Il existe un défi réel concernant le cadre juridique à adopter quant à l'exploitation de la géothermie. En effet, ce cadre doit permettre une mise en œuvre relativement accessible de la technologie tout en limitant les incidences négatives possibles et en contrôlant l'application de la législation. Une juridiction incomplète ou obsolète freine les procédures préalables aux projets et donc les investissements [PETITCLERC et VANBRABANT 2011].

L'acceptation sociale est également un facteur à prendre en compte surtout pour les projets EGS, car cela peut entraver voire faire annuler un projet. La sismicité induite est une des causes principales de cette mauvaise acceptation car elle peut, dans les cas les plus remarquables, engendrer des dégâts importants [ROMANOV et LEISS 2022]. D'autant plus, que ces événements sismiques, causés par l'injection d'eau sous pression dans le sous-sol, peuvent continuer à survenir un certain temps après l'arrêt de cette injection. Il est alors important d'inclure la population dans les conversations autour de la géothermie en général, mais également autour des projets concrets. Un discours transparent et clair permettrait de faire connaître aux habitants concernés, les avantages que ces projets peuvent leur apporter tout en étant honnête sur les potentielles nuisances. Le projet de Soultz-sous-Forêts, en France, pour lequel l'exploration a débuté en 1989, est un bon exemple de communication qui a porté ses fruits [PETITCLERC et VANBRABANT 2011].

2.2 La sismicité induite

La sismicité induite se réfère à une sismicité provoquée par l'activité humaine qui modifie l'état de contraintes et de déformations du sous-sol [BOURNE, OATES et ELK 2018]. Ces événements sont, notamment, causés par des activités telles que l'extraction de gaz et de pétrole, le stockage de CO₂, l'exploitation minière et les projets géothermiques. Par exemple, ces dernières années, la région du Midwest des Etats-Unis a connu une augmentation de l'activité sismique, principalement due à l'injection d'eaux usées à grand volume dans des formations profondes [Induced seismicity - Wikipedia s. d.]. Ces séismes sont généralement de faible magnitude et localisés mais, s'ils se réalisent à proximité d'une faille susceptible d'être activée, ils peuvent perturber la stabilité de cette dernière et entraîner des catastrophes.

Un des séismes les plus importants imputé à l'activité humaine s'est produit en Chine, à Wenchuan, en 2008, et était d'une magnitude de M7,9 [1]. De telles magnitudes peuvent causer de nombreux dégâts matériels et mettre en danger la vie des personnes vivant à proximité.

Dans un contexte où l'utilisation des sous-sols à des fins énergétiques devrait s'intensifier dans les décennies à venir, principalement portée par des applications liées à la transition énergétique, et à des profondeurs de plus en plus importantes, la question de la sismicité induite est devenue primordiale dans la planification et le développement de tout projet d'énergie géothermique profonde. Il s'agit d'un sujet crucial pour anticiper et gérer les risques potentiels associés à ces activités.

2.2.1 Régimes tectoniques

Les failles sont des fractures présentes dans la croûte terrestre, le long desquelles des mouvements peuvent se produire. Celles-ci peuvent être massives (les frontières entre les plaques tectoniques elles-mêmes) ou très petites. Lorsqu'une tension s'accumule le long d'une faille puis est brusquement relâchée, cela entraîne un tremblement de terre [Faults and Fractures (U.S. National Park Service) s. d.].

Ces failles sont classifiées en fonction du mouvement de la roche par rapport aux failles elles-mêmes et de la relation d'ordre entre les contraintes principales σ_v (la contrainte verticale), σ_H (la contrainte horizontale maximale) et σ_h (la contrainte horizontale minimale) qui s'exercent sur elles [MAZUYER 2018]. On retrouve dès lors différents régimes tectoniques qui sont illustrés à la Figure 2.5 :

- Failles normales : $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$
- Failles inverses : $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$
- Failles décrochantes : $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$

2.2.2 Mécanismes de déclenchement

Le déclenchement de la sismicité induite dépend de l'état de contraintes du milieu. Dans la théorie de la poroélasticité, développée par Terzaghi et Biot, on considère un matériau poreux saturé ou partiellement saturé en fluide. Dans cette théorie, on considère des contraintes effectives qui sont déterminées grâce à la relation suivante :

$$\sigma' = \sigma - \alpha_B P_f \quad (2.1)$$

où la contrainte effective σ' y est déterminée en soustrayant la pression interstitielle P_f (ou pression de pore), multipliée par le coefficient de Biot α_B , de la contrainte totale σ exercée

1. L'unité de mesure couramment utilisée pour décrire la magnitude d'un séisme est la magnitude du moment notée Mw ou M. Cette magnitude est directement liée à l'énergie émise par le tremblement de terre. Une augmentation d'une unité de magnitude de moment correspond à une multiplication par environ 31 de l'énergie libérée. À titre de comparaison, un Mw de 4 équivaut à l'explosion de 15 tonnes de TNT [Magnitude de moment — Wikipédia s. d.]. Il est important de noter que la magnitude et l'intensité sont des grandeurs différentes. En effet, l'intensité est, plutôt une mesure des dommages causés par un séisme et varie donc en fonction de l'endroit où l'observateur se trouve [Magnitude (sismologie) — Wikipédia s. d.], [KLOSE 2012]

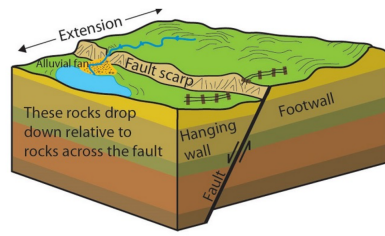


Diagram of normal faulting.
Teresa L. Thornberry-Ehrlich, Colorado State University

(a) Failles normales.

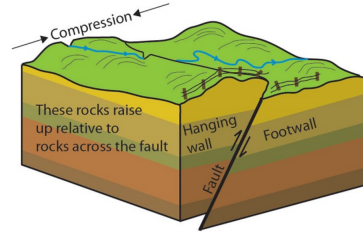


Diagram of thrust fault.
Teresa L. Thornberry-Ehrlich, Colorado State University

(b) Failles inverses.

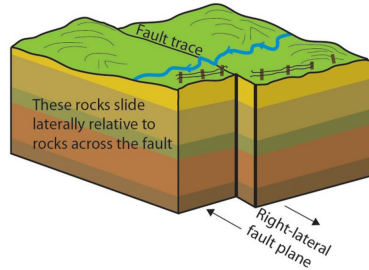


Diagram of strike-slip faulting.
Teresa L. Thornberry-Ehrlich, Colorado State University

(c) Failles décrochantes.

FIGURE 2.5 – Régimes tectoniques [Faults and Fractures (U.S. National Park Service) s. d.].

sur la roche. La pression interstitielle est liée à la pression de fluide dans les pores du matériau.

Un changement de la contrainte totale (un poids supplémentaire en surface comme un barrage par exemple) ou un changement de la pression interstitielle (une augmentation suite à l'injection de fluide par exemple) modifie donc l'état de contraintes.

Des changements importants de ce dernier peuvent entraîner un mouvement soudain le long de la faille ou de la fracture, pouvant provoquer un tremblement de terre. Les événements sismiques induits par les réservoirs d'eau peuvent être relativement importants par rapport à d'autres formes de sismicité induite [Induced seismicity - Wikipedia s. d.].

Pour modéliser la rupture (ou, dans ce cas ci, le glissement de la faille), on utilise un critère de rupture. De nombreux existent et certains sont présentés à la section 2.2.3.1. Les critères de rupture peuvent être représentés dans le plan de Mohr-Coulomb. Ce dernier illustre l'état de contraintes en fonction de l'inclinaison d'un élément de contrainte en deux dimensions (contraintes appliquées dans un plan du matériau). En effet, si on considère un petit élément à l'intérieur du matériau, celui-ci est soumis à des contraintes normales et des contraintes tangentielles. Selon l'orientation de ce petit élément, les contraintes normales σ et tangentielles τ vont changer. Ce changement est alors décrit dans le plan de Mohr-Coulomb. Ce dernier a pour axe horizontal, l'amplitude des contraintes normales et pour axe vertical, l'amplitude des contraintes de cisaillement.

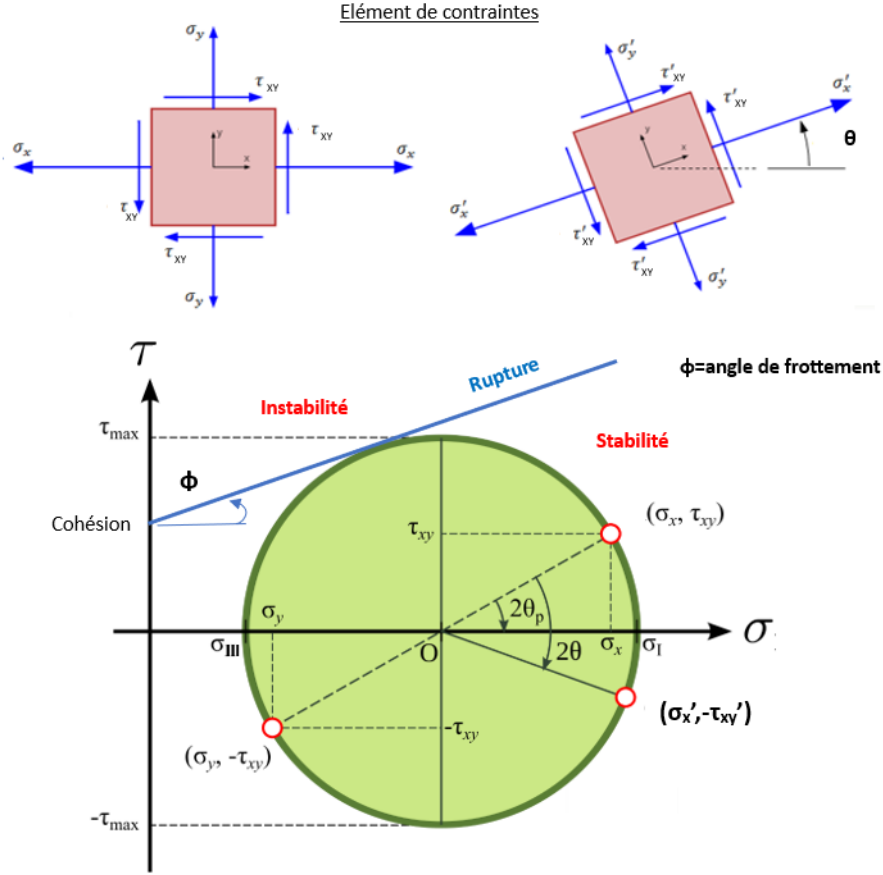


FIGURE 2.6 – Cercle de Mohr *[Exploitation et propriétés d'un réservoir : de l'étude pétro-physique à la facturation hydraulique - Pression et fracturation s. d.]*

σ_1 et σ_3 correspondent aux contraintes principales maximales et minimales (le cisaillement est nul pour cette orientation). La droite bleue représente, quant à elle, le critère de Mohr Coulomb qui sépare la zone d'instabilité et la zone de stabilité. .

Si le cercle se trouve dans la zone d'instabilité, la rupture se produit.

2.2.2.1 Cas de la géothermie

Dans le cas de la géothermie, c'est l'injection de fluide dans le sol qui provoque la sismicité induite et plusieurs mécanismes liés à cette injection peuvent perturber l'état des contraintes sur une faille. L'un des mécanismes prédominants est la diffusion de la pression de pore (ou pression interstitielle) autour du point d'injection. En effet, comme expliqué précédemment, l'augmentation de cette pression interstitielle réduit la contrainte effective dans la roche et le cercle de Mohr se rapproche de la droite séparant la zone de stabilité de la zone d'instabilité sur la Figure 2.6. Lorsque cela se produit près d'une faille proche de la contrainte critique, cela provoque aussi une augmentation de la contrainte de cisaillement sur la faille. Si la résistance au cisaillement est dépassée, cela peut induire un glissement sur la faille et, potentiellement, déclencher de la sismicité [HEEGE 2022].

Lors de l'injection de fluide, la roche subira également une dilatation, c'est-à-dire une déformation volumétrique. Cette dilatation provoque des changements des contraintes poro-élastiques dans la roche, qui dépendent des changements de pression interstitielle, de la géométrie de la masse rocheuse et des paramètres élastiques de la roche [HEEGE 2022]. Bien que l'on estime que l'ampleur de ces changements de contraintes ne représente généralement qu'environ un dixième de celle de la diffusion de la pression interstitielle, la prise en compte de la poro-élasticité est souvent nécessaire pour expliquer de manière complète, dans le temps et l'espace, la sismicité observée [JAMES KIM et AVOUAC 2023]. I. Yeo et al. évoquent le fait que la sismicité à grande distance du puits d'injection peut être expliquée par ces changements de contraintes poro-élastiques, car ce mécanisme n'évolue pas de la même manière que la pression de pore avec la distance par rapport au puits d'injection [YEO et al. 2020].

Ces contraintes poro-élastiques sont combinées à des contraintes thermo-élastiques provoquées par le refroidissement (contraction) ou le réchauffement (expansion) de la roche lors de l'injection. Les amplitudes des contraintes thermiques peuvent être importantes et comparables aux changements de contraintes poro-élastiques. De plus, au voisinage d'un puits d'injection, les changements de contraintes thermiques peuvent être significatifs et dépasser largement les changements de pression interstitielle [HEEGE 2022].

On retrouve également des mécanismes de transfert de contraintes d'une faille à une autre ou d'un segment de faille à un autre. Ces mécanismes comprennent le transfert des contraintes de cisaillement et les glissements asismiques [HEEGE 2022]. Le glissement asismique est défini dans la section suivante.

2.2.2.2 Glissements asismiques

Dans un contexte sismique, les surfaces de la faille sont généralement bloquées et accumulent progressivement une tension due au déplacement des surfaces l'une par rapport à l'autre. La roche résiste à cette tension via sa résistance au frottement au niveau de la faille et se comporte comme un ressort que l'on comprime, se déformant tandis que l'énergie élastique s'accumule au fil du temps. Si cette tension s'accroît jusqu'à atteindre un seuil critique, alors elle est soudainement libérée sous forme d'un séisme (voir Figure 2.7). Ce type de glissement est caractérisé par un mouvement rapide et saccadé, générant des ondes sismiques perceptibles. A la fin du séisme, la zone de contact se bloque à nouveau, et l'énergie recommence à s'accumuler pour amorcer un nouveau cycle sismique [Les Séismes - Type séisme s. d.].

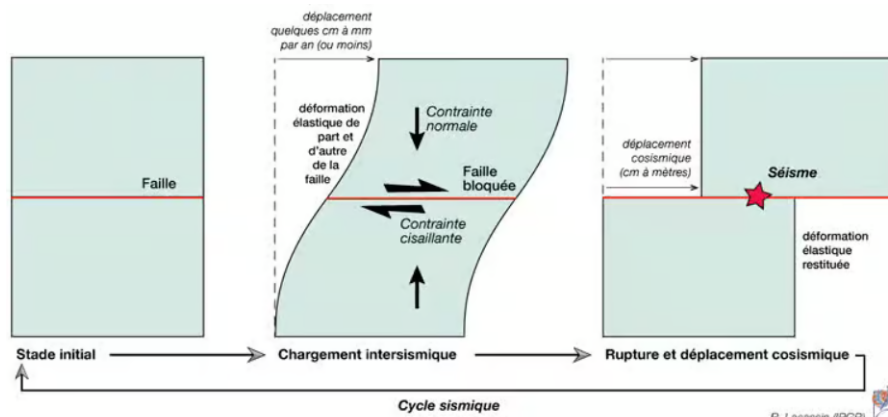


FIGURE 2.7 – Cycle sismique [Séisme classique, séisme lent : quelles différences ? s. d.].

Cependant, il arrive parfois que la transition vers un régime de glissement asismique se produise. Dans ce cas, les surfaces de la faille continuent de se déplacer, mais de manière beaucoup plus lente et progressive, sans générer de séismes majeurs. Le mouvement est essentiellement silencieux sur le plan sismique. Cette transition peut être influencée par différents facteurs. Par exemple, une diminution de la contrainte sur la faille, une augmentation de la température ou l'ajout de fluides tels que l'eau peuvent réduire la résistance au frottement entre les surfaces, favorisant ainsi un glissement asismique [Aseismic creep - Wikipedia s. d.]. De plus, des caractéristiques géométriques spécifiques de la faille peuvent également faciliter ce type de glissement.

Deux types de glissement asismiques ont été identifiés [Relations entre séismes et glissements asismiques s. d.]. D'une part, il y a les épisodes de séismes lents qui surviennent pendant la phase de chargement des failles, connue sous le nom de phase intersismique. Ces séismes lents proviennent généralement de failles qui ne produisent pas tremblements de terres et se déclenchent spontanément, sans qu'un processus déclencheur clair ne soit identifié. Ils se caractérisent par une accélération puis une décélération progressive du glissement le long de la faille, parfois accompagnée d'essaims de petits séismes.

D'autre part, on observe des glissements asismiques immédiatement après des séismes importants. Ces glissements sont déclenchés par le séisme lui-même et présentent une décroissance de la vitesse de glissement au cours du temps. La taille de ces glissements dépend de l'ampleur du séisme initial.

Ce type de glissement peut donc, dans certains cas, expliquer la sismicité tardive post-injection, durant laquelle une accumulation de contraintes peut se produire sur des segments de failles adjacents [KINSCHER et al. 2022]. En d'autres termes, lorsque les roches glissent lentement et s'adaptent aux contraintes, elles peuvent générer des contraintes supplémentaires sur les parties de la faille qui sont encore «verrouillées» ou «sismiquement stables». Au fil du temps, cette accumulation de contrainte peut atteindre un niveau critique où la résistance au glissement est surmontée et la faille se déverrouille brusquement. Cela peut déclencher un glissement sismique, générant ainsi des tremblements de terre. Ce processus est connu sous le nom de «glissement sismique différé» ou «sismicité post-injection».

2.2.3 Lois de frottement et critères de rupture

2.2.3.1 Critère de Mohr Coulomb

Il existe plusieurs lois de frottement qui décrivent mathématiquement les forces de résistance qui s'opposent au mouvement relatif entre deux surfaces en contact et qui sont utilisées pour expliquer des phénomènes sismiques. Elles ont généralement en commun la proportionnalité entre la charge pressant les surfaces ensemble et les forces de frottement. De plus, elles dépendent souvent d'un coefficient de frottement qui quantifie la rugosité et l'adhérence entre les surfaces.

Une des lois les plus couramment rencontrées est la loi de Coulomb. Cette loi simple stipule que la contrainte de cisaillement τ entre deux surfaces est proportionnelle à la contrainte normale effective σ_{eff} :

$$\mu_{s/d} = \frac{\tau}{\sigma_{eff}} \quad (2.2)$$

avec μ le coefficient de frottement. Ce coefficient est différent que l'on soit au repos (statique) ou en mouvement (dynamique). La transition entre ces deux états est considérée comme instantanée (ce qui fait apparaître des singularités au front de rupture) et le glissement est initié lorsque τ dépasse la résistance au glissement de la surface, égale à $\mu_d \sigma_{eff}$ (voir Figure 2.8).

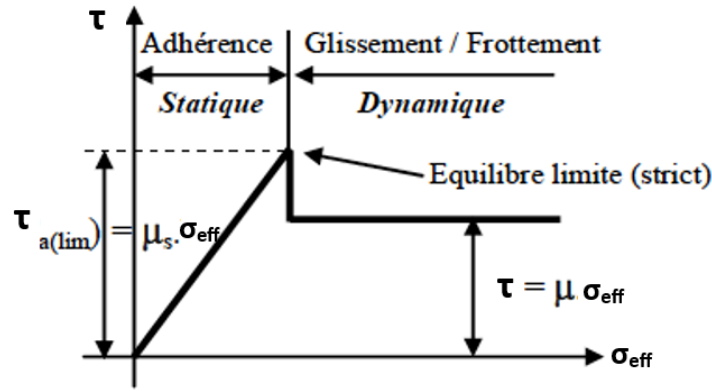


FIGURE 2.8 – Force de frottement en fonction de la force normale [1.3.2 Lois du frottement "sec" (lois de Coulomb) / Physique s. d.]

Dans le cadre de ce mémoire, le critère de rupture de Mohr-Coulomb sera utilisé pour déterminer les zones d'instabilité. Il s'agit d'une généralisation de la loi de Coulomb, expliquée ci-dessus, qui tient compte de la cohésion c de la roche :

$$\tau > \tau_f = \tan(\phi) \sigma_{eff} + c \quad (2.3)$$

avec τ , la résistance au cisaillement et ϕ , l'angle de friction. En trois dimensions, le critère s'écrit :

$$\begin{cases} \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_2)}{2} \sin(\phi') + c' \cos(\phi') - \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_2)}{2} = MC_1 \\ \frac{(\sigma'_2 + \sigma'_3)}{2} \sin(\phi') + c' \cos(\phi') - \frac{(\sigma'_2 - \sigma'_3)}{2} = MC_2 \\ \frac{(\sigma'_3 + \sigma'_1)}{2} \sin(\phi') + c' \cos(\phi') - \frac{(\sigma'_3 - \sigma'_1)}{2} = MC_3 \end{cases}$$

Si le critère MC est positif, alors la roche a atteint la rupture ou, dans le cas d'une faille, le glissement est initié. Dans le cas du réservoir de Balmatt, $\sigma'_3 < \sigma'_2 < \sigma'_1$ et ce sera donc le dernier critère, $MC = \max(MC_1, MC_2, MC_3) = MC_3$, qui sera pris en compte.

2.2.3.2 La loi de rate-and-state

Afin de tenir compte de mécanismes sismiques plus complexes et des conditions de frottement spécifiques, telles que le type de frottement ou la nature des surfaces en contact, d'autres lois existent, en dehors de la loi de Coulomb. Dans cette section nous abordons la loi de *rate-and-state*, fréquemment référencée dans la littérature traitant de la sismicité. Cette loi permet, entre autres, de caractériser les mouvements de glissement sismiques et asismiques, discutés précédemment dans ce document [HEEGE 2022]. Elle peut également expliquer le frottement entre les failles en mouvement et décrit comment la force de frottement entre deux surfaces évolue en fonction de leur mouvement relatif et des conditions de leur contact. Selon cette loi, le comportement du frottement est influencé par deux facteurs principaux : la vitesse de glissement et l'état de l'interface entre les surfaces, c'est-à-dire, ses propriétés physiques et chimiques. Cet état peut changer au fil du temps en raison de différents facteurs tels que les contraintes, la température et la présence de fluides. Cette loi suggère également que la résistance au frottement éprouvée lorsque les surfaces glissent l'une sur l'autre n'est pas uniquement déterminée par leur mouvement actuel, mais aussi influencée par leur mouvement passé. Elle prend en compte une quantité appelée variable d'état, qui représente l'état interne de l'interface et qui évolue au fil du temps. Ainsi, la résistance au frottement, et donc le coefficient de frottement, dépend non seulement de la vitesse à laquelle les surfaces se déplacent, mais aussi de leur historique de mouvement [THOMAS, BHAT et BHAT LOI 2023].

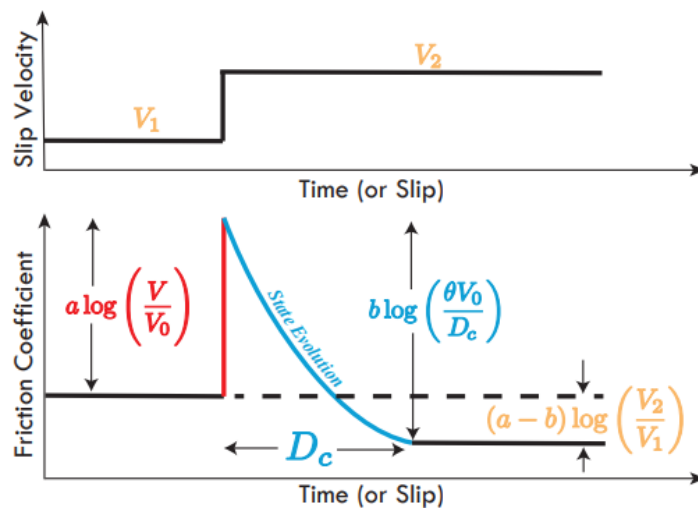


FIGURE 2.9 – Illustration de la loi rate-and-state [THOMAS, BHAT et BHAT LOI 2023].

La Figure 2.9 montre l'évolution du coefficient de friction lorsque la vitesse de glissement augmente. Celui-ci diminue et passe de μ_s à μ_d sur une distance critique D_c . θ est la variable d'état tandis que a et b sont des paramètres d'état.

Dans le contexte de la sismicité induite, le frottement *rate-and-state* a été appliqué pour expliquer certaines caractéristiques non linéaires. En effet, certains mécanismes peuvent se déclencher de manière inattendue après l'arrêt de l'injection, se situer à plusieurs dizaines de kilomètres des sites d'opération ou être décalé verticalement jusqu'à plusieurs kilomètres du point d'injection/de production [KIVI et al. 2023]. James T. et al soulignent que l'activation d'une faille par une augmentation de la pression interstitielle n'implique pas nécessairement un glissement sismique et que, selon la loi *rate-and-state*, la sismicité se produit en dehors des zones de haute pression interstitielle [JAMES KIM et AVOUAC 2023].

2.2.3.3 Effet Kaiser

On observe également qu'au cours de stimulations successives, la sismicité n'est parfois induite que là où le niveau maximum précédent de changements de contrainte de Coulomb a été dépassé. Cet effet est communément appelé effet Kaiser. La façon dont le matériau se «souvient» de son historique de chargement s'est avérée essentielle pour reproduire diverses observations en sismicité induite, telles que les retards du taux de sismicité en réponse aux perturbations du débit d'injection [JAMES KIM et AVOUAC 2023].

2.2.4 Solutions

Pour réduire les problèmes de sismicité induite, plusieurs solutions existent. En plus des solutions évidentes, qui ont le désavantage de diminuer le rendement, telles que la réduction du débit d'entrée ou des forages moins profonds, cette section présente deux autres approches intéressantes.

La première se concentre sur le placement de plusieurs puits d'extractions. Frash L. Et al. proposent une approche particulière pour réduire les problèmes liés à la technologie EGS dans plusieurs conférences [FRASH et al. 2023]. Ils présentent un système avec plusieurs puits (voir Figure 2.10) qui utilise :

- Une répartition homogène du fluide dans plusieurs zones stimulables
- Un *fracture caging* pour limiter le volume de roche stimulée et contrôler le risque de sismicité induite (voir Figure 2.10)
- Un maintien des fractures par injection à haute pression
- Un système qui permet de gérer la réduction d'enthalpie du puits de production avec le temps

Cette idée ressemble à ce que K. W. Chang et H. Yoon [CHANG et YOON 2021] ont étudié dans leur papier. Cependant, ils soulignent que l'installation de plusieurs puits peut parfois accentuer plutôt que diminuer la sismicité induite en fonction des paramètres opérationnels (nombre et placements des puits, débit de pompage, etc). Cette solution a donc besoin de plus de recherche avant d'être déployée.

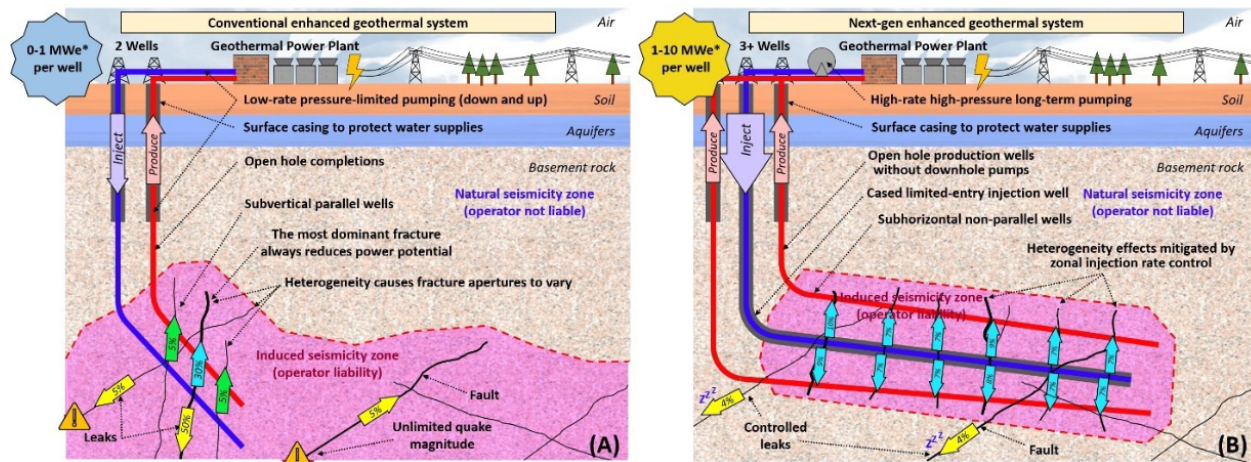


FIGURE 2.10 – Le concept EGS contemporain et historique avec deux puits forés séquentiellement par rapport à la proposition de concept EGS multipuits [FRASH et al. 2023].

La deuxième approche se concentre sur la gestion du fluide injecté lors de la phase de stimulation du réservoir [ZANG et al. 2019]. Pour la fracturation hydraulique conventionnelle, l'injection du fluide se fait de manière monotone et à haute pression. A. Zang et al. ont examiné différents modes d'injection à court terme, tels que des injections cycliques, progressives ou pulsées, dans des puits traversant des formations rocheuses granitiques. Grâce à ce type d'injection, des fractures de fatigue vont se créer et leur propagation peut être contrôlée.

L'idée clé derrière cette méthode est que les fractures qui se propagent à travers une roche déjà fragilisée par la fatigue emmagasine moins d'énergie, donc génèrent moins d'activité sismique. Les cycles d'injection ont démontré que l'efficacité sismique diminue à mesure que le nombre de cycles de fatigue et l'énergie hydraulique injectée cumulée dans la roche augmentent.

Grâce à cette méthode, les auteurs concluent en plus que :

- Les injections cycliques améliorent de manière constante les performances hydrauliques du système. La combinaison de méthodes d'injection cyclique, progressive et pulsée a donné les meilleures performances en termes de perméabilité.
- Les injections cycliques ont tendance à systématiquement réduire l'ampleur des séismes induits les plus importants.
- Les injections cycliques semblent favoriser le développement de fractures sur une zone plus étendue.

Toutefois, bien que la fracturation hydraulique par fatigue semble prometteuse, les auteurs soulignent la nécessité d'approfondir la recherche en confirmant ces résultats sur d'autres puits comportant d'autres types de roches, tout en déterminant les paramètres optimaux. De plus, l'influence à long terme doit être évaluée.

2.3 Thermal breakthrough

Le *thermal breakthrough*, comme abordé brièvement dans la section [2.1.4](#), constitue un de principaux points d'attention des projets de géothermie EGS. Ce phénomène se produit lorsque l'eau chaude est extraite trop rapidement du réservoir et/ou que l'eau réinjectée a une température trop basse, entraînant la diminution de pression et de température du fluide dans ce réservoir [FADEL et al. [2022](#)].

La ré-injection de l'eau utilisée dans le réservoir, et donc la création d'un doublet géothermique (puits de production et puits d'injection), permet de maintenir sa pression. Cependant, une zone d'eau refroidie se crée autour du puits d'injection et peut grandir avec le temps. Le front d'eau froide peut alors atteindre le puits de production et poser un risque important pour la rentabilité des installations géothermiques. Le moment où la température de l'eau produite commence à baisser définit le début du *thermal breakthrough* [FADEL et al. [2022](#)].

Dans les zones avec des réservoirs à très haute enthalpie, le problème peut être résolu en adoptant des stratégies de ré-injection plus souples et en laissant le réservoir se réchauffer. Pour les milieux sédimentaires par contre, la gestion de ce phénomène sera plus difficile car il faudrait beaucoup plus de temps au réservoir pour retrouver son état initial [FADEL et al. [2022](#)].

2.4 Le projet Balmatt

Le *Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek* (VITO) est un organisme flamand indépendant de recherche dans les secteurs du développement durable et des technologies dites «propres »[WIKIPEDIA [2021](#)]. Il a lancé en 2011, son premier projet de production d'électricité par géothermie profonde à Mol, situé dans le nord de la Belgique (voir [2.11](#)).

En 2015, l'exploration a commencé avec le forage de 3 puits de plus de 3000m de profondeur. Le premier puits, que Jannes L. Kinscher et al. nomment Mol-GT-01, a été foré à 3175m TVD (True Vertical Depth) et a atteint la faille Beringen représentée sur la Figure [2.11](#). Sa productivité était de 4 à 5 m³/h/bar et sa température atteignait 128°C. Le second puits Mol-GT-02 a été foré pour l'injection et atteignait 3830m TVD. Ce puits, dévié vers le Nord-Est, atteint une zone du réservoir qui était supposée ne pas être influencée par les failles environnantes. Enfin, le 3e puits Mol-GT-03 a été foré à 4200m TVD et dévié vers le sud-ouest pour atteindre la même zone de failles que Mol-GT-01. Initialement, il était prévu comme puits de production mais sa productivité s'étant révélée trop basse, il n'a pas été utilisé à cet effet [KINSCHER et al. [2022](#)]. La Figure [2.12](#) illustre ces puits et les différentes couches géologiques qu'ils traversent [BREUSEGEM [2021](#)].

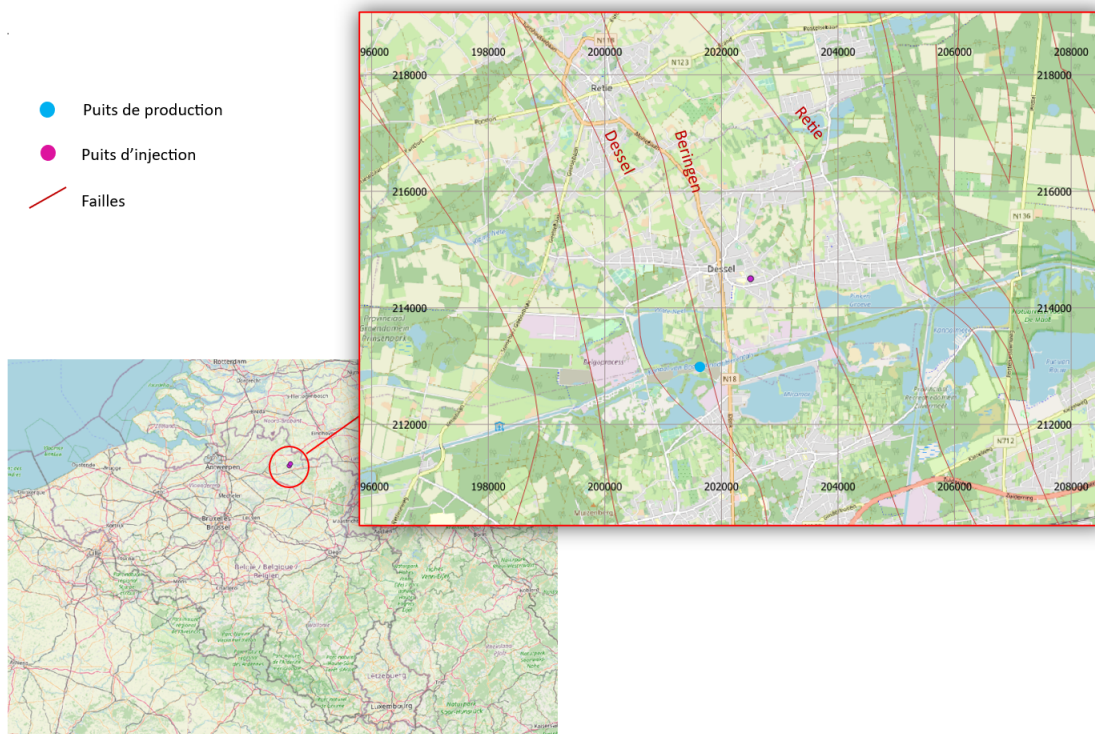


FIGURE 2.11 – Carte indiquant le puits de production (cercle bleu), le puits d'injection (cercle rose) et les failles (lignes rouges) près de Mol.

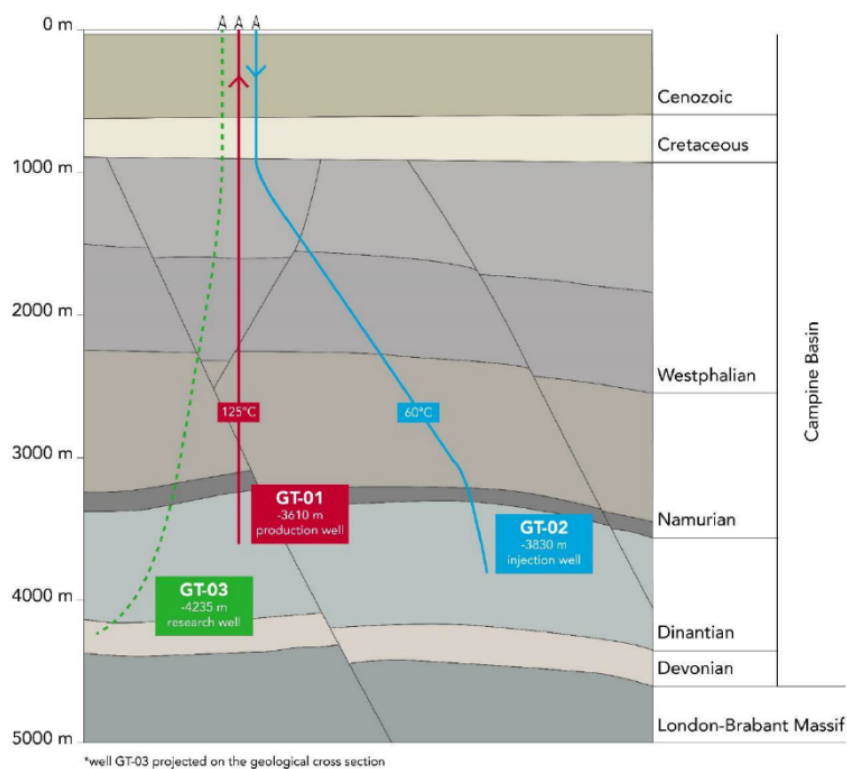


FIGURE 2.12 – Coupe géologique du réservoir de carbonates et représentation des 3 puits [BREUSEGEM 2021].

Entre décembre 2018 et juin 2019, une série de tests a été entreprise, dont la plus longue phase s’est étendue sur 10 jours. Durant cette période, 15 600 m³ d’eau ont été pompés et réinjectés. Cependant, ces tests ont provoqué des vibrations dont les magnitudes étaient comprises entre -1 et 2,2 M_L². L’événement le plus significatif s’est produit le 23 juin à 17h30 UTC. Celui-ci a été ressenti par la population et des inquiétudes ont été exprimées quant à un possible impact sur le centre de recherche nucléaire SCK-CEN, localisé à quelques kilomètres du site. Afin de limiter le risque de sismicité associé, VITO a déployé un réseau de surveillance (*monitoring*) couplé à un système TLS (Traffic Light System) [KINSCHER et al. 2022].

Le système TLS est un système de contrôle déterministe qui informe en continu et en temps réel de la situation sismique [Induced seismicity - Wikipedia s. d.]. Il est basé sur des observations des magnitudes maximales, et d’autres paramètres pouvant augmenter le danger, et fixe un ou plusieurs seuils pour différents paramètres. Le seuil le plus haut déclenche l’arrêt immédiat des opérations. Ce type de système ne fournit malheureusement pas une manière d’anticiper la réponse à des stratégies de réduction du risque [JAMES KIM et AVOUAC 2023].

A Balmatt, le système est basé sur quatre paramètres :

- la magnitude calculée d’un tremblement de terre
- la distance par rapport à une faille
- le nombre de mouvements par unité de temps
- la vitesse de pointe maximale du sol

Pour chaque paramètre, des valeurs limites sont définies et délimitent une zone verte, orange et rouge. Si au moins un des paramètres est en zone orange, les conditions de fonctionnement de la centrale géothermique, telles que le débit et les pressions d’injection, se réduisent progressivement. Si au moins un des paramètres est dans une zone rouge, la centrale est temporairement arrêtée de manière contrôlée [VITO 2022].

En février 2021, le Conseil d’administration de VITO a décidé de relancer la centrale pour un programme d’un an dans le but de mieux comprendre les caractéristiques hydrauliques et sismologiques du réservoir souterrain. Des ajustements avaient été réalisés au préalable, notamment un raffinement du réseau de sismomètres. En effet, les chercheurs peuvent maintenant compter sur 16 sismomètres, positionnés à différents endroits et profondeurs, allant de la surface de la terre jusqu’à 2km de profondeur. Cela permet de détecter des vibrations de faible intensité, de déterminer la position et la force de ces vibrations avec plus de précision, de mieux comprendre les mécanismes sources et d’identifier la relation intensité-fréquence des vibrations. [VITO 2022].

Entre avril et novembre 2021, le premier test a été lancé. D’autres phases de tests ont suivi, de plus en plus longues et avec des débits croissants. Il en résultait une pression d’in-

2. M_L est une unité de mesure appelée la magnitude locale. Elle correspond à l’échelle de Richter pour laquelle les magnitudes sont établies sur la mesure de l’amplitude maximale des ondes sismiques sur un sismogramme. Cette échelle présente, entre autres, les défauts d’être valable seulement localement et de présenter des limitations au niveau des magnitudes mesurables. On lui préférera donc plutôt M_w, la magnitude du moment [Magnitude (sismologie) — Wikipédia s. d.].

jection maximale d'environ 90 bars, soit 9 MPa. Les phases de test plus longues permettent de faire des estimations plus fiables des caractéristiques d'écoulement du réservoir, tout en évaluant les ajustements déjà apportés à la centrale [VITO 2022].

Au cours de quatre phases de tests qui ont eu lieu entre novembre 2021 et novembre 2022, la centrale a pompé 206 000 m^3 d'eau et a fourni 7935 MWh de chaleur au réseau de chaleur dont VITO fait partie. Au total, les économies réalisées sur toutes les phases de tests équivalent à la consommation annuelle moyenne de 466 foyers en gaz naturel [VITO 2022].

Grâce au nouveau réseau de sismomètres, un plus grand nombre de vibrations ont pu être mesurées, même celles de très faibles amplitudes. Le 16 novembre 2022, vers 10h, une secousse d'une magnitude de 2,1 M_L a été détectée par le système de surveillance. Celle-ci a été ressentie dans les environs immédiats. Le système de signalisation a alerté les chercheurs et la centrale a pu être arrêtée de manière contrôlée [VITO 2022].

2.4.1 Contexte géologique

L'unité stratigraphique ciblée par la centrale géothermique est le groupe calcaire datant du Carbonifère inférieur et présente principalement dans le nord-est de la Belgique, dans le Bassin de la Campine. En raison de sa position stratigraphique très profonde et de son étendue, le Groupe calcaire carbonifère présente un grand potentiel géothermique. Il s'agit d'une roche sédimentaire, c'est-à-dire formée à partir de l'accumulation de fragments de roche, de sable, de minéraux ou de débris organiques. En outre, dans une grande partie du bassin, ces carbonates sont karstifiés et fracturés [GOENSE 2019].

La période Carbonifère, s'étend de 359 Ma à 299 Ma, est subdivisée en échelle de temps géologiques regroupant le Dinantien (359-331 Ma) et le Silésien. Sur la Figure 2.12, on peut voir que les puits atteignent la couche du Dinantien, coïncée entre la couche du Dévonien et la couche du Namurien, qui fait partie du Silésien. La couche du Dinantien a une épaisseur moyenne de 800m à l'endroit des forages [Carboniferous / National Commission for Stratigraphy Belgium s. d.].

Plusieurs failles majeures d'orientation (N)NO – (S)SE sont rencontrées sur et à proximité du site de Balmatt, c'est-à-dire la faille de Dessel, la faille de Beringen et la faille de Retie, représentées sur la Figure 2.11. Ce sont des failles normales, avec des pendages d'environ 60° vers le (E)NE [HEEGE 2022].

2.4.2 Sismicité induite à Mol

Entre le début des opérations et la suspension des tests en juin 2019, ainsi qu'après la seconde phase de démarrage en 2021, environ une centaine d'événements sismiques ont été détectés [HEEGE 2022]. Durant les différentes phases de test, les débits et les pressions d'injection et de production ont varié. Il est également intéressant de noter que l'activité sismique s'est produite même après l'arrêt de l'injection, parfois plusieurs semaines après, comme le montre la Figure 2.13, à droite :

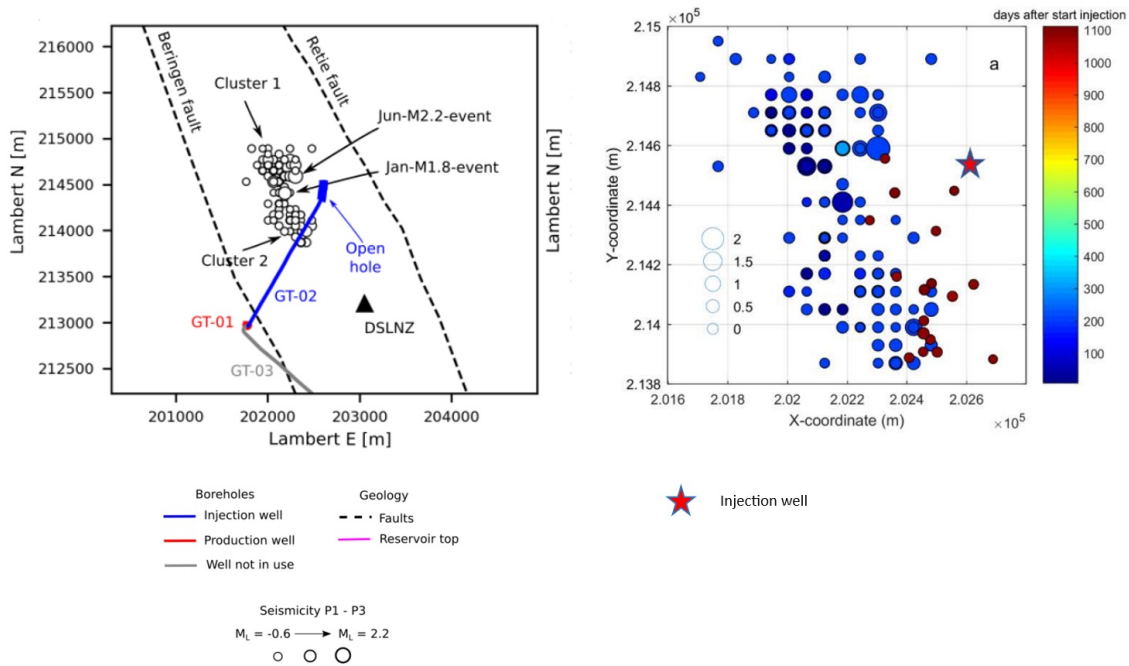


FIGURE 2.13 – Localisations des événements sismiques qui se sont produits avant l’arrêt de l’injection en 2019 à gauche [KINSCHER et al. 2022] et entre novembre 2018 et décembre 2021 à droite [HEEGE 2022].

La profondeur des événements correspond à la profondeur du réservoir, située entre 3500 et 4000 m. De plus, ils semblent être localisés à une centaine de mètres à l’ouest du puits d’injection et apparaissent en groupes concentrés à plusieurs endroits (en «clusters»). Globalement, les séismes présentent une forme elliptique, avec un axe orienté du nord-ouest au sud-est, parallèle aux failles normales régionales [HEEGE 2022].

On observe donc une absence de sismicité au puits d’injection ce qui est étonnant vu que les perturbations de pression de pore sont plus importantes à cet endroit. Selon, Jannes L. Kinscher et al., l’explication la plus probable est l’augmentation de perméabilité à cet endroit à cause de certaines opérations. Cela aurait réduit l’effet de pression de pore et ils observent bien une conductivité hydraulique plus importante entre le puits d’injection et un réseau de fracture qui se trouve à l’ouest. Quoi qu’il en soit, ils considèrent que la principale force motrice de la sismicité est liée à un effet direct de la pression interstitielle. Ils voient également des preuves de l’effet Kaiser dans l’absence de sismicité durant certaines phases d’injection pour lesquelles les pressions maximales sont restées inférieures à la pression maximale atteinte durant la phase précédente [KINSCHER et al. 2022].

Toujours selon leurs analyses, les mécanismes qui sont à prendre en compte pour expliquer la répétition des événements sont : i) une accélération du cycle de chargement sismique et de rupture sismique d’une même faille en raison de changements de pression locaux au niveau de zones de faille spécifiques et/ou de libérations partielles de contraintes répétées sur la même zone de faille ; ii) un chargement répétitif d’aspérités bloquées par une déformation asismique.

Enfin, Jannes L. Kinscher et al. expliquent que la sismicité tardive post-injection peut dans certains cas être liée à un transfert de contrainte post-choc principal alors que dans d'autres cas des perturbations provenant d'un glissement asismique semblent plus probables et constituent également un mécanisme potentiel expliquant l'absence de sismicité au niveau de la zone d'injection. Les preuves de glissement asismique se situent principalement dans l'apparition des répéteurs sismiques, c'est-à-dire des événements qui se répètent à des moments différents et dont l'origine provient de la même zone sur la faille [HEEGE 2022].

Chapitre 3

Simulations

Dans ce chapitre, on retrouve la présentation du logiciel d'éléments finis Moose ainsi qu'une description des paramètres utilisés pour les différentes simulations du réservoir géothermique de Mol. Un exemple de code utilisé est présenté dans le annexes.

De plus, une autre part de ce chapitre est consacrée à la modélisation 3D du système géothermique. Cela englobe la conceptualisation de la géométrie du système et la création d'un maillage approprié pour la simulation fait avec le logiciel MeshIt [CACACE et BLÖCHER 2015]. Ensuite, les critères pertinents de comparaison sont introduits, permettant une évaluation des résultats par rapport à la réalité.

Finalement, les conditions initiales et les limites, éléments cruciaux pour une simulation précise, sont aussi discutées, ainsi que les propriétés des matériaux. Cela englobe des paramètres tels que la perméabilité, la porosité, les propriétés thermiques et mécaniques des roches, et d'autres paramètres clés.

3.1 Logiciel d'analyse par éléments finis : Moose

Dans cette étude, les simulations d'injection et de pompage d'eau dans le réservoir poreux de Balmatt seront réalisées grâce à Moose [ALEXANDER D. LINDSAY et al. 2022]. Moose est un logiciel d'éléments finis open-source en C++ pour réaliser des simulations multiphysiques. Il a été développé à partir de 2008 par l'*Idaho National Laboratory*. l'INL, créé en 2005, qui est un important laboratoire de recherches et développement aux États-Unis [MOOSE Framework - Open Source Multiphysics s. d.].

Dans Moose, il existe des modules qui décrivent chacun un type de problème physique comme la conduction de chaleur ou la circulation d'un fluide dans un milieu poreux, comme celui décrit dans la section 3.1.2, utilisé dans le cadre de ce travail.

Pour décrire le modèle que l'on aimerait utiliser, il faut écrire un *input file*. Ce fichier va ensuite être lu par le programme qui va exécuter les différentes commandes. Dans ce fichier on retrouve 7 parties, décrites dans les paragraphes ci-dessous.

The map shows the Dessel area in Belgium, with the Dessel Canal (Desselgracht) flowing through it. The canal is highlighted in a dark grey rectangular area. The map includes a grid with coordinates (easting and northing) and labels for various locations and roads. The Dessel Canal is the central feature, with the Dessel area highlighted in a dark grey rectangular area. The map also shows the Dessel Canal (Desselgracht) flowing through the area, with the Dessel area highlighted in a dark grey rectangular area. The map includes a grid with coordinates (easting and northing) and labels for various locations and roads. The Dessel Canal is the central feature, with the Dessel area highlighted in a dark grey rectangular area.

Dans le chapitre 3.2 consacré à la modélisation du système, une explication plus détaillée des caractéristiques du maillage sera apportée.

Les variables auxiliaires sont des variables qui n'interviennent pas directement dans les équations du système mais qui peuvent être calculée en post-traitement, comme le critère de Mohr-Coulomb ou les contraintes principales.

Kernels Les formes faibles des équations du problème sont représentées dans la partie *Kernel* et ce, en ne spécifiant qu’une seule variable pour chacun.

BCs Les conditions aux frontières sont définies dans cette partie et il en existe deux types. Les conditions de Dirichlet fixent la valeur d’une variable sur les frontières spécifiées tandis que les conditions de Neumann fixent un flux sur la frontière, c’est-à-dire une valeur fixe pour la dérivée de l’équation correspondant à la variable en question.

Ces conditions peuvent également être définies sous forme de fonction, notamment pour la pression interstitielle et la température, qui varie avec la profondeur.

Material La partie *Material* définit les propriétés des matériaux du système qui seront utilisées par les kernels. Plusieurs manières de calculer ces propriétés sont possibles et plus ou moins complexes. Pour la pression de pore, il faut, par exemple, déterminer la perméabilité, la porosité ainsi que le tenseur d’élasticité.

Executionner Il est possible d’évaluer une simulation en régime permanent, c’est-à-dire lorsque le système est stable, ou en régime transitoire, c’est-à-dire lorsque le système évolue avec le temps. L’*executionner* décrit alors comment la simulation sera exécutée et inclut des commandes pour contrôler le comportement du solveur et le pas de temps.

Outputs Plusieurs types de fichiers de sortie sont possibles et, le plus souvent, il s’agit d’un fichier csv, qui permet de récupérer les résultats de la simulation ainsi qu’un fichier e, qui permet de visualiser la solution dans un logiciel comme Paraview.

3.1.2 Porous flow

Le module PorousFlow est une librairie sur la physique des fluides et d’écoulement de chaleur dans un milieu poreux. Il permet de choisir de manière arbitraire le nombre de phases et la composition du fluide [A. WILKINS, C. GREEN et J. ENNIS-KING 2020][A. WILKINS, C. GREEN et J. ENNIS-KING 2021]. C’est ce module qui est utilisé dans le cadre de ce travail. Il contient des Actions, c’est-à-dire des outils qui rassemblent des kernels et des matériaux, dont l’Action PorousFlowFullySaturated. Celle-ci permet de simuler un problème d’écoulement avec une seule phase de fluide et un milieu entièrement saturé.

3.1.3 Équations de PorousFlowFullySaturated

En fonction du type de couplage choisi par l’utilisateur, différents kernels et matériaux sont intégrés à l’Action. Un couplage hydro-thermo-mécanique a été choisi.

3.1.3.1 Hydraulique

La conservation de la masse pour un fluide dans un milieu est décrite par l’équation de continuité suivante

$$Q_f = \underbrace{\frac{\partial}{\partial t}\phi\rho}_1 + \underbrace{\phi\rho\nabla\cdot\mathbf{v}_s}_2 - \underbrace{\nabla_i\left(\rho\frac{k_{ij}}{\mu}(\nabla P_{f,j} - \rho g_j)\right)}_3 \quad (3.1)$$

Dans cette équation, Q_f est le terme source, ϕ la porosité, v_s la vitesse du solide, ρ la masse volumique, k la perméabilité, μ la perméabilité, $P_{f,j}$ la pression de pore et g la gravité.

Les différents termes de l'équation sont définis ci-dessous

1. Dérivée temporelle de la masse du fluide
2. Masse du fluide $\times$ vitesse d'expansion volumique
3. Divergence de la vitesse de Darcy

3.1.3.2 Thermique

La conservation de l'énergie pour la chaleur est décrite dans l'équation de continuité suivante :

$$q^T = \underbrace{\frac{\partial}{\partial t} ((1 - \phi)\rho_R C_R T + \phi\rho\mathcal{E})}_1 + \underbrace{((1 - \phi)\rho_R C_R T + \phi\rho\mathcal{E}) \nabla \cdot \mathbf{v}_s}_2 - \underbrace{\lambda \nabla^2 T}_3 - \underbrace{\nabla_i \left(h\rho \frac{k_{ij}}{\mu} (\nabla_j P_f - \rho g_j) \right)}_4 \quad (3.2)$$

Dans cette équation, q^T est le terme source, C_R la capacité thermique spécifique de la roche, $\mathcal{E}$ la densité d'énergie du système, ρ_R la masse volumique de la roche, T la température, μ la perméabilité et h l'enthalpie spécifique du fluide.

Les différents termes de l'équation sont définis ci-dessous

1. Dérivée temporelle de la densité de chaleur
2. Densité d'énergie $\times$ vitesse d'expansion volumique
3. Conduction de la chaleur
4. Advection de la chaleur via le flux de Darcy

3.1.3.3 Mécanique

L'équation statique de conservation de la quantité de mouvement est associée aux variables *déplacements* et s'écrit :

$$0 = \nabla_i \sigma'_{ij} - \alpha_B \nabla_j P_f - \rho_{undrained} g_j \quad (3.3)$$

Dans cette équation, σ'_{ij} le tenseur de contraintes effectives, α_B le coefficient de Biot et $\rho_{undrained}$ la masse volumique de la roche en condition non drainée.

3.2 Modélisation du système en 3D

L'objectif de cette section est d'expliquer la façon dont les différents paramètres nécessaires pour réaliser les simulations du comportement du réservoir à Mol seront déterminés. Malgré les prises d'échantillons et les études réalisées afin de caractériser le sous-sol de cette

région, il existe encore de nombreuses incertitudes quant aux caractéristiques hydrauliques, mécaniques et thermiques réelles.

Il s'agira également de présenter les courbes et paramètres opérationnels à notre disposition et sur lesquels il sera possible de se reposer pour réaliser cette étude.

3.2.1 Géométrie et maillage

Afin de réaliser la géométrie de la zone d'injection et de production, plusieurs étapes ont été nécessaires.

Premièrement, des fichiers géographiques contenant des informations de géoréférencement sur la base des couches du Namurien et du Dinantien, ainsi que sur les failles traversant cette zone, ont été récupérés. Ces données topographiques sont disponibles sur le site de la banque de données flamande sur les sous-sols (Databank Ondergrond Vlaanderen) [Welkom bij Databank Ondergrond Vlaanderen / DOV s. d.].

Ces données ont ensuite été importées dans le programme QGIS afin de les "découper" selon l'emprise souhaitée et obtenir un fichier ne contenant que des coordonnées x,y et z, traitables par le logiciel de maillage MeshIt. L'emprise en question, représentée précédemment à la Figure 3.1, est une zone de 4200m sur 4610m.

Pour ce qui est de la profondeur, des modifications ont été apportées par rapport aux données initiales importées de la banque. Wassing, B. et al. HEEGE 2022 renseignent une profondeur de 3992m pour la base du Dinantien et une profondeur comprise entre 3150 et 3300m pour son sommet, ce qui correspond bien aux coordonnées z récupérées. Cependant, afin de limiter l'effet des conditions aux limites sur le résultat aux points d'injection et de production, se situant respectivement à 3830m et 3175m de profondeur, la couche de calcaire carbonifère a été agrandie. Pour cela, la base du Dinantien a été abaissée de 700m.

Grâce à ces coordonnées, MeshIt génère un maillage tétraédrique plus ou moins raffiné, en intégrant les failles sous forme d'objets distincts de la matrice poreuse. La Figure 3.2 donne le rendu final dans Paraview :

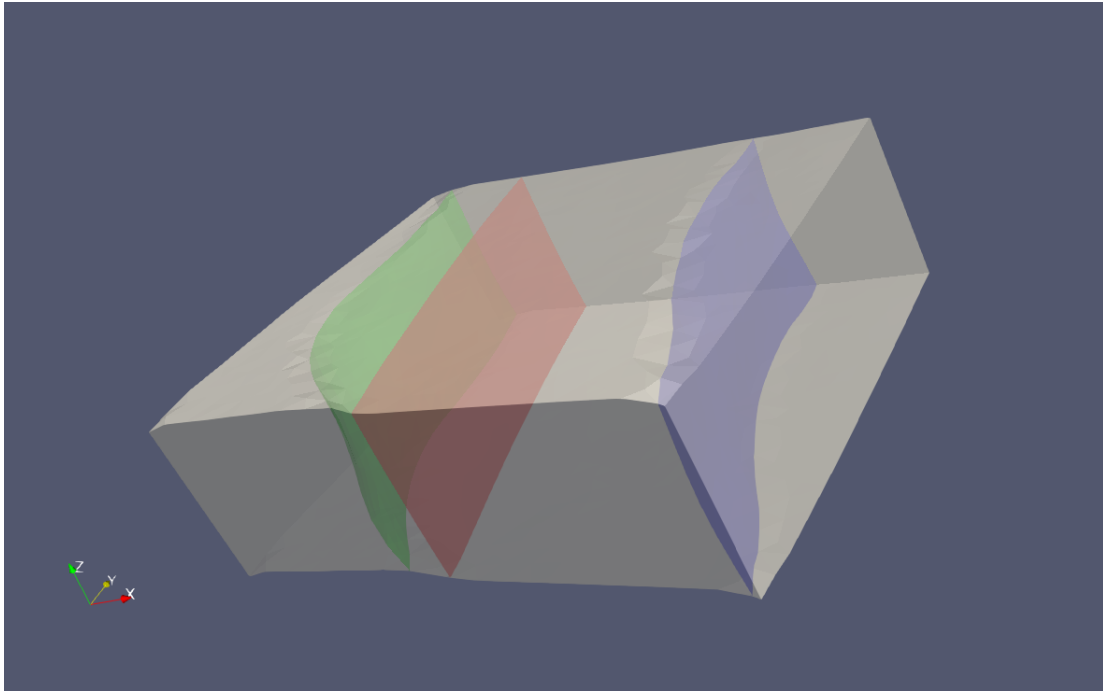


FIGURE 3.2 – Visualisation du modèle 3D dans Paraview. La matrice est représentée en blanc, la faille de Dessel en vert, la faille de Beringen en rouge et la faille de Retie en bleu.

3.2.2 Critères de comparaison

Afin d'évaluer le modèle réalisé sur Moose et le choix des paramètres, plusieurs paramètres de références seront utilisés.

Pour rappel, le 23 juin 2019, un séisme de magnitude $M_w=2.1$ s'est produit, deux jours après une injection ininterrompue sur une période de 10 jours et à un débit moyen de $65\text{m}^3/\text{h}$. Les paramètres opérationnels des jours précédents cet événement, tels que la pression, le débit et la température sont connus grâce à la Figure 3.3 [VITO 2021]. La courbe jaune est la pression du fluide au point d'injection, la courbe orange est la température d'injection et la courbe noire est le débit injecté.

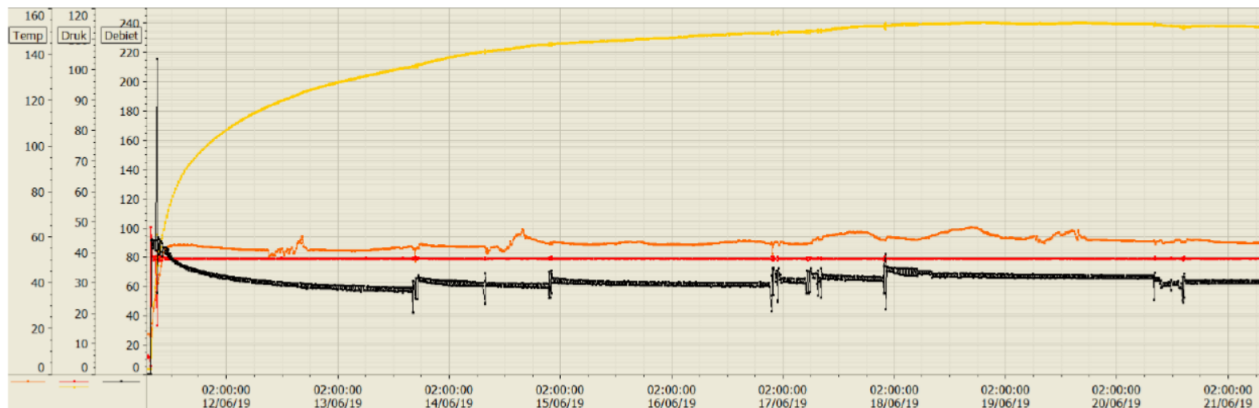


FIGURE 3.3 – Paramètres d'injection de la centrale géothermique du 12 juin au 21 juin 2019.

La pression d'injection au *steady state*, qui arrive après 7 jours, est de 11,5 MPa. Cette pression est égale à la pression de pore au puits d'injection moins la pression hydrostatique, c'est-à-dire :

$$P_{injection} = P_f - \rho_f g z \quad (3.4)$$

Grâce à la courbe de pression de pore réalisée par M. Van Breusegem via Excel, il sera possible de comparer nos résultats à celle-ci (Figure 3.4) :

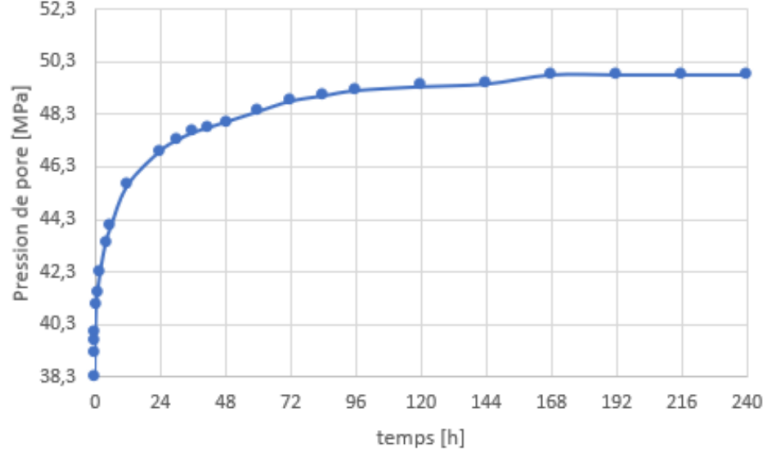


FIGURE 3.4 – Courbe de pression sur 10 jours d'injection [BREUSEGEM 2021].

Pour l'analyse du critère de Mohr-Coulomb (MC), un contour de la zone où l'on retrouve les événements sismiques (répertoriés sur la Figure 2.13 de la section 2.4.2) a été réalisé. Pour rappel, lorsque le critère de MC est supérieur ou égal à 0, la rupture est atteinte. Il varie à chaque pas de temps, puisque les contraintes autour du puits d'injection varient également à cause de l'injection du fluide.

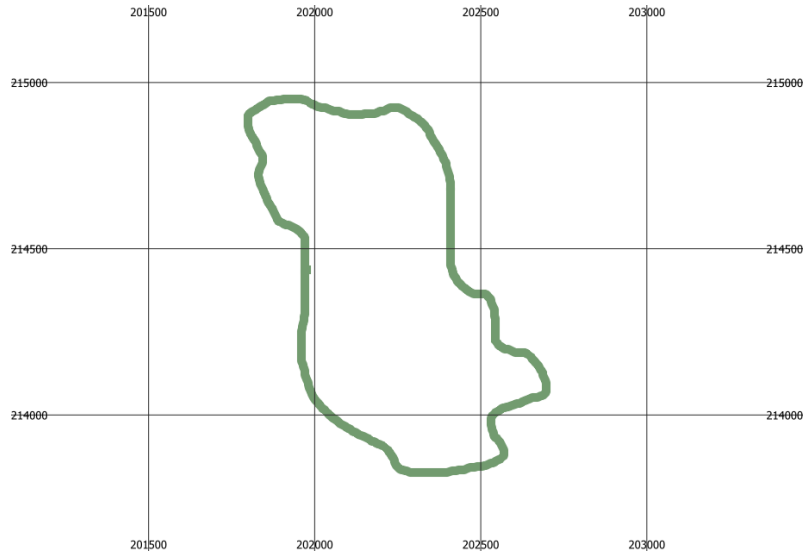


FIGURE 3.5 – Contour de la zone où les séismes ont été recensés entre 2018 et 2021.

Grâce à ce contour, il sera possible de comparer le front de rupture, c'est-à-dire le contour de la zone où le critère de MC est positif, et la zone de sismicité réelle.

3.2.3 Conditions initiales et limites

Les conditions initiales sont les mêmes que celles appliquées aux frontières car il s'agit des conditions du réservoir non perturbé par l'injection. Concernant la pression interstitielle, on considère une pression hydrostatique avec la fonction $\rho_f g z$ soit, $-10000 \times z$, si l'on considère que la gravité $g=10 \text{ m/s}^2$ et la masse volumique de l'eau $\rho_f=1000 \text{ kg/m}^3$.

Pour tenir compte de l'augmentation de la température avec la profondeur, la fonction $283.15 - 34 \times z/1000$ est appliquée, en considérant une température en surface de 10°C en moyenne, calculée en Kelvin et un gradient géothermique de 34°C/km .

Finalement, les déplacements x , y et z aux frontières sont considérés comme nuls.

3.2.4 Propriétés des matériaux

Dans ce travail, certains paramètres seront fixés tandis que d'autres feront l'objet d'analyses paramétriques afin de déterminer ceux qui amènent au modèle le plus réaliste. Ces analyses se concentreront sur l'évolution de la pression de pore, du critère de MC et de la température. Il convient de noter que les propriétés peuvent varier considérablement d'un endroit à l'autre, même pour un même type de roche, en fonction des conditions in-situ, telle que la fracturation locale du milieu. Ainsi, les études les plus pertinentes seront celles qui analysent des échantillons prélevés à proximité du site de Balmatt.

Dans les sections ci-dessous, les paramètres, leurs influences et les valeurs trouvées dans la littérature sont décrits.

3.2.4.1 Propriétés hydrauliques

3.2.4.1.1 Débit

Le débit d'injection de $65 \text{ m}^3/\text{h}$ qui sera utilisé par défaut dans l'analyse paramétrique est le débit moyen sur les 10 jours d'injection en 2019, avant l'événement sismique $M_w=2.1$. Il est donc également intéressant d'analyser l'influence de plusieurs débits sur la pression interstitielle. Wassing B. et al présentent les données de débit et de température d'injection et la moyenne journalière pour la période d'exploitation 2018-2019 :

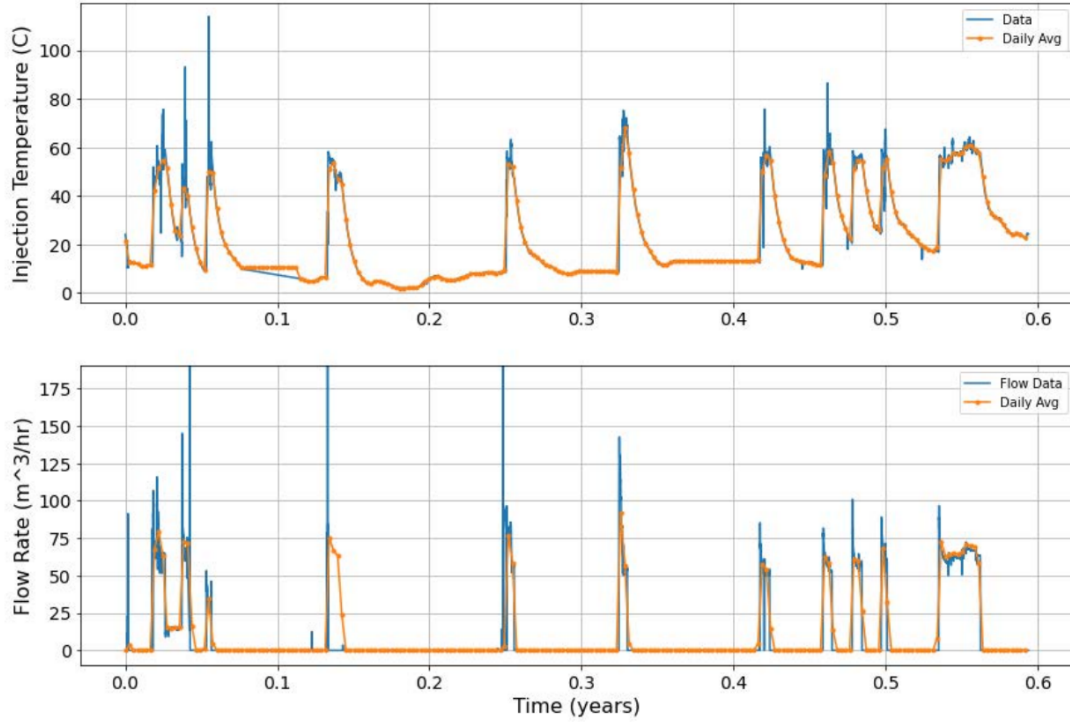


FIGURE 3.6 – Débit et de température d’injection et moyenne journalière pour la période d’exploitation 2018-2019 [HEEGE 2022].

On observe un intervalle de valeurs de $[50-100]$ m³/h sur cette période, ce qui correspond à $[13.89-27.78]$ kg/s.

3.2.4.1.2 Perméabilité

La perméabilité, notée k , d’un milieu poreux mesure sa capacité à permettre le passage d’un fluide sous l’effet d’un gradient de pression. Elle est liée à la pression interstitielle par l’équation de la vitesse de Darcy q_f qui représente la 3^{eme} partie de l’équation 3.1 :

$$q_f = -\frac{k}{\mu}(\nabla P_f - \rho_f g) \quad (3.5)$$

Avec la viscosité du fluide μ , la différence de pression de pore ∇P_f , la densité du fluide ρ_f et la gravité g .

Lorsque la perméabilité augmente, la variation de pression interstitielle diminue. Des études, comme celles menées par M. Van Breusegem [BREUSEGEM 2021], ont montré que cela conduit à une pression atteinte en régime permanent (*steady state*) plus faible et un *steady state* atteint plus tôt [BREUSEGEM 2021].

Dans le cadre de Moose, il existe plusieurs méthodes pour calculer la perméabilité. La loi de Kozeny-Carman, qui décrit l’évolution de la perméabilité k en fonction de la porosité ϕ , a été choisie :

$$k_{ij} = k_0 \frac{(1 - \phi_0)^2}{\phi_0^3} k_{ij}^0 \frac{\phi^3}{(1 - \phi)^2} \quad (3.6)$$

Avec k_{ij}^0 la matrice d'anisotropie et k_0 la perméabilité initiale. Si la perméabilité est isotrope, alors k_{ij}^0 vaut la matrice unité.

La Figure 3.7 montre cette relation entre la perméabilité et la porosité. On remarque qu'avec une augmentation de 25%, la perméabilité double.

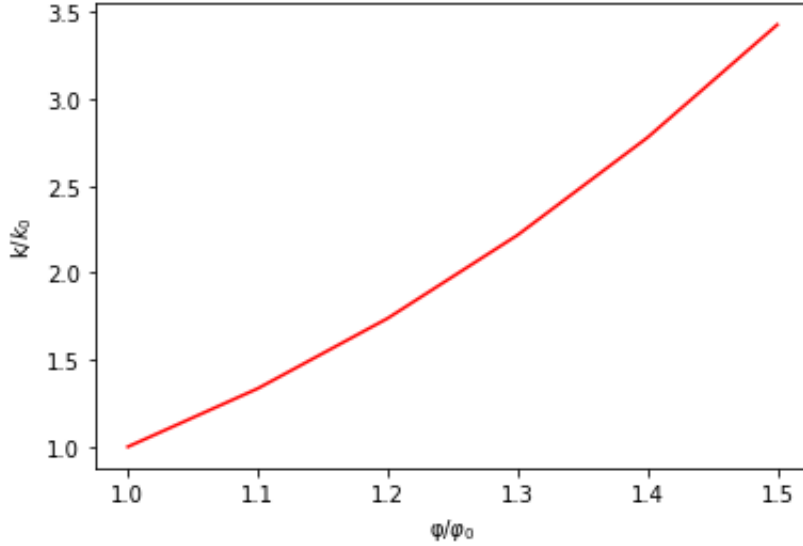


FIGURE 3.7 – Variation du rapport k/k_0 en fonction du rapport entre ϕ/ϕ_0 pour un $\phi_0=0.015$.

Toutefois, au sein de cette analyse, la porosité présente une évolution minimale, comme illustré par la Figure 3.8.

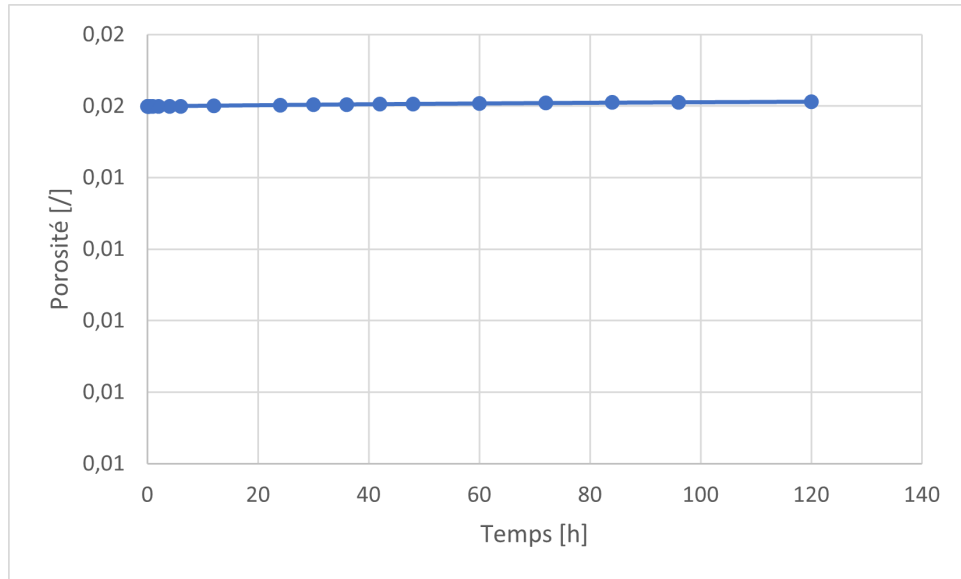


FIGURE 3.8 – Évolution de la porosité pendant 10 jours avec une perméabilité initiale de 10^{-15} m^2 et une porosité initiale de 0.015.

Pour le réservoir de Mol-Dessel, modélisé par Wassing, B. et al., plusieurs analyses thermo-hydro-mécaniques et sismiques ont été réalisées, en divisant le réservoir en différentes couches.

Ils ont défini une zone autour du point d'injection où la perméabilité est plus élevée, en proposant des valeurs de perméabilité pour les différentes couches basées sur des mesures in-situ et des tests en laboratoire :

- Couche d'injection : 10^{-15} m^2
- Zone autour du point d'injection : 10^{-13} m^2
- Fractures : 10^{-14} m^2

Ces valeurs sont cohérentes avec celles rapportées dans la littérature. Par exemple, E. Sulçuk a obtenu des résultats de perméabilité compris entre 10^{-16} et 10^{-15} m^2 en analysant des échantillons de calcaire du Bassin de la Campine [EROL 2018]. De même, T. Goense a trouvé des valeurs comprises entre 10^{-15} et $1,5 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ [GOENSE 2019]. Ces valeurs sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Valeurs [m^2]	Études
$[10^{-15}-10^{-13}]$	HEEGE 2022
$[10^{-16}-10^{-15}]$	EROL 2018
$[10^{-15}-1,5 \times 10^{-13}]$	GOENSE 2019

TABLE 3.1 – Valeurs de perméabilité dans la littérature pour le réservoir.

3.2.4.1.3 Porosité

La porosité ϕ est définie comme le rapport entre le volume des vides V_{pores} et le volume total V_{total} d'un milieu poreux :

$$\phi = \frac{V_{pores}}{V_{total}} \quad (3.7)$$

Elle joue un rôle important dans les propriétés hydrauliques du milieu et est également liée à la pression interstitielle via la partie 1 et 2 de l'équation hydraulique 3.1. Selon les explications de M. Van Breusegem [BREUSEGEM 2021], une augmentation de la porosité entraîne une augmentation de la vitesse de diffusion et un temps plus long pour atteindre le régime permanent. Cependant, il note également l'influence négligeable de la porosité sur la pression maximale atteinte au steady state.

Dans l'outil *PorousFlowPorosity* utilisé dans le fichier d'entrée, l'évolution de la porosité est décrite par l'équation suivante, où l'on retrouve la porosité initiale ϕ_0 , les coefficients de Biot α_B et α'_B (pour tenir compte de l'augmentation de la porosité avec la pression de pore), le module d'élasticité K , la pression de pore P_f et la pression de pore de référence P_f^{ref} :

$$\phi = \alpha_B + (\phi_0 - \alpha_B) e^{\frac{\alpha'_B - 1}{K} (P_f - P_f^{ref})} \quad (3.8)$$

Dans notre cas, nous ferons l'hypothèse de $\alpha_B = \alpha'_B$.

Wassing, B. et al. spécifient la porosité de la même manière que la perméabilité, avec une valeur de 1.5 % pour la couche d'intérêt et 5 % dans un rayon autour du puits d'injection. En se basant sur l'analyse de plusieurs roches, Bell. F.G a établi un intervalle de porosité de 2.4 à 3.6 % (voir Tableau 3.2).

Valeurs [%]	Études
[1.5-5]	HEEGE 2022
[2.4-3.6]	BELL FG 1981

TABLE 3.2 – Valeurs de porosités dans la littérature pour le réservoir.

La porosité de la faille est logiquement proche de 1, puisqu’il s’agit d’une interface entre deux surfaces de roches.

3.2.4.1.4 Module d’élasticité isostatique et coefficient de Poisson

Le module d’élasticité isostatique (ou *bulk modulus* en anglais), noté K , est une constante qui relie la contrainte au taux de déformation d’un matériau isotrope (qui présente les mêmes propriétés dans toutes les directions) soumis à une compression isostatique :

$$K = -V \frac{dP}{V} \quad (3.9)$$

où P est la pression et V le volume initial.

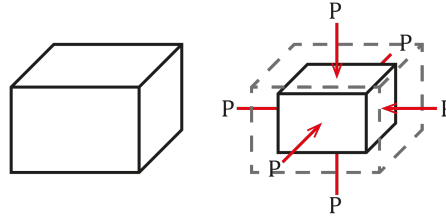


FIGURE 3.9 – Représentation du module d’élasticité isostatique K [Bulk modulus - Wikipedia s. d.].

L’équation 3.8 montre que le module K influence la porosité. En effet, une augmentation du module d’élasticité entraîne une diminution de la porosité. Indirectement, il influence donc la pression interstitielle. Cependant, l’analyse paramétrique de M. Van Breusegem [BREUSEGEM 2021] révèle que cette influence est très faible. Cela s’explique par le fait que le module d’élasticité intervient dans le calcul des déplacements plutôt que dans l’équilibre des contraintes et qu’il en est de même pour le coefficient de Poisson.

Le coefficient de Poisson, noté ν , est le rapport du rétrécissement transversal relatif sur l’allongement longitudinal relatif du matériau :

$$\nu = \frac{(l_0 - l)/l_0}{(L - L_0)/L_0} \quad (3.10)$$

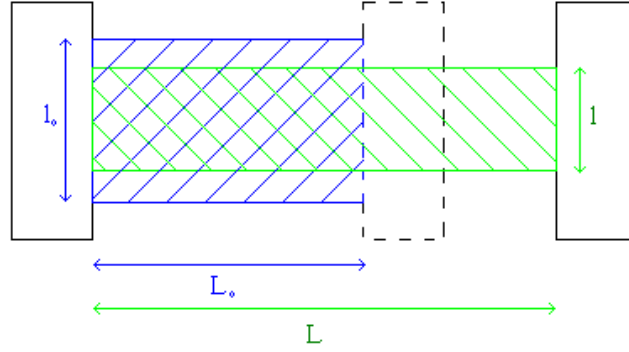


FIGURE 3.10 – Représentation du module de Poisson [Poisson's ratio - Wikipedia s. d.].

Il est lié au module d'élasticité K et au module de Young E via l'équation

$$K = \frac{1}{3} \frac{E}{(1 - 2\nu)} \quad (3.11)$$

Pour les simulations de Wassing, B. et al, le module d'élasticité est égal à 40 GPa et le coefficient de Poisson à 0.281, tandis que Meyer C., dans son modèle du réservoir réalisé avec Python, présente une valeur de 2.5 GPa pour le module d'élasticité et un intervalle de 0.15 à 0.35 pour le coefficient de Poisson [CÉDRIC DE MEYER 2019].

Valeurs de K [GPa]	Valeurs de ν	Études
40	0.281	HEEGE 2022
2.5	[0.15-0.35]	CÉDRIC DE MEYER 2019

TABLE 3.3 – Valeurs du module d'élasticité isostatique et du coefficient de Poisson dans la littérature pour le réservoir.

Étant donné le faible impact que ces deux paramètres ont sur la pression de pore, des valeurs fixes seront choisies pour l'analyse de l'évolution de cette dernière, à savoir 40 GPa pour le module d'élasticité et 0.281 pour le coefficient de Poisson.

3.2.4.1.5 Coefficient de Biot

Le coefficient de Biot, noté α_B , représente la déformabilité des grains du squelette solide β_s par rapport à la déformabilité du milieu poreux β_m :

$$\alpha_B = 1 - \frac{\beta_s}{\beta_m} \quad (3.12)$$

Comme mentionné précédemment dans l'équation 3.8, le coefficient de Biot influence la porosité. De plus, $K = \frac{1}{\beta}$. Une variation du coefficient de Biot affecte principalement la vitesse de diffusion de la pression interstitielle. Plus le coefficient de Biot diminue, plus il faut de temps pour atteindre la pression de pore maximale.

Hampton J. et Boitnott G. proposent une approche simplifiée pour comprendre comment le coefficient de Biot est lié à certaines propriétés grâce à la Figure 3.11 [HAMPTON et BOITNOTT 2018]. D'après ce graphe, pour un module d'élasticité isostatique de 40 GPa, le coefficient de Biot a une valeur avoisinant 0.5. Cependant, si l'on considère une structure fissurée, il devrait être plus élevé.

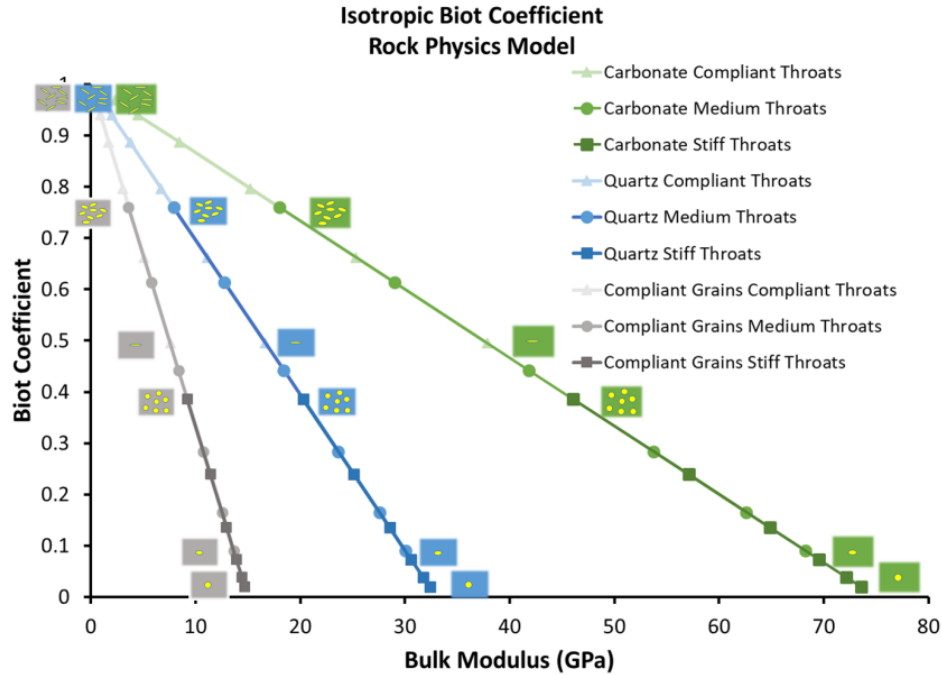


FIGURE 3.11 – Évolution du coefficient de Biot en fonction de module d'élasticité isostatique pour plusieurs types de roches et différentes structures de pore. Trois structures de pores sont représentées schématiquement par des diagrammes avec des cercles (*stiff*=rigides), des ellipses (*medium*=intermédiaires) et des fissures (*compliant*=souples) [HAMPTON et BOITNOTT 2018].

En outre, A. Selvadurai montre des résultats expérimentaux (Figure 3.12) qui mettent le coefficient de Biot et la porosité en relation. Dans le cas du calcaire carbonifère et avec une porosité du réservoir estimée en dessous de 5%, le coefficient de Biot aurait une valeur avoisinant 0.4 ou moins.

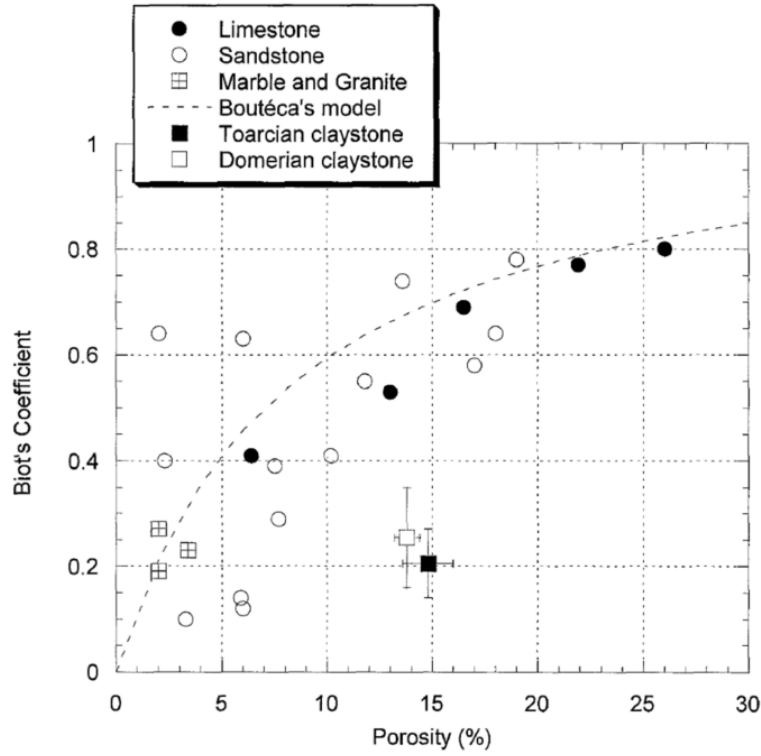


FIGURE 3.12 – Observations expérimentales de la relation entre le coefficient de Biot et la porosité pour plusieurs types de roche [SELVADURAI 2021].

Le tableau suivant résume les valeurs trouvées dans la littérature :

Valeurs [/]	Études
0.5	HEEGE 2022
[0.4-1]	HAMPTON et BOITNOTT 2018
0.4	SELVADURAI 2021

TABLE 3.4 – Valeurs de coefficients de Biot dans la littérature pour le réservoir.

3.2.4.2 Propriétés mécaniques

3.2.4.2.1 Coefficient de Biot

Le coefficient de Biot a également un impact sur les contraintes effectives et donc sur le critère de Mohr Coulomb. L'équation 3.13, qui fait partie de l'équation de conservation du mouvement 3.3, décrit la relation entre les contraintes totales σ , les contraintes effectives σ' et la pression de pore P_f :

$$\sigma = \sigma' - \alpha_B P_f I \quad (3.13)$$

M. Van Breusegem montre dans son mémoire que le coefficient de Biot a une relation linéaire avec le critère de MC (Figure 3.13). En effet, si le coefficient de Biot augmente, le critère de MC augmente également, rapprochant la roche de la rupture. Cela se traduit par un décalage des cercles de Mohr sur le diagramme de Mohr-Coulomb.

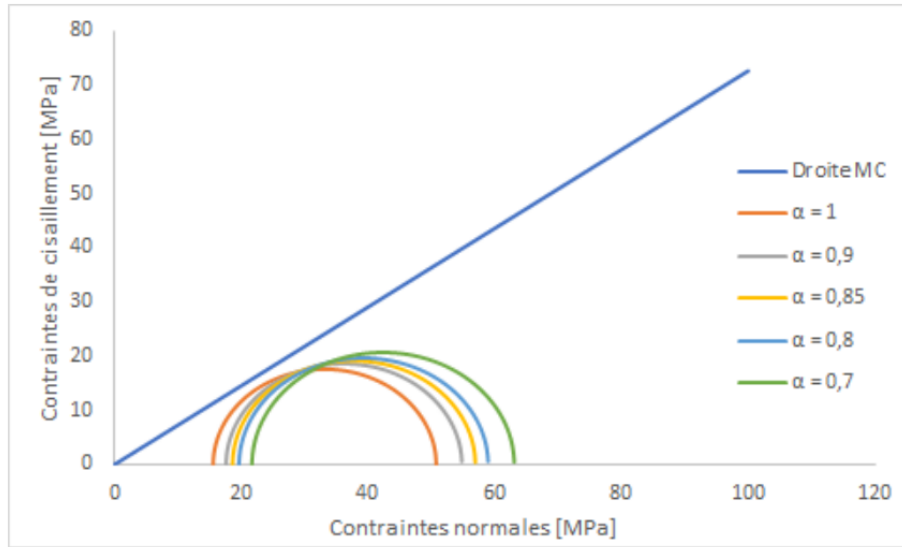


FIGURE 3.13 – Influence du coefficient de Biot sur les cercles de Mohr [BREUSEGEM 2021].

En se basant sur les intervalles de valeurs du Tableau 3.4, l'étude du critère de MC utilisera des coefficients de Biot compris entre 0.4 et 1.

3.2.4.2.2 Masse volumique de la roche

La masse volumique d'un matériau caractérise la masse de ce matériau par unité de volume et est notée ρ . Elle intervient dans l'équation mécanique 3.3 et pour le calcul des contraintes verticales :

$$\sigma_v = \rho g z \quad (3.14)$$

Avec ρ la masse volumique et z la profondeur. On peut déduire que plus la masse volumique de la roche augmente, plus les contraintes effectives initiales augmentent et plus le critère de MC diminue.

Le tableau ci-dessous rassemble les valeurs trouvées dans la littérature :

Valeurs [kg/m ³]	Études
2600	HEEGE 2022
[1700-2900]	CÉDRIC DE MEYER 2019
[2550-2610]	BELL FG 1981

TABLE 3.5 – Valeurs de masses volumiques dans la littérature pour le réservoir.

3.2.4.2.3 Cohésion et angle de frottement

La cohésion et l'angle de frottement interviennent dans la définition du critère de MC :

$$\frac{(\sigma'_3 + \sigma'_1)}{2} \sin(\phi') + c' \cos(\phi') - \frac{(\sigma'_3 - \sigma'_1)}{2} = MC \quad (3.15)$$

Pour rappel, σ'_1 , σ'_2 et σ'_3 sont les contraintes effectives principales.

Augmenter la cohésion c et/ou l'angle de frottement ϕ éloignera la droite de Mohr-Coulomb des cercles de Mohr. Cela signifie que la résistance au cisaillement augmente pour des contraintes normales constantes.

Pour une roche intacte, la cohésion moyenne d'une roche calcaire est de 15 MPa. Cependant, pour roche fracturée, la cohésion sera inférieure. Dans plusieurs études, l'hypothèse d'une cohésion nulle est faite [KINSCHER et al. 2022, BREUSEGEM 2021]. C. Meyer, quant à lui, propose l'intervalle [1-6] MPa [CÉDRIC DE MEYER 2019].

Quant à l'angle de frottement, les valeurs courantes dans la littérature sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Valeurs [°]	Études
31	HEEGE 2022
[20-39]	KINSCHER et al. 2022
[25-40]	CÉDRIC DE MEYER 2019

TABLE 3.6 – Valeurs d'angles de friction dans la littérature pour le réservoir.

3.2.4.2.4 Coefficient de poussée

Si l'on considère qu'il n'y a pas de déplacement latéral, on peut lier les contraintes verticales ($\sigma'_v = \sigma'_1$) et horizontales effectives ($\sigma'_h = \sigma'_2$) et $\sigma'_H = \sigma'_3$ grâce au coefficient de poussées des terres au repos, K_0 :

$$\sigma'_H = K_{0,H} \sigma'_v = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma'_v \quad (3.16)$$

$$\sigma'_h = K_{0,h} \sigma'_v \quad (3.17)$$

Pour analyser l'influence de ce paramètre sur le critère de MC, le coefficient $K_{0,H}$ restera constant tandis que le coefficient $K_{0,h}$ variera. Avec un coefficient de Poisson égal à 0.281, $K_{0,H}$ vaut 0.39.

3.2.4.3 Propriétés thermiques

3.2.4.3.1 Température du fluide et du réservoir

En Belgique, une température d'équilibre de 10 à 12°C règne jusqu'à 18 m de profondeur. Au-delà, un gradient géothermique de 2 à 3°C tous les 100m est à prendre en compte [NEBHANI 2022]. Cette évolution de température avec la profondeur est prise en compte dans la simulation Moose grâce à l'imposition de conditions initiales et limites.

Les recherches réalisées sur la température et la pression du puits d'injection MOL-GT-02 ont données les résultats visibles sur la Figure 3.14 [HEEGE 2022] :

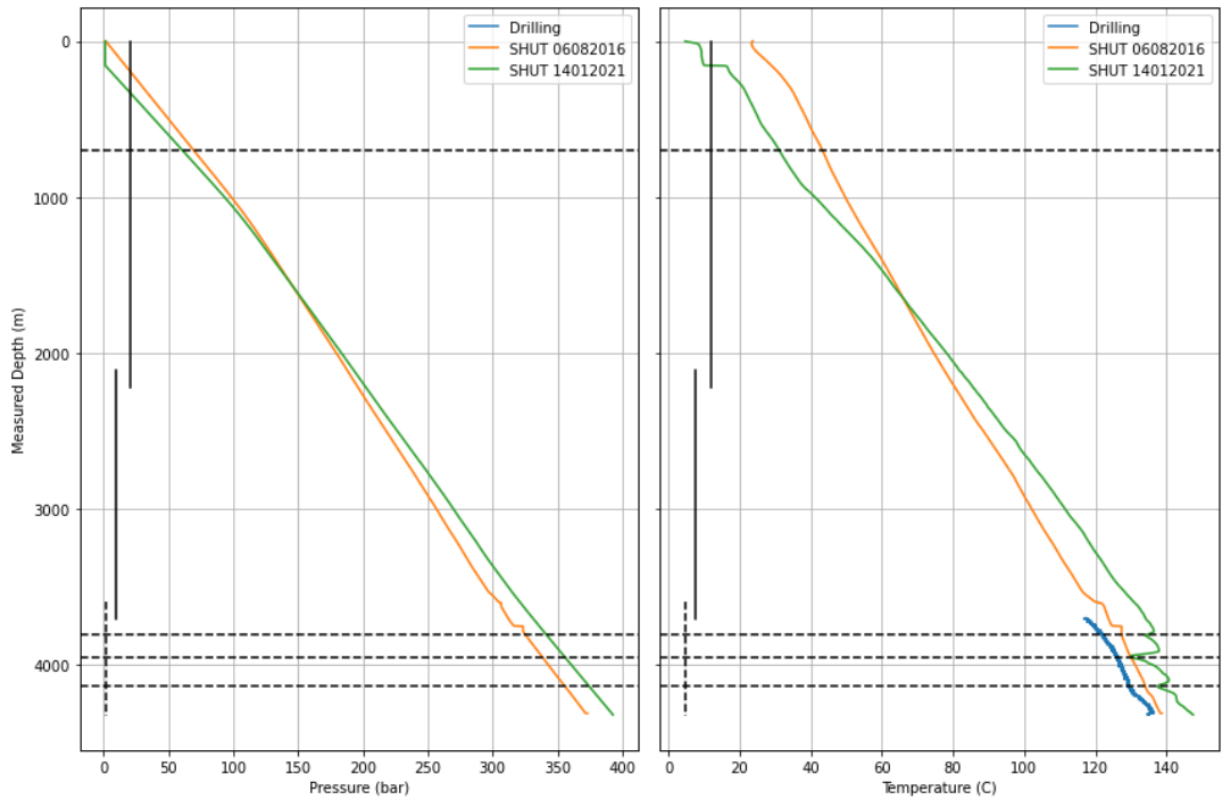


FIGURE 3.14 – Pression et température enregistrées au puits d’injection MOL-GT-02 [HEEGE 2022].

Le Tableau 3.7 rassemble les valeurs de température de la roche T_r et de fluide T_f trouvées dans la littérature :

Valeurs pour T_f [K]	Valeurs pour T_r	Études
329.15	413.15	HEEGE 2022
/	401.15	KINSCHER et al. 2022
333.15	398.15	CÉDRIC DE MEYER 2019

TABLE 3.7 – Valeurs de capacités calorifiques spécifiques dans la littérature pour le réservoir.

3.2.4.3.2 Capacité calorifique spécifique

La capacité thermique spécifique ou massique, notée C_R ou C_p , est la capacité d’un matériau à accumuler de l’énergie sous forme thermique, pour une masse donnée, quand sa température augmente. Elle intervient dans la partie 1 et 2 de l’équation thermique 3.2. Si la capacité thermique de la roche est plus élevée qu’une autre, elle cédera sa chaleur au fluide plus lentement. De plus, elle dépend elle-même de la température de la roche comme le montre la Figure 3.15.

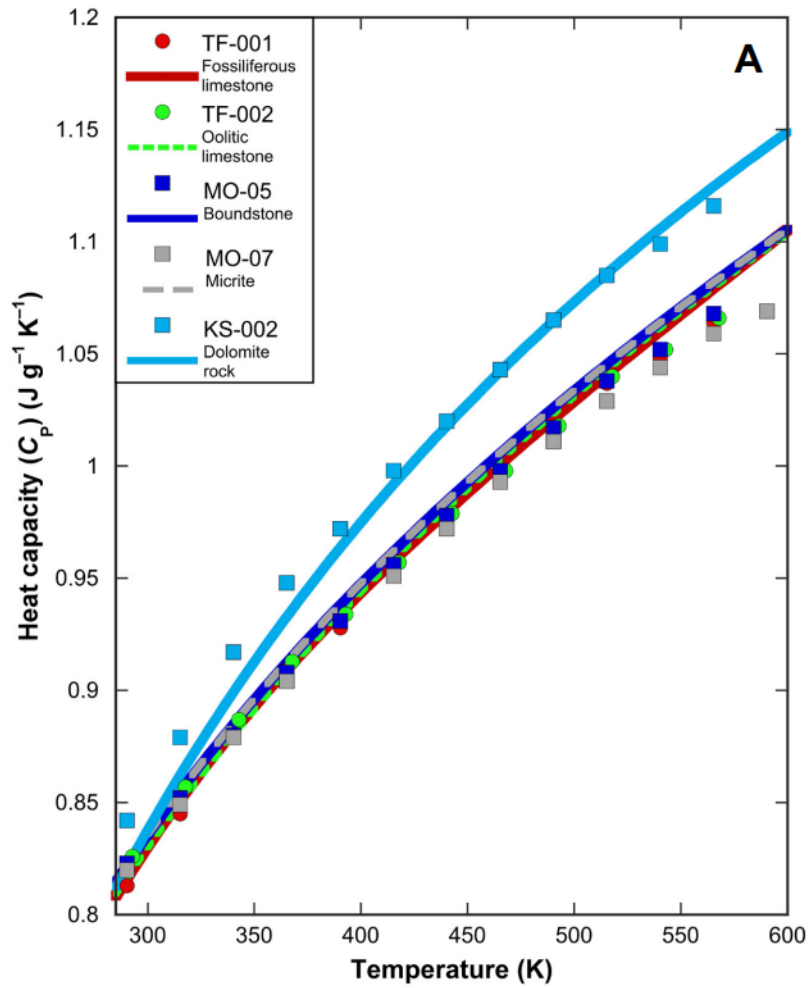


FIGURE 3.15 – Capacité thermique spécifique isobare de différentes roches calcaires. Les lignes montrent des C_p calculés grâce à l'équation de Robie et Hemingway (1995) tandis que les symboles sont des mesures directes [MERRIMAN et al. 2018].

Le calcaire carbonifère du réservoir de Mol est un type de roche fossilifère (*Fossiliferous limestone*), c'est-à-dire composée principalement de carbonate de calcium et contenant des fossiles ou traces de fossiles en abondance [DEPARTEMENT OF EARTH AND PLANETARY SCIENCES 2019]. Si l'on considère une température du réservoir d'environ 400 K, C_p est alors comprise entre 900 et 950 J/kg/K.

Les valeurs trouvées dans la littérature sont regroupées dans le Tableau 3.8 :

Valeurs [J/kg/K]	Études
880	HEEGE 2022
[900-950]	MERRIMAN et al. 2018
1000	ZHU et al. 2022

TABLE 3.8 – Valeurs de capacités calorifiques spécifiques dans la littérature pour le réservoir.

3.2.4.3.3 Conductivité thermique

La capacité d'un matériau à diffuser la chaleur dépend de leur conductivité thermique, notée λ . C'est le rapport entre l'énergie thermique transférée par unité de temps et de surface. Ainsi, une roche avec une conductivité thermique élevée peut transmettre plus efficacement sa chaleur au fluide. Elle est présente dans la partie 3 de l'équation 3.2

X. Zhu et al. expliquent que la porosité, la présence d'eau et la masse volumique sont des facteurs importants affectant la conductivité thermique des roches ignées et sédimentaires. Plus la porosité est élevée, plus la capacité à conduire la chaleur est améliorée [ZHU et al. 2022].

De plus, la conductivité thermique est inversement proportionnelle à la température, contrairement à la capacité thermique spécifique, comme le montre la Figure 3.16 :

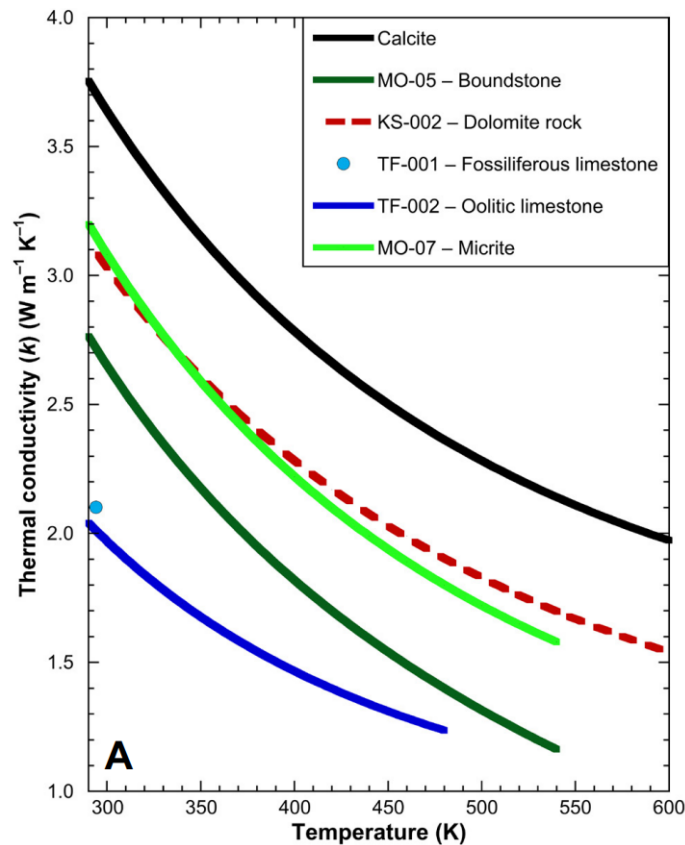


FIGURE 3.16 – Conductivité thermique de différentes roches calcaires calculée grâce aux mesures de diffusivité thermique et capacité thermique spécifique [MERRIMAN et al. 2018].

Les valeurs trouvées dans la littérature sont regroupées dans le Tableau 3.9 :

Valeurs [W/kg/K]	Études
2.4	HEEGE 2022
[2.1-1]	MERRIMAN et al. 2018
[1.8-2.8]	ZHU et al. 2022

TABLE 3.9 – Valeurs de conductivité thermique dans la littérature pour le réservoir.

3.2.4.3.4 Coefficient d’expansion thermique

Pour tenir compte des effets mécaniques des changements de température, on peut redéfinir le calcul des contraintes effectives :

$$\sigma' = E(\epsilon^{elastique} - \alpha_T \nabla T) \quad (3.18)$$

Avec E le module de Young, $\epsilon^{elastique}$ les déformations élastiques, α_T le coefficient d’expansion thermique linéaire et ∇T la différence entre la température du réservoir et la température de référence à laquelle il n’y a aucune déformation thermique. On observe qu’une augmentation de α_T entraîne une augmentation des déformations thermiques. Dans l’équation thermique 3.2, le couplage avec la mécanique se fait via le 2e terme.

Le coefficient d’expansion thermique linéaire est l’aptitude d’un matériau soumis à une variation de température à se dilater ou à se contracter. Les corps les plus rigides (module de Young élevé) sont ceux qui se dilatent le moins. Voici les valeurs trouvées dans la littérature :

Valeurs [K ⁻¹]	Études
[10 ⁻⁵ -3×10 ⁻⁵]	HEEGE 2022
[3×10 ⁻⁶ -7×10 ⁻⁶]	CSTC 1997
[7.29×10 ⁻⁶]	MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, ARIZZI et BENAVENTE 2021

TABLE 3.10 – Valeurs de coefficient d’expansion thermique dans la littérature pour le réservoir.

Chapitre 4

Résultats de l'étude

Premièrement, ce chapitre débutera par des explications sur le choix du raffinement du maillage. Il continuera par la présentation des résultats des analyses de la pression interstitielle et du critère de Mohr Coulomb au puits d'injection, en fonction des différentes caractéristiques de la roche. Ces caractéristiques sont : sa perméabilité, sa porosité, le coefficient de Biot, sa masse volumique, le coefficient de poussée des terres au repos minimal ainsi que le débit d'injection. Elles sont prises uniformes sur tout le réservoir, sauf au niveau des failles qui ont des propriétés propres. Les valeurs par défaut sont reprises dans le Tableau 4.1

Paramètres	Valeurs	Unités
Perméabilité de la roche	3×10^{-15}	m^2
Perméabilité des failles	10^{-14}	m^2
Porosité de la roche	0.015	/
Porosité des failles	1	/
Débit	18.05	kg/s
Module d'élasticité	40	GPa
Coefficient de Biot	0.5	/
Masse volumique	2600	kg/m^3
Coefficients de poussée des terres au repos	0.39	/
Température d'injection	333.15	K
Capacité calorifique spécifique de la roche	880	J/kg/K
Conductivité thermique de la roche	2.4	W/m/K
Conductivité thermique des failles	1	W/m/K
Module de Young	50	GPa
Coefficient de Poisson	0.281	/
Coefficient d'expansion thermique de la roche	10^{-5}	K^{-1}

TABLE 4.1 – Valeurs de propriétés par défaut.

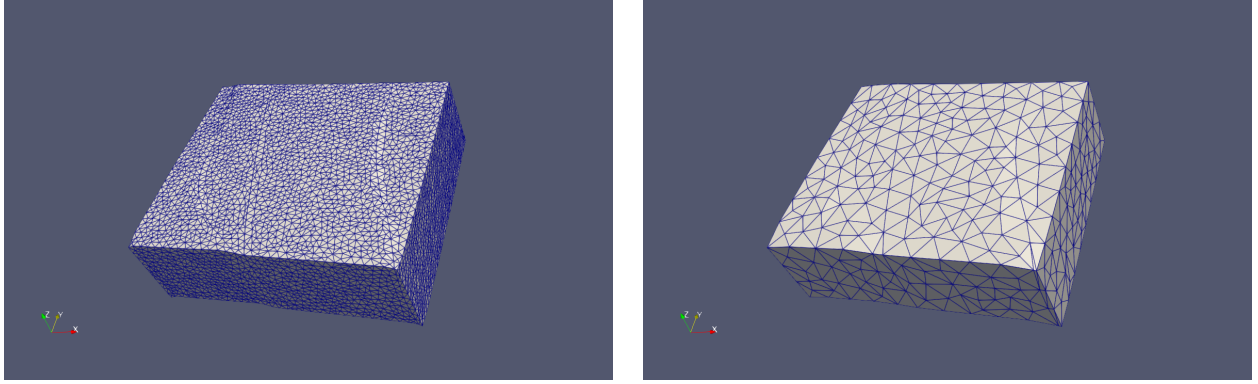
Dans un deuxième temps, on retrouve les résultats décrivant l'influence du couplage thermique sur la pression de pore autour du point d'injection ainsi que le profil de température autour du puits d'injection après 16 et 30 ans.

Finalement, l'évolution de la température au puits de production au cours du temps est présentée.

4.1 Raffinement du maillage

La détermination de la finesse du maillage constitue un élément crucial lors de la réalisation de simulations par la méthode des éléments finis. En effet, à mesure que la densité du maillage augmente, les divergences entre les résultats de la simulation et les observations réelles tendent à diminuer, mais cela s'accompagne d'une augmentation des ressources de calcul nécessaires. Dans cette section, plusieurs conditions de raffinement sont testées.

Dans MeshIt, la première étape consiste à créer des surfaces dotées d'un maillage triangulé, qui seront ensuite utilisées pour générer le modèle tridimensionnel final. En effet, les triangles constituent la base de chaque élément tétraédrique du maillage 3D résultant et la taille de leurs arêtes détermine la discrétisation spatiale de ce dernier. Ainsi, les différentes tailles d'arêtes choisies (et donc les raffinements) pour obtenir les résultats de cette section sont 150, 200, 250, 300, 400 et 500 m.



(a) Maillage avec des triangles de 150 m de côté. (b) Maillage avec des triangles de 500 m de côté.

FIGURE 4.1 – Comparaison entre deux conditions de raffinement.

La Figure 4.2 représente l'évolution pendant 10 jours de la pression de pore pour ces différents raffinements. On observe logiquement un rapprochement progressif des courbes avec la diminution de la taille des éléments du maillage, ce qui traduit une convergence des résultats.

Pour mieux observer cette tendance, la Figure 4.3 donne l'écart relatif, en pourcentage, entre la pression interstitielle obtenue au terme des 10 jours pour des éléments de 150 m de longueur et des éléments plus grands, jusqu'à 500 m. On constate une convergence car l'écart diminue significativement entre des éléments de 500 m et des éléments de 250 m puis se stabilise pour un maillage plus raffiné.

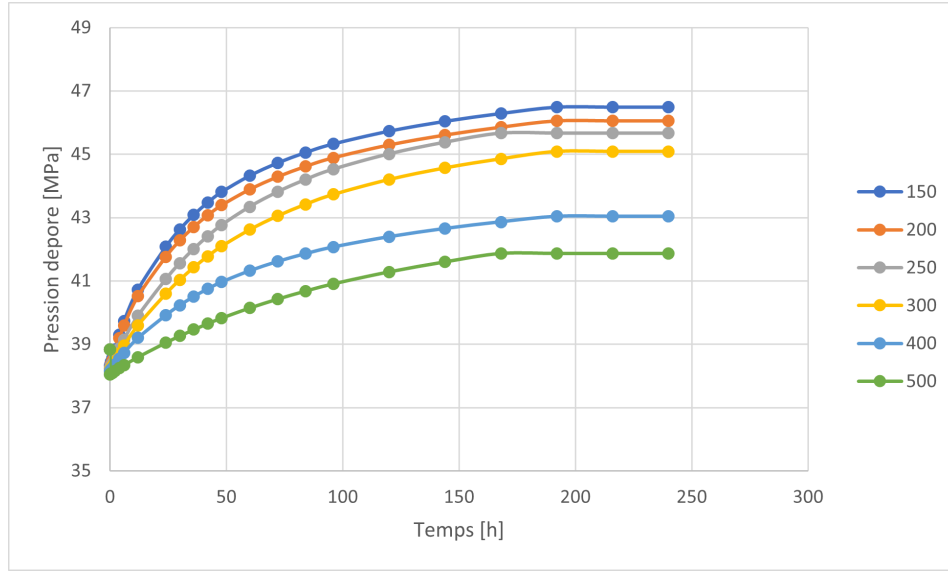


FIGURE 4.2 – Évolution de la pression de pore avec le temps pour des maillages dont les éléments varient de 150 à 500 m.

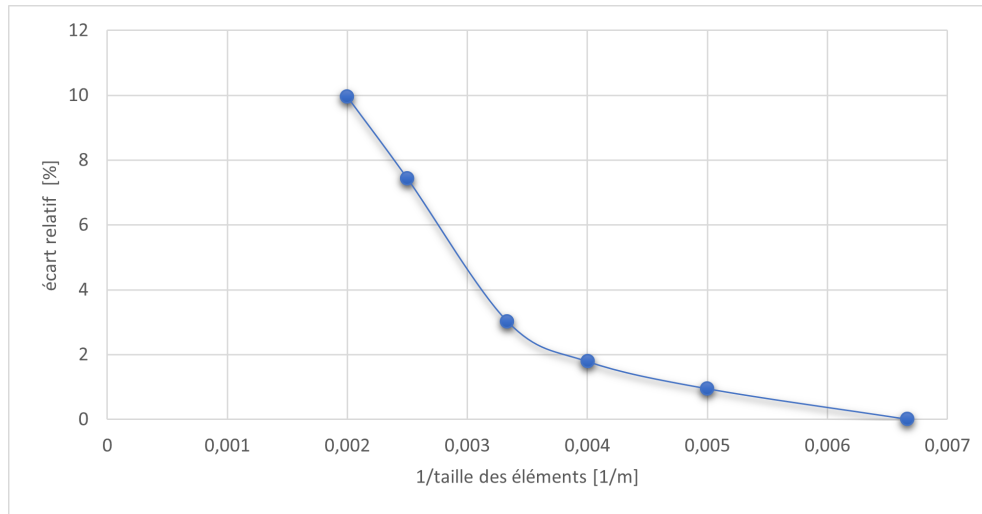


FIGURE 4.3 – Écart relatif par rapport à la pression de pore maximale calculée pour des éléments de 150 m.

De plus, afin de vérifier si ces changements de maillage affectent la dynamique d'évolution de la pression de pore et le régime permanent, il est utile de créer des courbes normalisées. Sur la Figure 4.4, l'axe des ordonnées représente ainsi la différence entre la pression de pore actuelle et la pression de pore initiale, exprimée en termes relatifs par rapport à la différence entre la pression de pore finale et la pression de pore initiale. On remarque que l'évolution relative de la pression de pore est sensiblement la même pour la plupart des conditions de raffinement, avec un écart plus marqué pour le maillage le plus grossier. Cela signifie que le temps caractéristique, c'est-à-dire le temps que le système met pour atteindre l'état d'équilibre, du système est relativement constant et peu affecté par les variations de maillage. En effet, le *steady-state* est obtenu entre 7 et 8 jours pour chaque simulation¹.

1. Calcul réalisé avec un ordinateur ACER Aspire et un processeur Intel I5-7200U 2 coeurs.

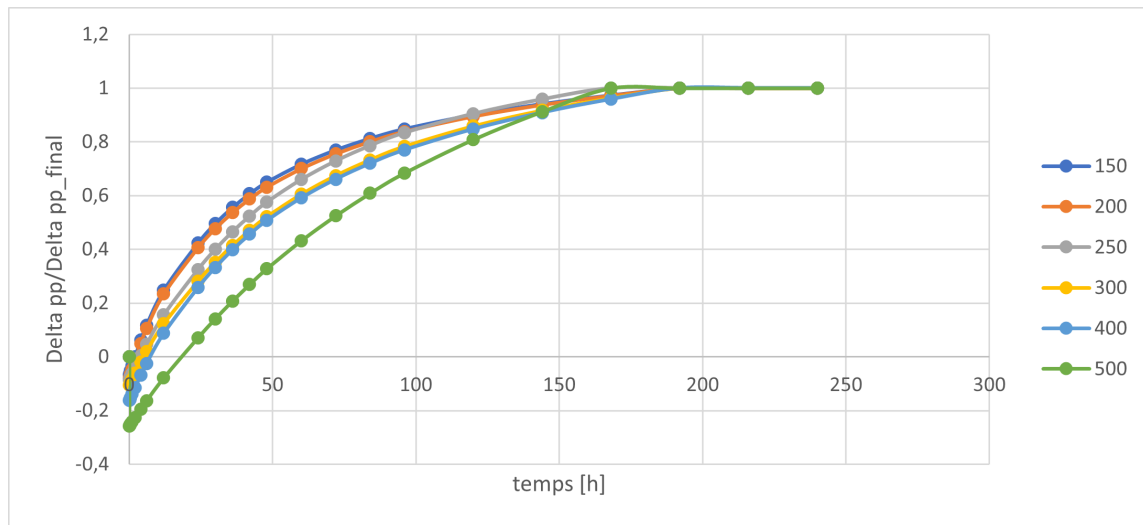


FIGURE 4.4 – Courbe normalisée de la pression de pore évoluant dans le temps pour différentes conditions de raffinement du maillage.

On remarque également des valeurs négatives car, au début, la pression de pore descend sous la valeur initiale imposée. Cela peut être dû, totalement ou en partie, au raffinement du maillage car ce phénomène est moins important pour des éléments plus petits, comme montré à la Figure 4.5 :

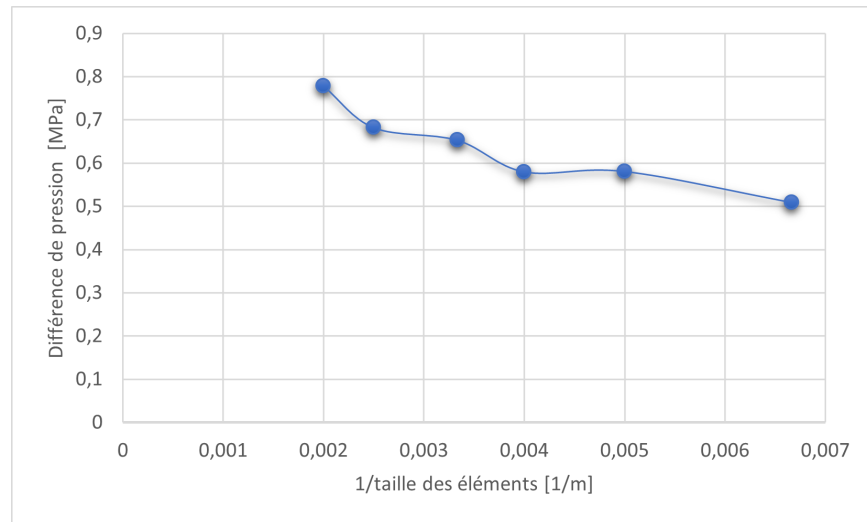


FIGURE 4.5 – Différence entre la pression de pore initiale et celle obtenue après 300 s.

Au vu des résultats obtenus, il semble raisonnable de continuer les analyses avec un maillage dont les éléments font 250 m. En effet, c'est à partir de cette taille que la convergence des valeurs de pression est observée et le temps de calcul est d'environ 2h pour une simulation avec 24 intervalles de temps. Ce temps augmente considérablement pour un maillage plus fin, allant jusqu'à plusieurs dizaines d'heures pour des éléments de 150 m².

2. Calcul réalisé avec un ordinateur ACER Aspire et un processeur Intel I5-7200U 2 coeurs.

4.2 Analyse paramétrique

4.2.1 Perméabilité

En se basant sur les intervalles de valeurs du Tableau 3.1, nous pouvons déterminer un intervalle de valeur à tester pour l'analyse de cette section. Sur la Figure 4.6, on peut observer l'évolution de la pression de pore pendant 10 jours pour différentes des perméabilités égales à 10^{-16} , 5×10^{-16} , 10^{-15} , 5×10^{-15} , 10^{-14} et 10^{-13} , mise en comparaison avec la courbe de pression de pore de VITO.

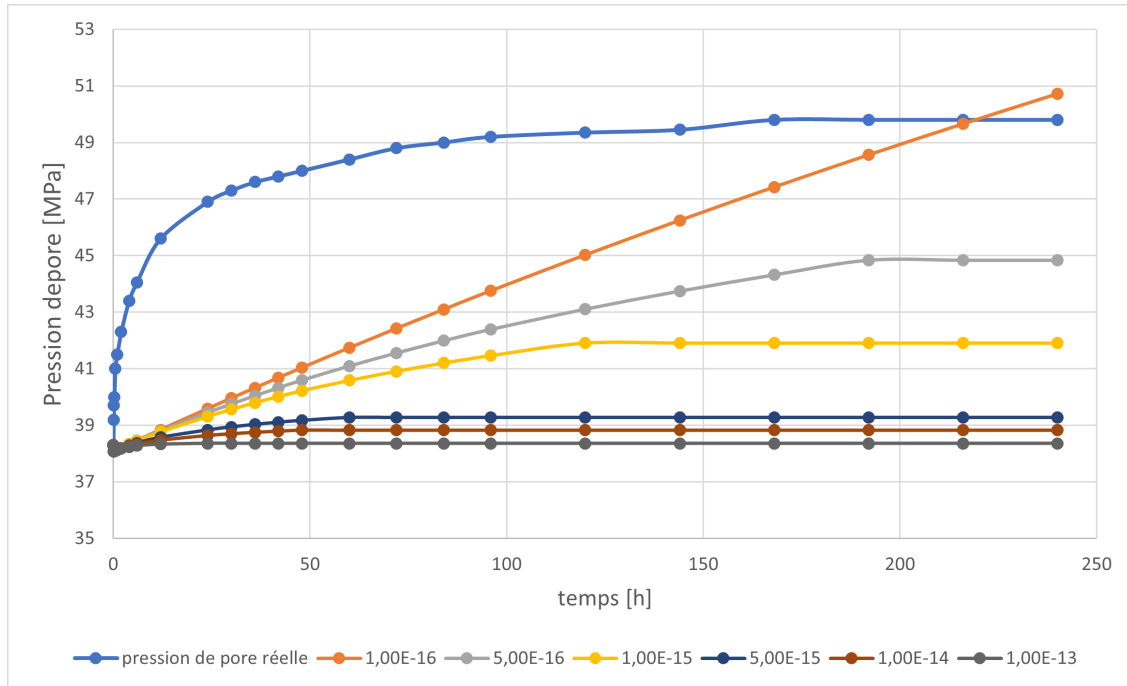


FIGURE 4.6 – Évolution de la pression de pore avec le temps pour différentes perméabilités.

D'après ce graphe, si la perméabilité diminue, la valeur maximale de pression interstitielle augmente et le régime permanent est atteint plus tard, ce qui correspond bien à nos attentes. En effet, pour une faible perméabilité, le fluide injecté a du mal à se déplacer à travers la matrice rocheuse, ce qui conduit à une accumulation de pression interstitielle.

Ces observations sont quantifiées dans le tableau 4.2, qui donne les valeurs de la pression de pore maximale ainsi que le temps nécessaire pour atteindre le régime permanent pour chaque perméabilité testée (excepté pour $10^{-16} m^2$ qui n'a pas atteint un régime stable après 10 jours).

Perméabilité [m ²]	Pression de pore max [MPa]	Stabilisation temporelle [h]
5×10^{-16}	44.84	192
10^{-15}	41.91	120
5×10^{-15}	39.27	60
10^{-14}	38.83	48
10^{-13}	38.36	24

TABLE 4.2 – Pression de pore maximale et temps pour atteindre le régime permanent pour différentes perméabilités.

Le graphique présenté à la Figure 4.7 vient compléter cette analyse en mettant en évidence l'impact de la perméabilité sur la pression de pore en régime permanent. Il présente une échelle logarithmique pour mieux visualiser les valeurs de perméabilité.

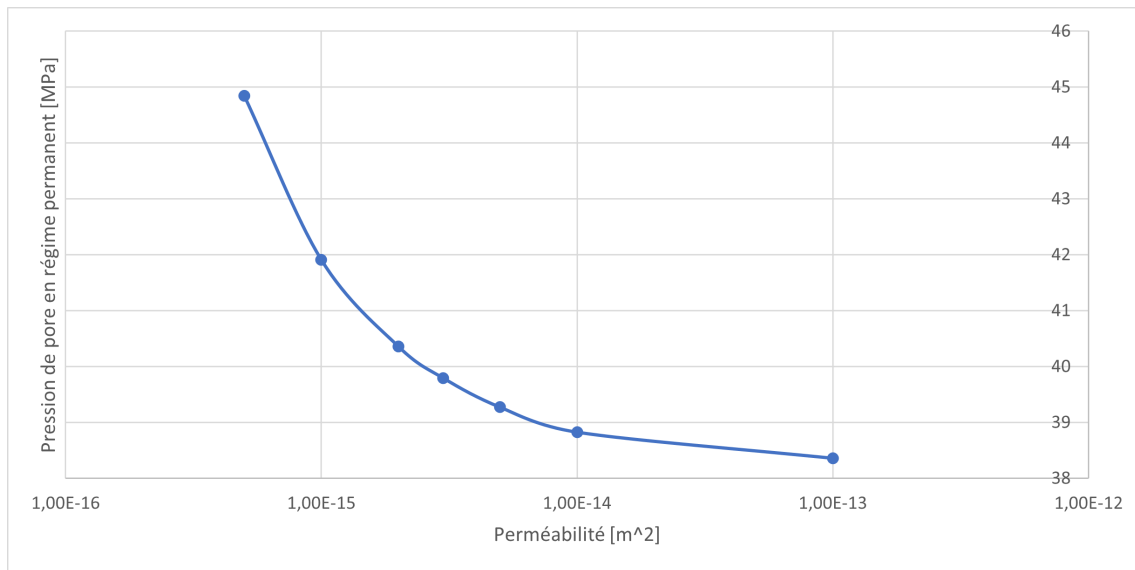


FIGURE 4.7 – Influence de la perméabilité (échelle logarithmique) sur la pression de pore maximale.

L'évolution que l'on peut observer est fortement non linéaire avec une décroissance lorsque la perméabilité augmente de 5×10^{-16} à 10^{-14} m² puis une stabilisation lorsqu'elle passe à 10^{-13} m².

4.2.2 Porosité

La pression interstitielle est également influencée par la porosité du milieu. En effet, comme illustré à la Figure 4.8, lorsque la porosité est plus basse, la pression de pore finale est plus élevée. Cela traduit une accumulation de pression plus importante à cause du manque d'espace du fluide. Cette figure montre aussi que les courbes obtenues pour ces choix de paramètres sont très éloignées de la courbe présentée dans la section 3.2.2.

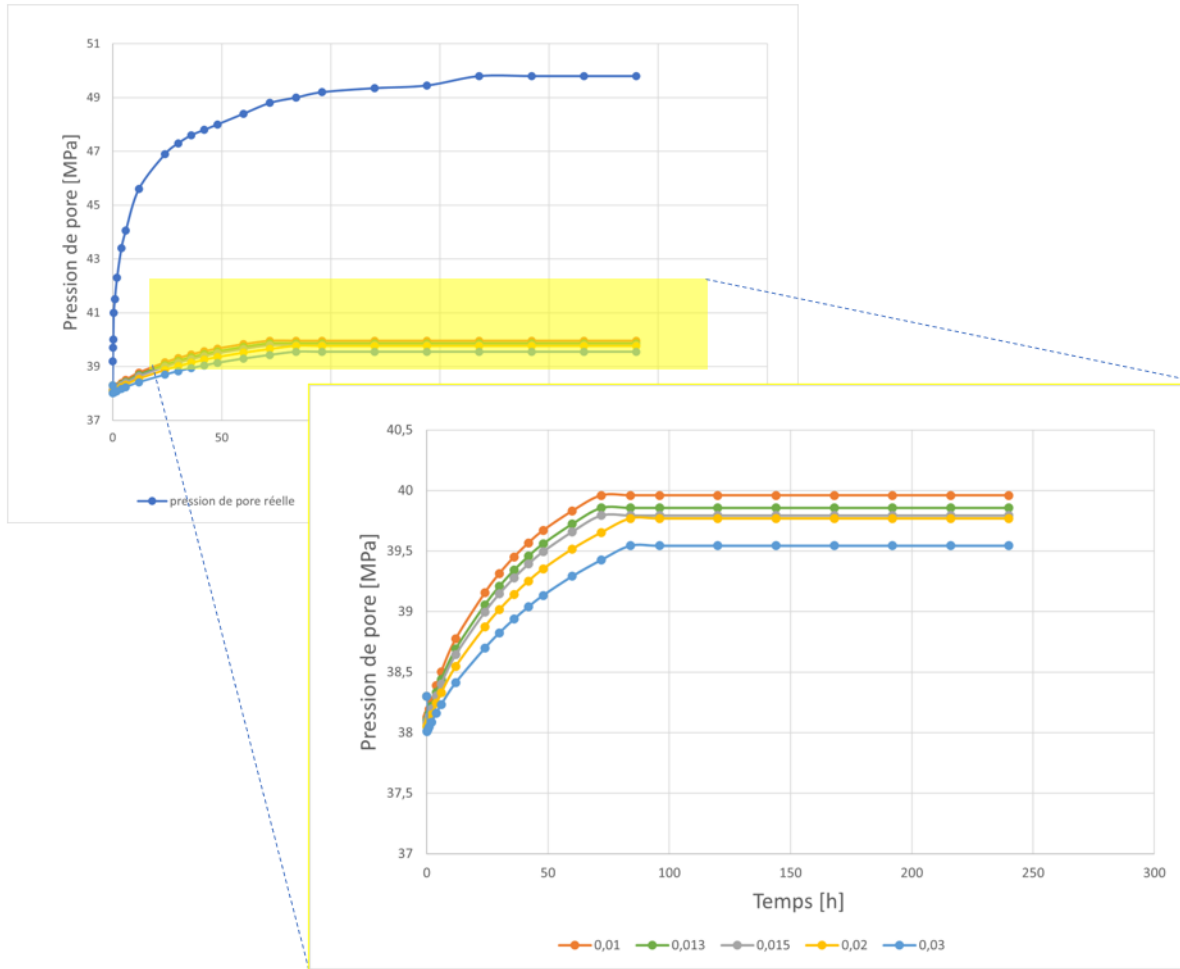


FIGURE 4.8 – Influence de la porosité sur l'évolution de la pression interstitielle.

La relation entre les porosités étudiées et la pression de pore maximale correspondante a une tendance inversement proportionnelle, comme on peut l'observer à la Figure 4.9. Le coefficient de détermination R^2 qui y est indiqué permet de donner une indication sur la fiabilité de la régression linéaire. S'il est proche de 1, cela suggère que le modèle est approprié et bien ajusté aux données. Dans ce cas-ci, R^2 est, en effet, proche de 1 puisqu'il vaut 0.96.

Cependant, il est important de noter que R^2 ne garantit pas que le modèle linéaire est approprié et d'autres indicateurs devraient être utilisés pour évaluer avec plus de précision la validité et la pertinence du modèle de régression. Il s'agit donc d'une première indication.

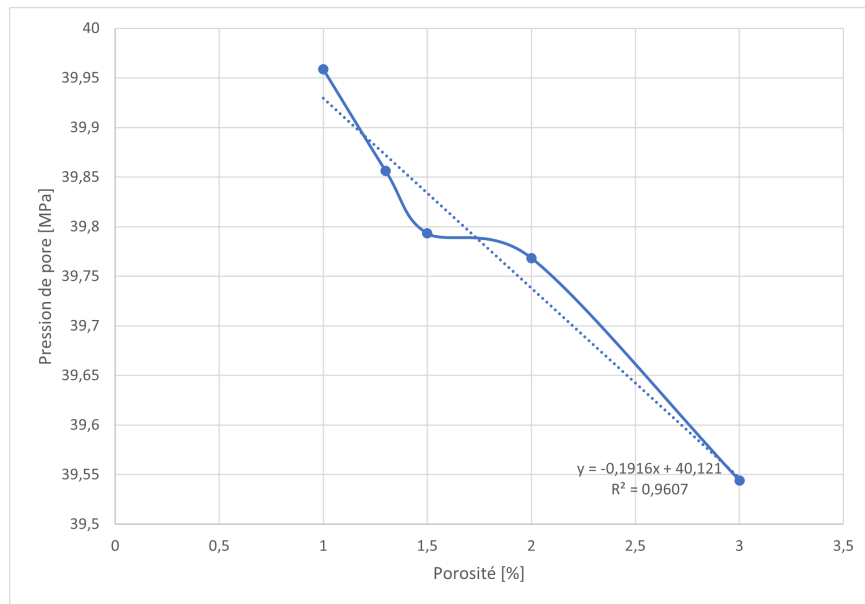


FIGURE 4.9 – Relation entre la porosité et la pression de pore en régime permanent.

Le dernier graphe montre l'écart relatif entre la pression de pore finale pour une porosité de 1% et celle atteinte avec d'autres porosités.

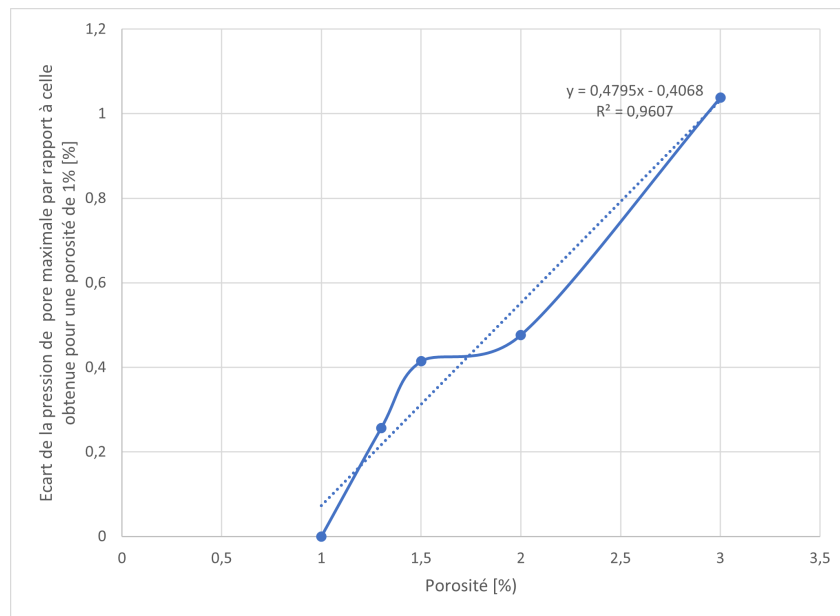


FIGURE 4.10 – Écart de la pression de pore maximale pour différentes porosités par rapport à celle obtenue pour une porosité de 1%.

On remarque qu'il y a un écart de 1% entre la pression de pore maximale obtenue pour une porosité de 1% et celle obtenue pour une porosité de 3% (pour une perméabilité de 3×10^{-15}).

Finalement, le Tableau 4.3 permet de montrer qu'une augmentation de la porosité retarde légèrement le moment où le régime permanent est atteint. Cet effet n'est pas marqué mais cela peut être lié à la plage étroite de valeurs de porosité étudiées.

Porosité [%]	Pression de pore max [MPa]	Stabilisation temporelle [h]
1	39.96	72
1.5	39.86	72
2	39.79	72
2.5	39.77	84
3	39.54	84

TABLE 4.3 – Pression de pore maximale et temps pour atteindre le régime permanent pour différentes porosités.

4.2.3 Débit d'injection

Les débits d'injection testés sont 18.05, 20.83, 23.61, 26.39 et 29.17 kg/s. Augmenter le débit d'injection augmente logiquement la pression de pore atteinte au steady state. C'est effectivement ce qu'on observe sur la Figure 4.11.

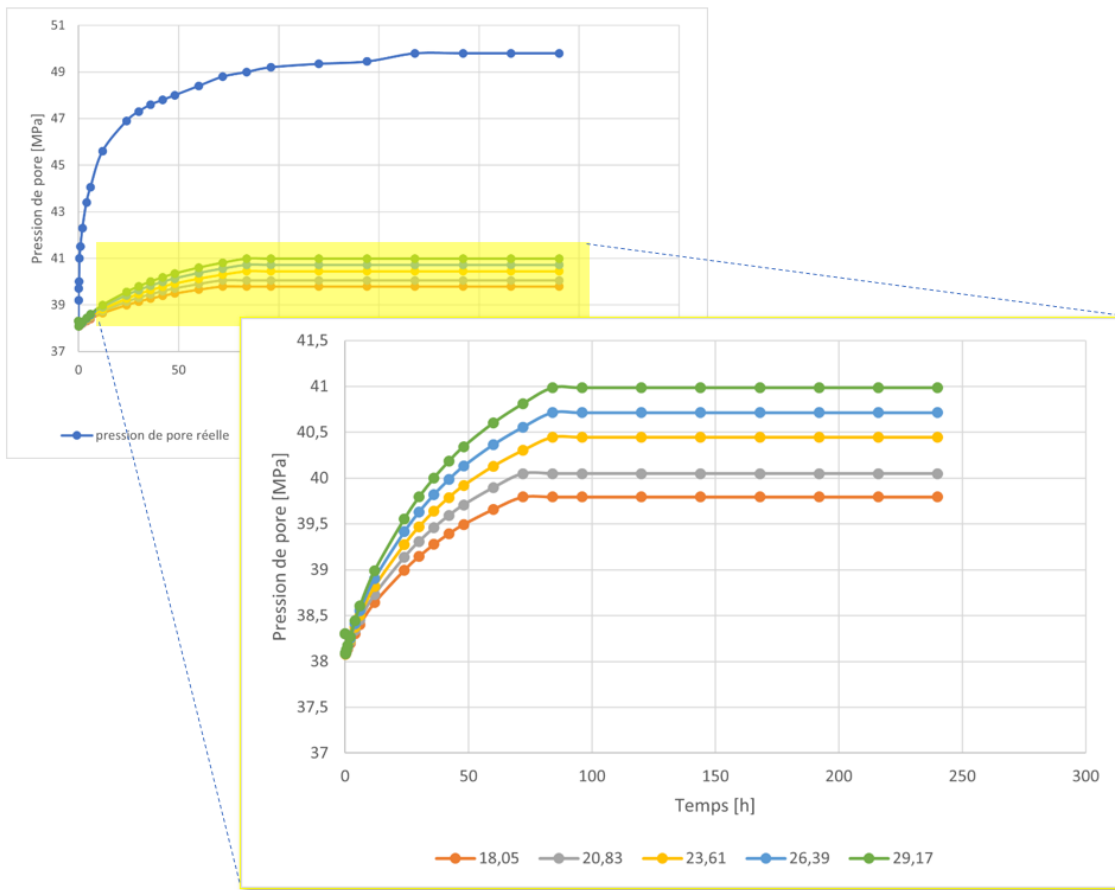


FIGURE 4.11 – Influence du débit sur l'évolution de la pression de pore.

La relation entre le débit et la pression atteinte en régime permanent est représentée à la Figure 4.12. La régression linéaire indique un coefficient de détermination R^2 de 0.99, ce qui signifie qu'elle est en adéquation avec les données de pression interstitielle. La pression de pore finale est donc quasi proportionnelle au débit.

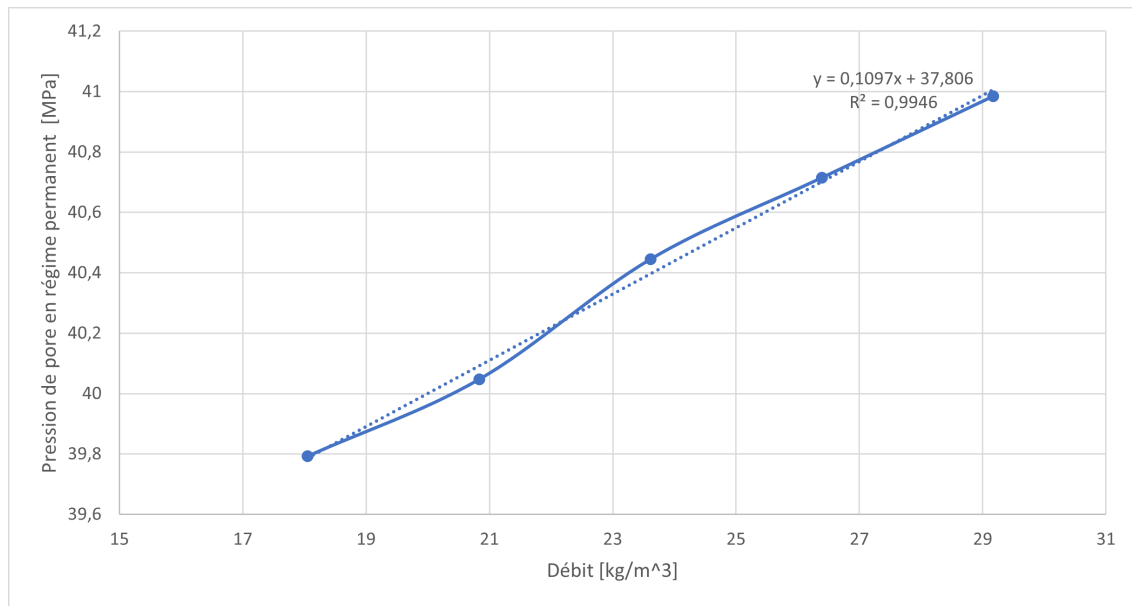


FIGURE 4.12 – Relation entre le débit et la pression de pore finale.

Finalement, on peut remarquer dans le Tableau 4.4 que le système se stabilise légèrement plus tard lorsque qu'on augmente le débit.

Débit [kg/s]	Pression de pore max [MPa]	Stabilisation temporelle [h]
18.05	39.79	72
20.83	40.05	72
23.61	40.45	84
26.39	40.71	84
29.17	40.98	84

TABLE 4.4 – Pression de pore maximale et temps pour atteindre le régime permanent pour différents débits.

4.2.4 Coefficient de Biot

Le coefficient de Biot a un effet à la fois sur la pression interstitielle et sur les contraintes effectives. Cette section présente donc, dans un premier temps, cette première influence, comme on peut l'observer à la Figure 4.13, où les valeurs de coefficient testées sont 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 et 1. D'après ce graphe, l'augmentation du coefficient de Biot entraîne une augmentation de la pression de pore maximale et une durée plus importante avant d'atteindre le régime stable. En effet, la valeur du coefficient de Biot influence la déformation du squelette solide et donc les variations de pression des fluides.

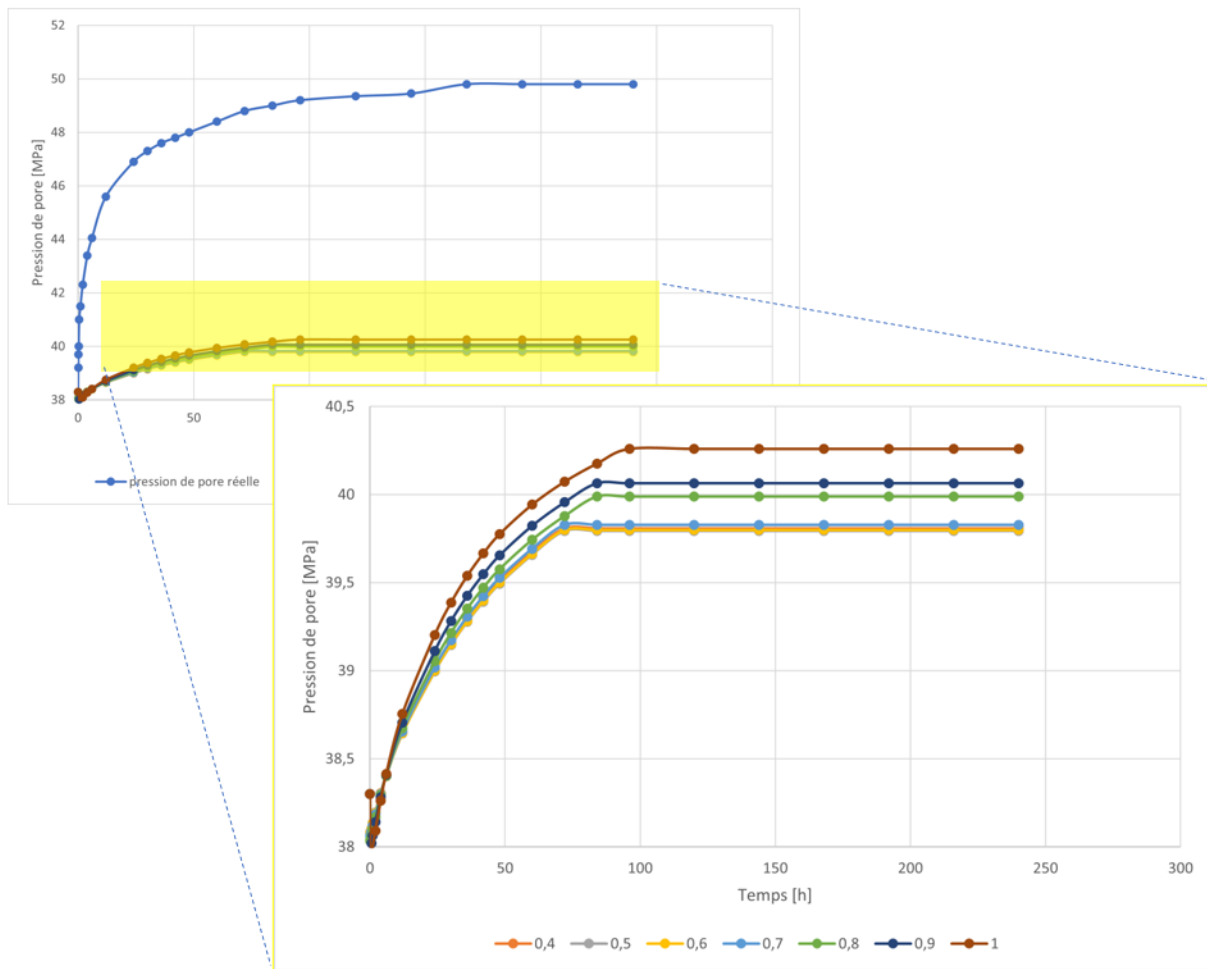


FIGURE 4.13 – Influence du coefficient de Biot.

On remarque, à nouveau, des courbes de pressions de pore très éloignées de la courbe réelle.

De plus, si l'on étudie, grâce à la Figure 4.14, l'écart relatif entre la pression de pore atteinte en régime permanent pour différents coefficients et celle obtenue pour un coefficient de 0.4, on peut remarquer plusieurs phénomènes. Premièrement, entre 0.4 et 0.6, il y a un plateau. Cela signifie que les pressions de pore finales sont sensiblement les mêmes pour cet intervalle de valeurs. Ensuite, l'influence du coefficient de Biot sur cette pression de pore suit une tendance linéaire, avec un R^2 égal à 0.95.

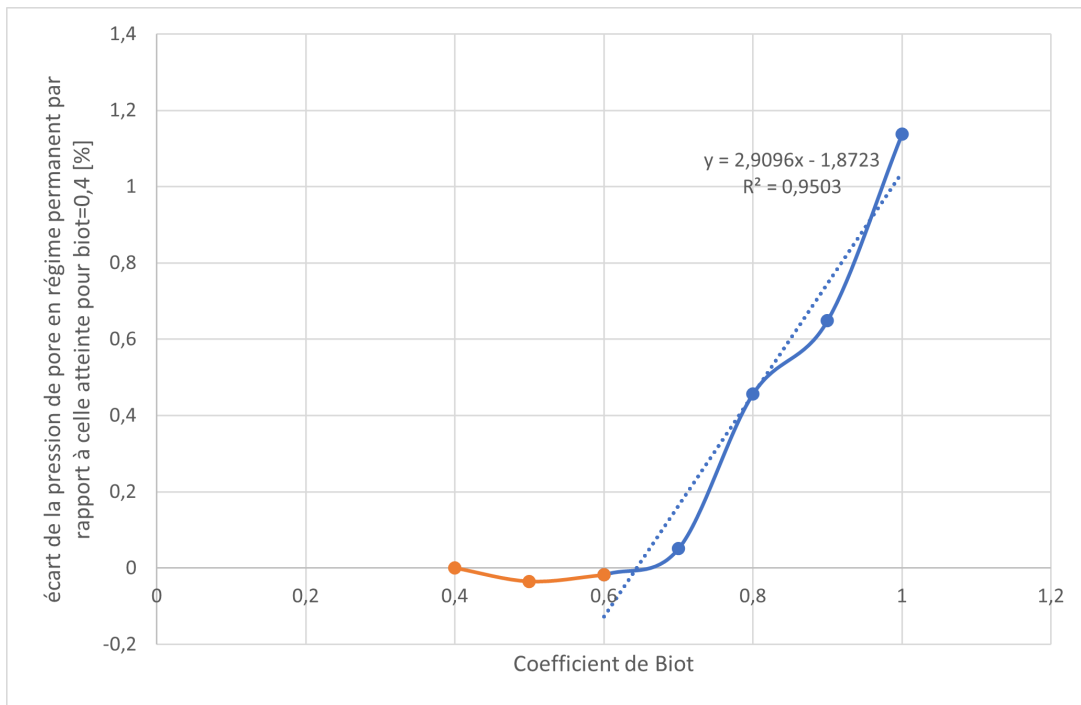


FIGURE 4.14 – Écart de la pression de pore maximale pour différents coefficients de Biot par rapport à celle obtenue pour un coefficient de Biot de 0.4.

Pour finir, le Tableau 4.5 rassemble les valeurs de pression de pore maximale et le temps pour atteindre le régime permanent pour différentes porosités. Il permet de mettre en évidence l'impact du coefficient de Biot sur ce dernier. Effectivement, plus le coefficient de Biot, et donc la pression de pore maximale, est élevé, plus le régime permanent arrive tard.

Coefficient de Biot [/]	Pression de pore max [MPa]	Stabilisation temporelle [h]
0.4	39.8	72
0.5	39.79	72
0.6	39.8	72
0.7	39.83	72
0.8	39.99	84
0.9	40.07	84
1	40.26	96

TABLE 4.5 – Pression de pore maximale et temps pour atteindre le régime permanent pour différentes porosités.

Dans un deuxième temps, la relation entre le coefficient de Biot et les contraintes effectives est présentée via la Figure 4.15

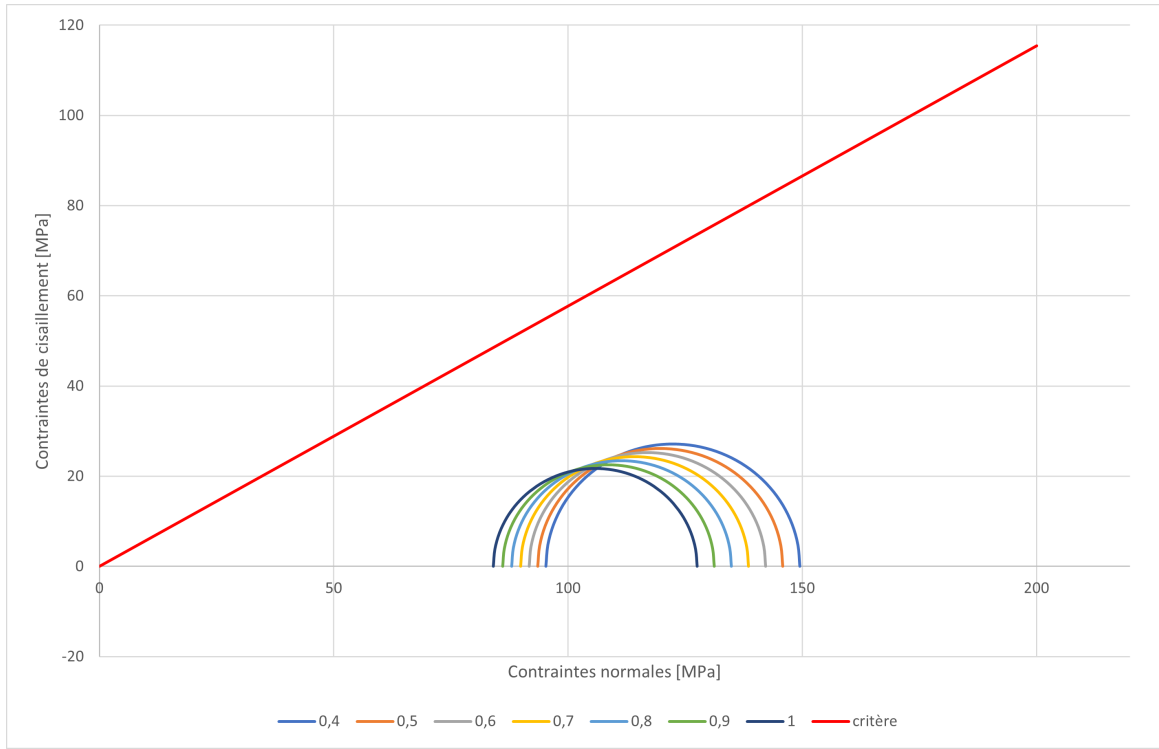


FIGURE 4.15 – Cercle de Mohr pour différents coefficients de Biot et critère de Mohr Coulomb (rouge).

Elle met en évidence qu’une augmentation du coefficient de Biot mène à une diminution des contraintes effectives en régime permanent. De plus, on observe que la différence entre la contrainte effective maximale et la contrainte effective minimale se réduit, car le rayon des cercles diminue. Les relations ci-dessous permettent de comprendre comment cette différence, c’est-à-dire $\sigma'_v - \sigma'_h$ est influencée par le coefficient de Biot :

$$\begin{aligned}
 \sigma'_v &= \sigma_v - \alpha \rho_f \\
 \sigma'_h &= K_h \sigma'_v \\
 \sigma'_v - \sigma'_h &= (1 - K_h) \sigma'_v = (1 - K_h) (\sigma_v - \alpha \rho_f)
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

La Figure 4.16 permet de voir quel système est le moins stable via le critère de MC qui, pour rappel, devient positif dans la zone d’instabilité. Plus le coefficient de Biot est important, plus le critère de MC est élevé. La relation entre ces deux paramètres est proportionnelle puisque R^2 est très proche de l’unité (0.997).

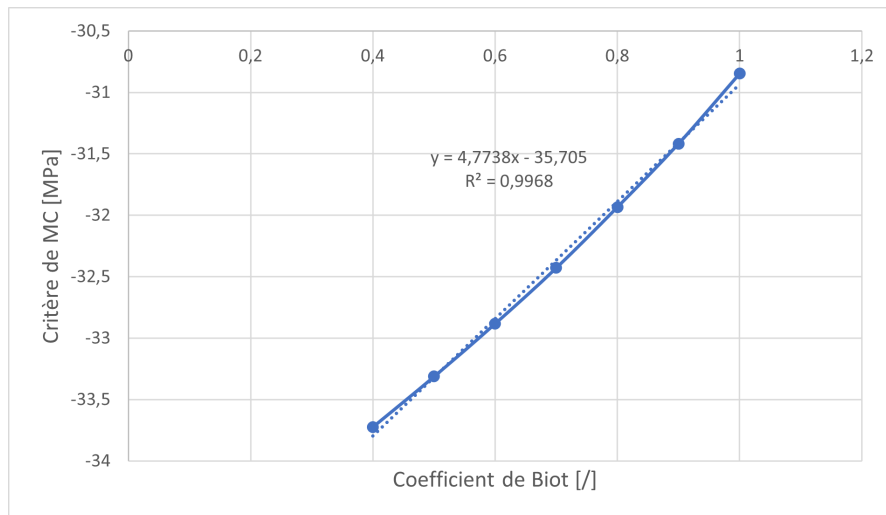


FIGURE 4.16 – Relation entre le coefficient de Biot et le critère de MC.

4.2.5 Masse volumique de la roche

La masse volumique de la réponse de la roche via un changement de contrainte effective verticale. En effet, une roche plus dense subit une contrainte effective verticale initiale plus importantes, puisque $\sigma_v = \rho g z$, et résiste mieux au cisaillement. La Figure 4.17 traduit cette relation par des cercles qui se déplacent vers la droite du graphe pour des densités plus élevées. Ceux-ci s'éloignent alors progressivement de la droite de Mohr-Coulomb.

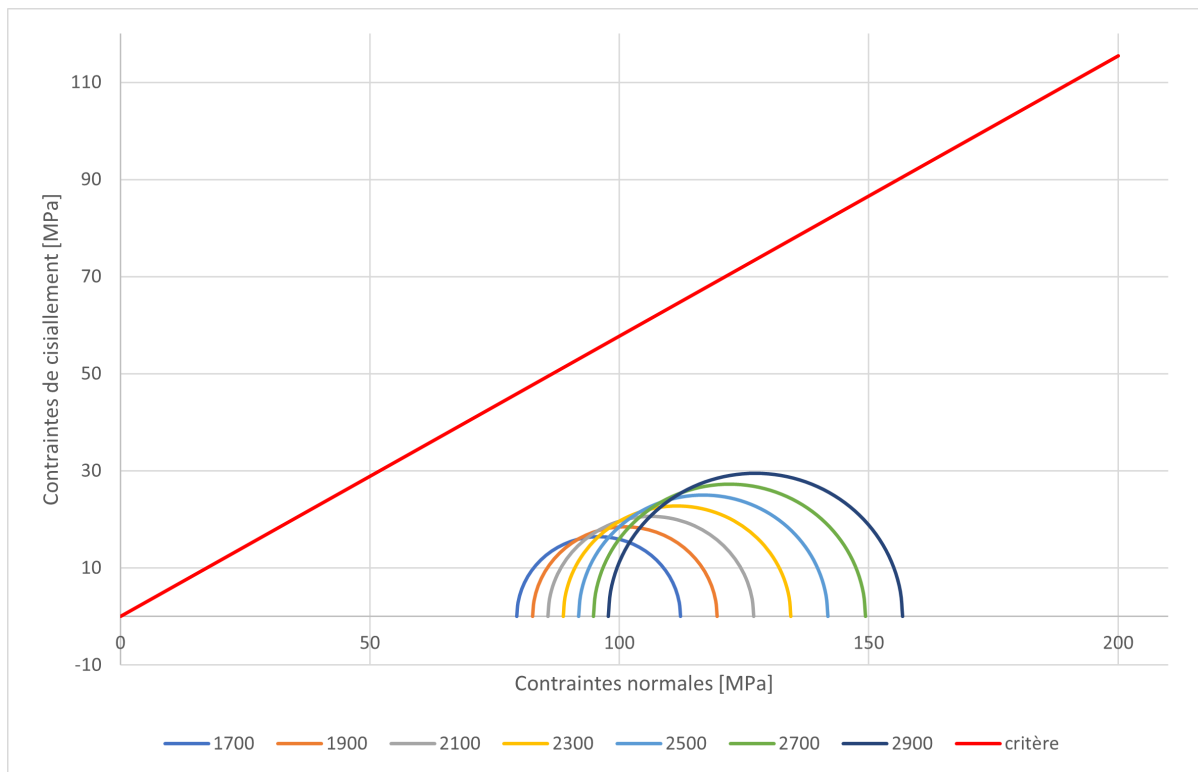


FIGURE 4.17 – Cercles de Mohr pour différentes masses volumiques et critère de Mohr Coulomb (rouge).

À nouveau, on retrouve une relation linéaire ($R^2=0.99$) entre la masse volumique et le critère de Mohr Coulomb mais, cette fois, inversement proportionnelle. En effet, une augmentation de la masse volumique provoque une diminution du critère de MC. Ceci est illustré dans la Figure 4.18.

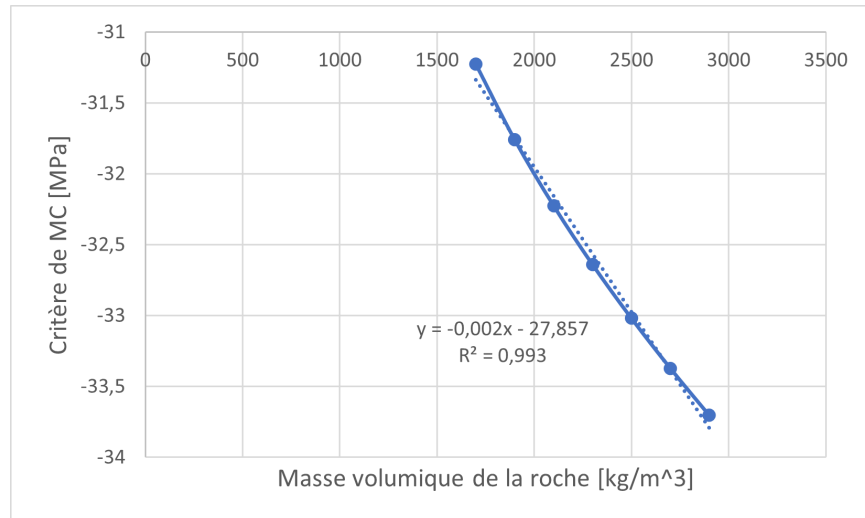


FIGURE 4.18 – Relation entre le critère de MC et la masse volumique de la roche.

4.2.6 Coefficient de poussée au repos $K_{0,h}$

Les coefficients de poussée au repos $K_{0,h}$ et $K_{0,H}$ influencent directement les contraintes effectives appliquées au réservoir car il s'agit du rapport des contraintes horizontales (maximales et minimales) sur la contrainte verticale. Pour rappel, dans cette étude, le coefficient $K_{0,H}$ est fixe et vaut 0.39 tandis que $K_{0,h}$ prend les valeurs de 0.39, 0.35, 0.25, 0.2 et 0.15. Par conséquent, c'est la contrainte horizontale σ_3 qui est affectée, comme on peut l'apercevoir sur la Figure 4.19.

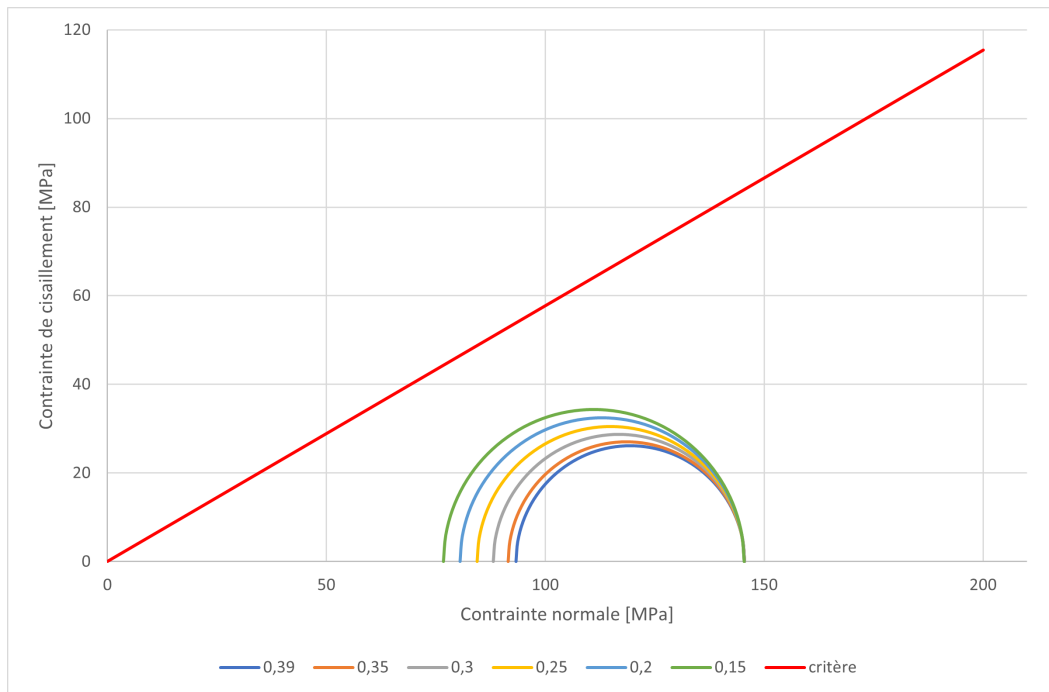


FIGURE 4.19 – Cercles de Mohr pour différents coefficients $K_{0,h}$ et critère de Mohr Coulomb (rouge).

Il en découle qu'une augmentation du coefficient $K_{0,h}$ entraîne une diminution du critère de MC, et ce, de manière linéaire ($R^2=0.99$), comme on le remarque sur la Figure 4.20.

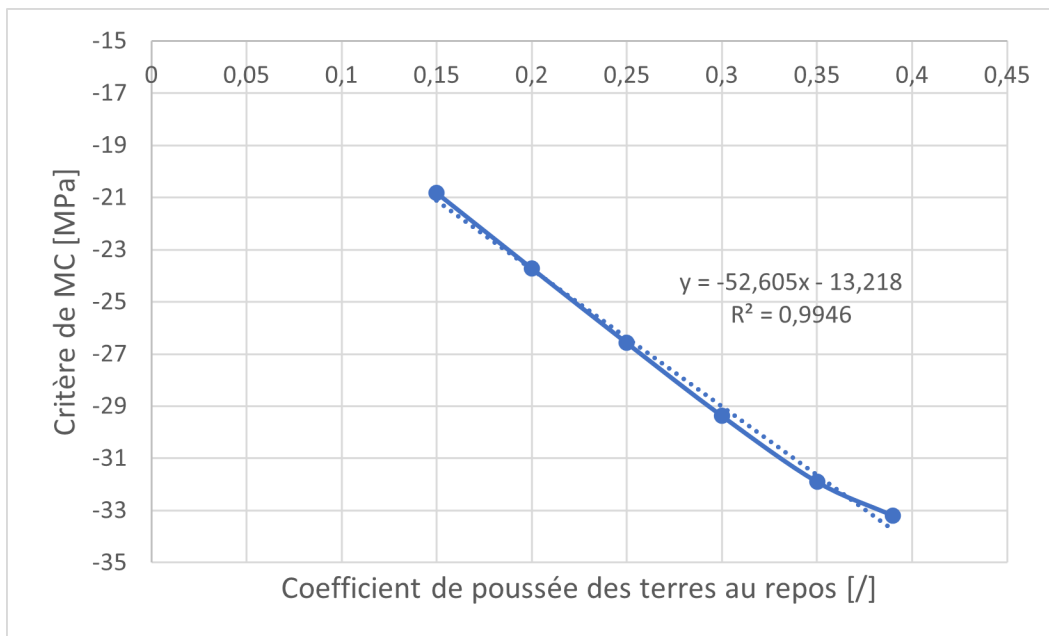


FIGURE 4.20 – Relation entre le coefficient $K_{0,h}$ et le critère de MC.

4.3 Profil de pression interstitielle au point d'injection avec et sans couplage thermique.

La prise en compte de la température dans le calcul de la pression interstitielle a un impact sur les résultats obtenus. La Figure 4.21 illustre ceci, avec le profil de pression de pore en régime permanent le long d'un axe x (représenté à la Figure 4.22) passant par le puits d'injection, en régime permanent. L'augmentation de la pression de pore de part et d'autre du puits d'injection se fait, avec ces paramètres, sur une distance d'un peu plus d'1 km.

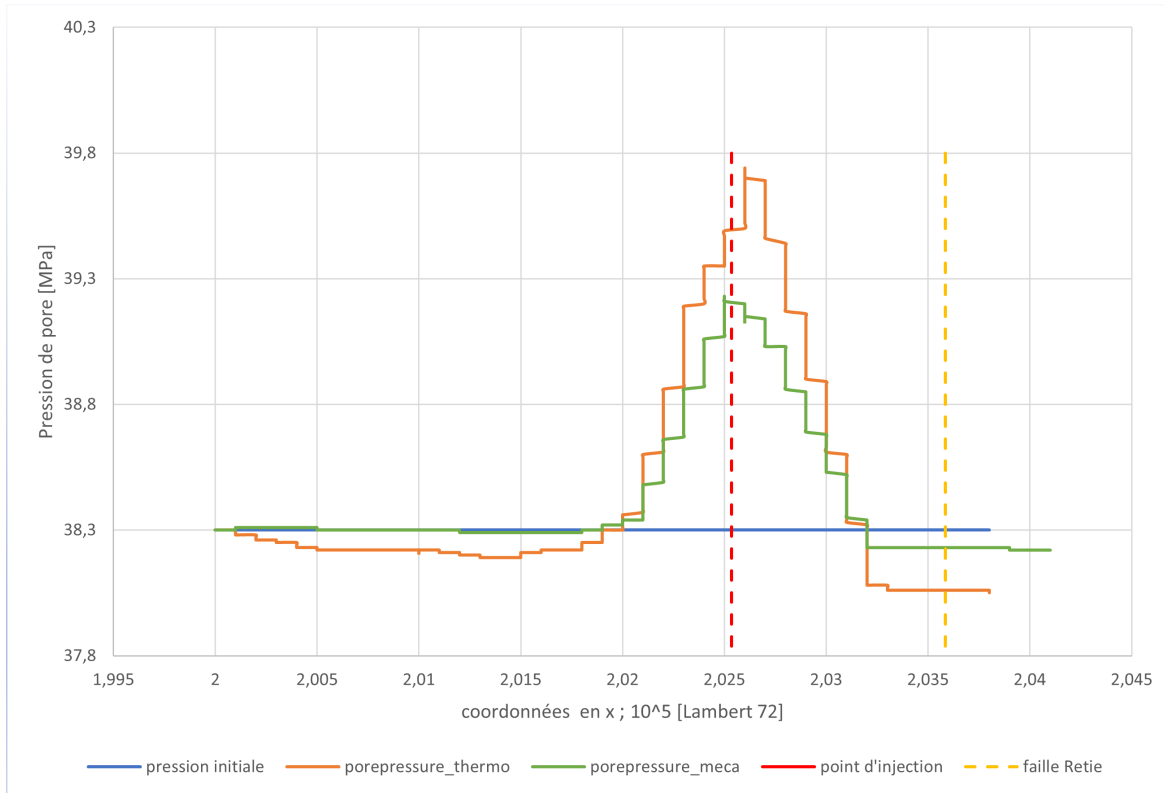


FIGURE 4.21 – Profil de pression de pore le long d'une direction x passant par le centre du puits d'injection, avec (porepressure-thermo) et sans couplage thermique (porepressure-meca), en régime permanent.

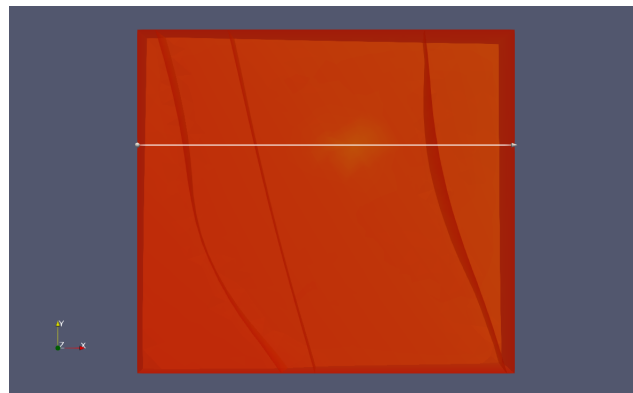


FIGURE 4.22 – Axe du profil de pression.

On observe également une dissymétrie du profil, qui peut, peut-être, s'expliquer par la présence du puits de production (qui se trouve en bas à gauche dans le plan x-y). En effet, celui-ci qui pompe le fluide, libérant une partie de la pression de pore au puits d'injection. De plus, avec le couplage thermique, la pression de pore descend en dessous de sa valeur initiale sur plusieurs kilomètres de part à d'autre de la zone où elle augmente.

4.4 Profil de température au point d'injection

Suite à l'injection de fluide froid dans la roche poreuse chaude, la température de celle-ci va tendre à diminuer avec le temps. La comparaison entre les profils de température autour du puits d'injection après 16 ans et 30 ans d'injection a été réalisée à la Figure 4.23, avec le même axe x que précédemment.

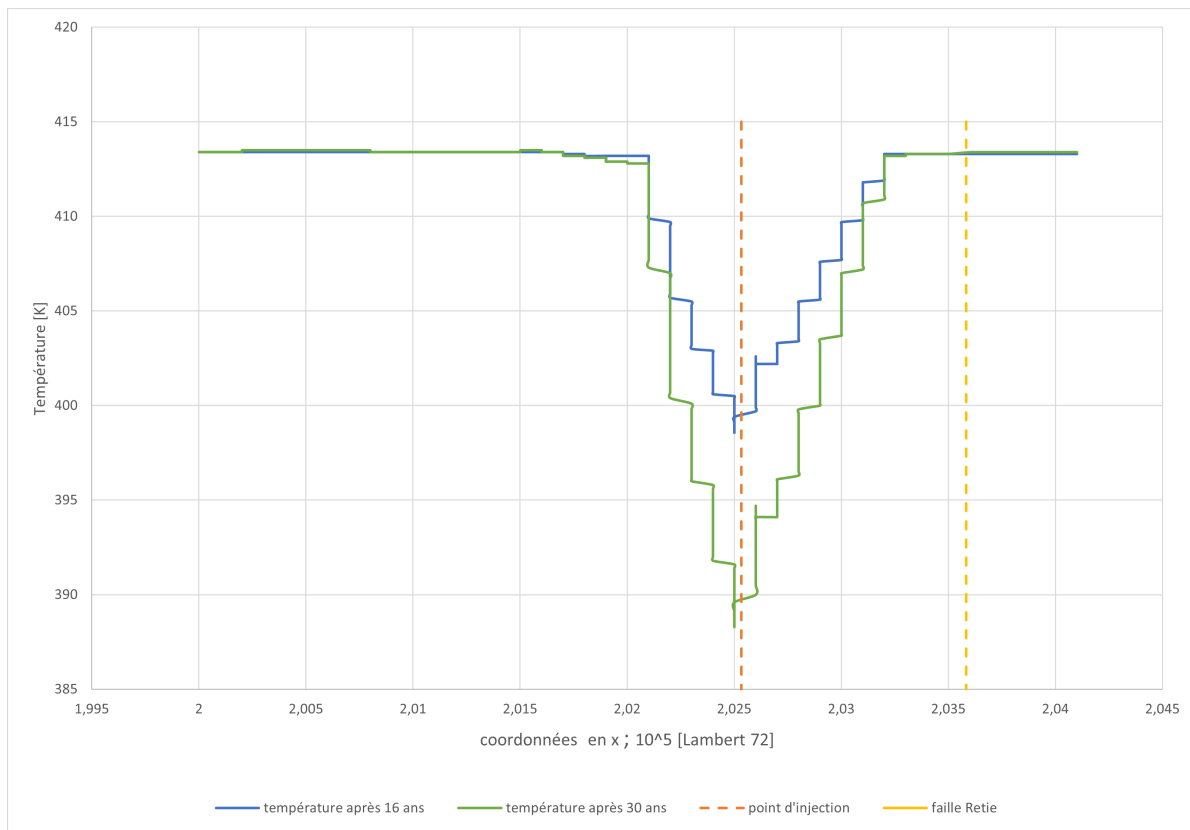


FIGURE 4.23 – Profil de température au point d'injection après 16 ans et après 30 ans.

A nouveau, on remarque une dissymétrie du profil et une distance d'influence d'environ 1 km.

4.5 Température au puits de production

Comme expliqué dans le chapitre consacré au *thermal breakthrough*, l'exploitation du réservoir entraîne, au bout d'un certain temps, la diminution de la température du réservoir au puits de production. Cette diminution se faisant après plusieurs années, le pas de temps doit être adaptatif, c'est-à-dire, plus petit au début qu'à la fin de la simulation.

Grâce à l'aide du Dr. A. Jacquey, qui a modifié le fichier d'entrée initial en apportant plusieurs améliorations, la simulation suivante a pu être réalisée. L'axe du temps est représenté selon une échelle logarithmique.

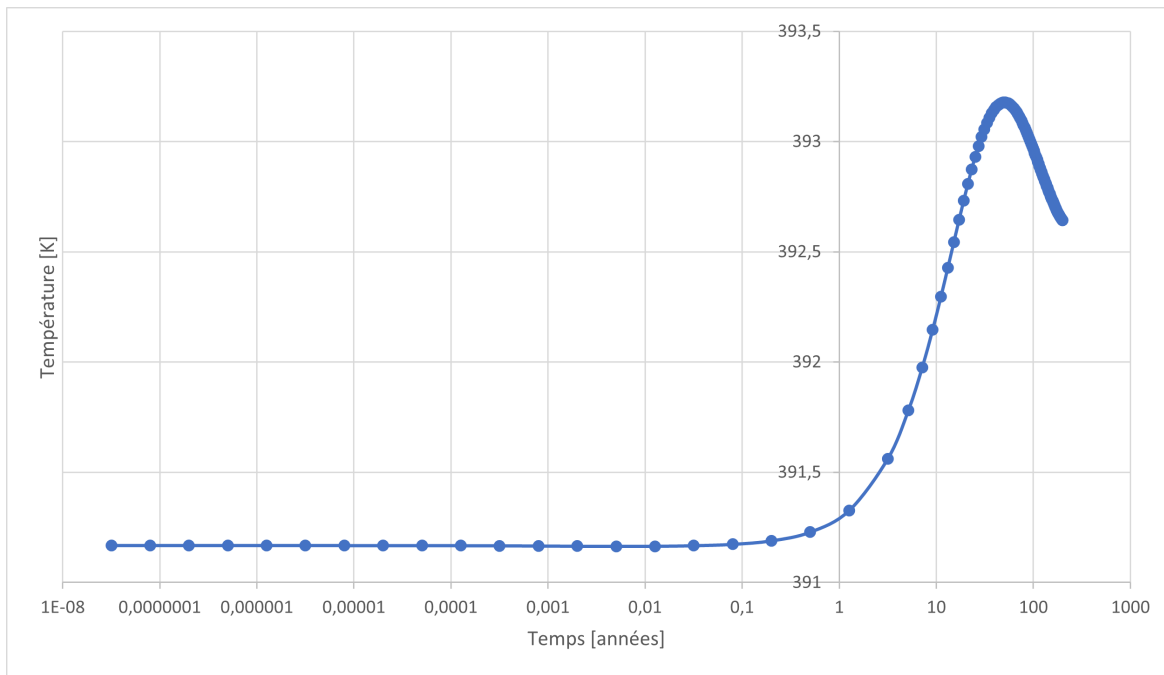


FIGURE 4.24 – Évolution de la température au point de production au cours du temps.

On observe une valeur stable de la température pendant les premiers mois (environ 4 mois) d'exploitation, puis une augmentation de 2 K jusqu'à environ 55 ans. Ensuite la température diminue mais ne descend pas en dessous de la température initiale, même après 200 ans de production simulée.

Chapitre 5

Discussion

Grâce au modèle 3D utilisé dans cette étude, plusieurs résultats ont été obtenus. Cette section établit une discussion autour de ceux-ci.

5.1 Analyse paramétrique

Premièrement, l'analyse de l'influence de la perméabilité, de la porosité, du débit d'injection et du coefficient de Biot sur la pression de pore a été réalisée. Le Tableau 5.1 résume, grâce à des flèches, l'influence globale d'une augmentation de chaque paramètre sur la pression de pore en régime permanent et sur le temps qu'il faut pour atteindre ce dernier. Ces résultats sont à considérer en tenant compte des fenêtres de valeurs utilisées et toute extrapolation devrait être faite après précaution.

Paramètres	Pression de pore max	Stabilisation temporelle
Perméabilité	↓	↓
Porosité	↓	↑
débit d'injection	↑	↑
Coefficient de Biot	↑	↑

TABLE 5.1 – Résumé de l'influence de chaque paramètre sur l'évolution de la pression de pore.

Ces résultats sont cohérents puisqu'une augmentation de la perméabilité ou de la porosité diminue la pression du fluide dans les pores de la roche. En effet, dans le premier cas le fluide pourra circuler plus librement à travers la roche et dans l'autre cas le fluide aura plus de volume disponible, ce qui limitera l'accumulation de la pression interstitielle. Au contraire augmenter le débit d'injection, et donc le volume de fluide, la fera augmenter. L'augmentation du coefficient de Biot entraîne également une augmentation de la pression de pore car un coefficient de Biot plus élevé signifie que les déformations du squelette solide sont transférées aux pores du matériau de manière plus importante.

Deuxièmement, l'étude de l'impact du coefficient de Biot, de la masse volumique de la roche ainsi que du coefficient de poussée des terres au repos sur le critère de Mohr-Coulomb a permis de réaliser le Tableau 5.2, dont la forme est similaire au tableau précédent :

Paramètres	critère de MC
Coefficient de Biot	↑
Masse volumique de la roche	↓
Coefficient $K_{0,h}$	↓

TABLE 5.2 – Résumé de l'influence de chaque paramètre sur le critère de Mohr Coulomb.

À nouveau, ces résultats sont logiques. Comme montré dans le chapitre des résultats avec l'équation 4.1, augmenter le coefficient de Biot diminue les contraintes effectives, rapprochant la roche de la rupture. Cela se traduit pas une augmentation du critère de Mohr-Coulomb. De la même manière, diminuer la densité de la roche entraîne une diminution de la contrainte effective verticale et diminuer le coefficient de poussée des terres au repos minimum diminue la contrainte effective horizontale.

La plupart des relations obtenues entre les paramètres et la pression de pore ou le critère de MC suivent les tendances déjà observées par M. Van Breusegem [BREUSEGEM 2021]. Néanmoins, il existe de grandes différences au niveau de l'évolution même de la pression et du critère de Mohr Coulomb ainsi que de l'amplitude des valeurs recueillies.

En effet, dans l'étude en trois dimensions réalisée dans ce mémoire, les courbes de pression de pore ne se superposent pas avec la courbe de pression de pore réelle au point d'injection, réalisée pendant la phase d'injection de 10 jours en 2019. De plus, le pic de pression en début d'injection n'est pas présent, et cette pression évolue plus lentement avant d'atteindre le régime permanent.

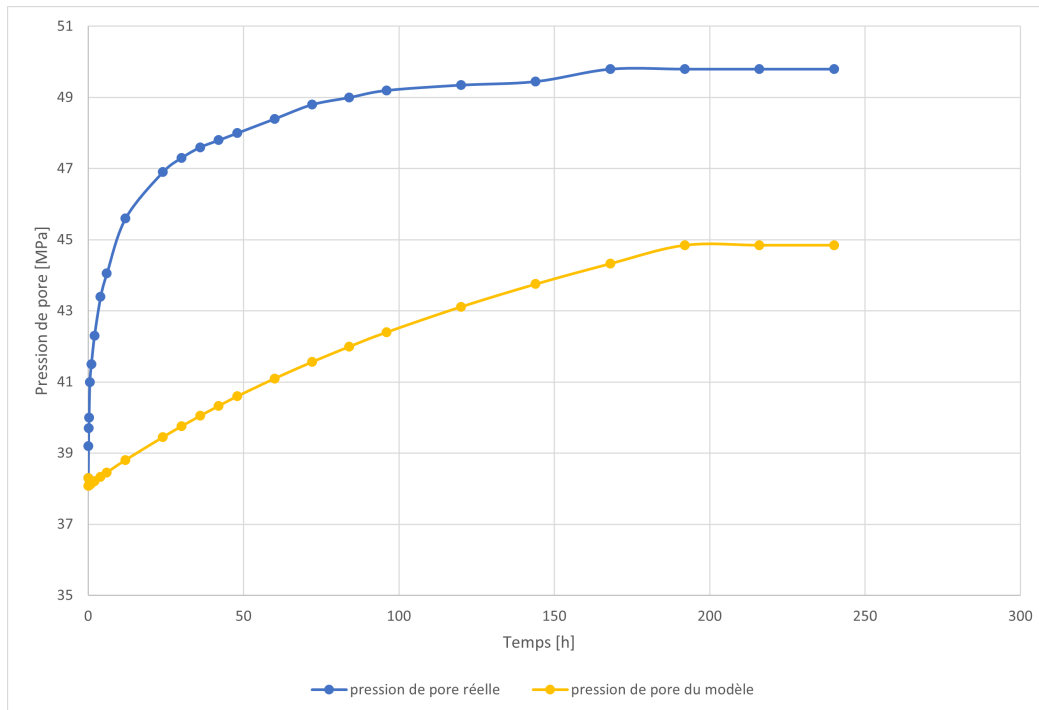


FIGURE 5.1 – Comparaison entre la courbe de pression réelle et la courbe obtenue grâce au modèle 3D.

Les valeurs de paramètres qui permettent de tendre le plus possible vers la courbe réelle de pression de pore sont reprises dans le Tableau 5.3 et l'évolution de la pression de pore obtenue est représentée à la Figure 5.1.

Paramètres	Valeurs	Unités
Perméabilité	5×10^{-16}	m^2
Porosité	1.5	%
Débit	18.05	kg/s
Coefficient de Biot	0.5	/
Masse volumique	2500	kg/m^3
Coefficient $K_{0,h}$	0.2	/

TABLE 5.3 – Valeurs des paramètres les plus proches de la situation du réservoir.

Le critère de Mohr-Coulomb n'est, quant à lui, jamais positif pour les différentes combinaisons de paramètres testées. Cela rend infaisable la comparaison d'un front de rupture avec le contour de sismicité réelle, prévue au début de cette étude. Le résultat obtenu avec les paramètres du Tableau 5.3 est présenté à la Figure 5.2.

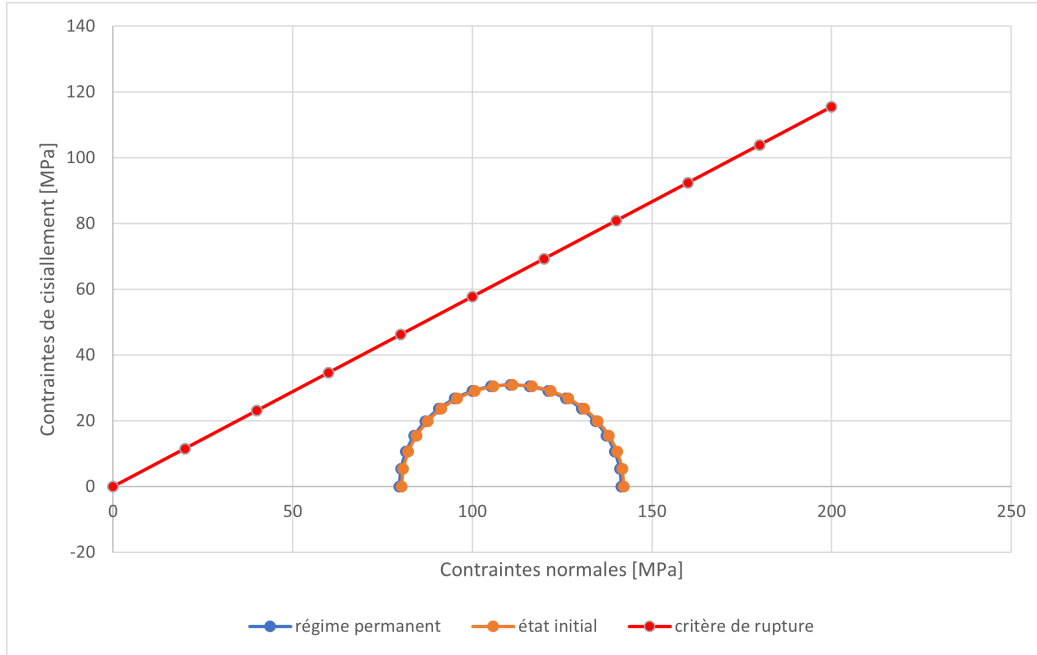


FIGURE 5.2 – Cercles de Mohr-Coulomb comparée au critère de Mohr Coulomb.

De plus, la diminution de contrainte observée entre l'état initial et le régime permanent est très faible, de l'ordre de 0,5 MPa (illustré à la Figure 5.3). Dans ces conditions, pour que le critère de MC devienne positif, il faudrait que l'état de contrainte initiale soit proche de l'état critique. Dans leur modèle, Wassing B et al définissent leur état de contrainte initiale de cette manière [HEEGE 2022]. Cela leur permet d'observer de la sismicité, même avec de faibles augmentations de pression interstitielle et donc de faible diminution de contraintes effectives. En effet, l'augmentation de la pression de pore calculée par leur modèle est de l'ordre de 0.7 MPa.

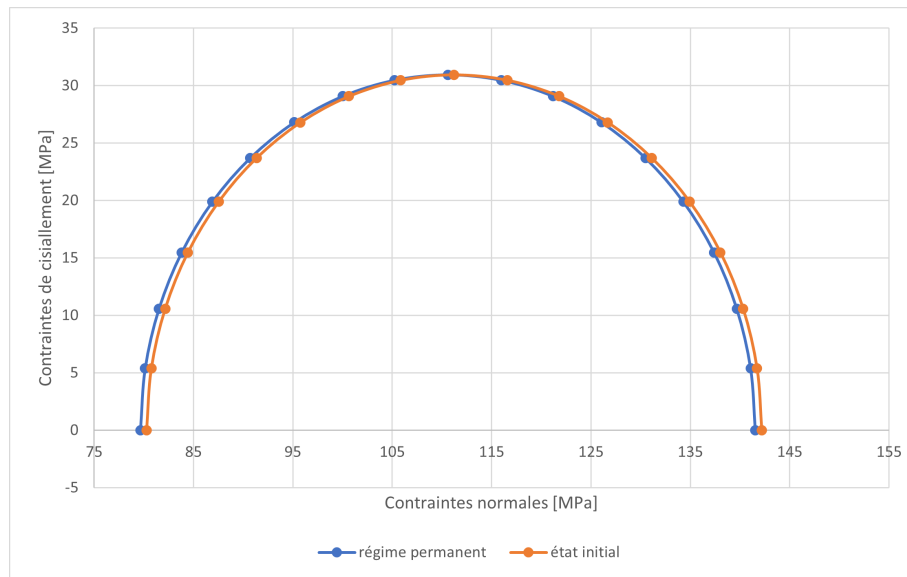


FIGURE 5.3 – Comparaison entre le cercle de Mohr pour l'état de contrainte initial et l'état de contrainte en régime permanent pour les paramètres du Tableau 5.3.

On peut analyser certains paramètres plus précisément pour comprendre ces problèmes :

- **Perméabilité et porosité** Une perméabilité de $5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ et une porosité de 1.5 % correspondent à une roche très peu fracturée. Or, autour du puits d'injection la roche est fracturée lors de la phase de stimulation EGS pour augmenter la perméabilité de celle-ci. La Figure 5.4 nous donne une indication sur les valeurs récoltées pour plusieurs roches considérées comme fracturées, avec une faible porosité. Les valeurs de perméabilité sont alors de l'ordre de 10^{-14} à 10^{-11} m^2 .

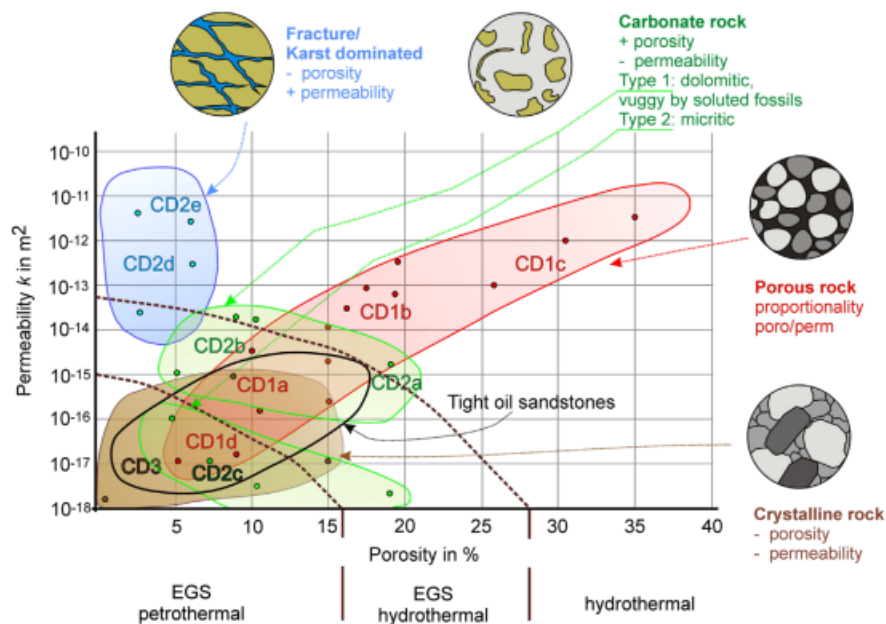


FIGURE 5.4 – Relation entre la porosité et la perméabilité pour différents réservoirs géothermiques [MOECK 2014].

- **Coefficient de Biot** La valeur du coefficient de Biot de 0.5 avait pu être évaluée en regardant sa relation avec la porosité et le module d'élasticité isostatique. Cette valeur reste donc cohérente même si une augmentation de ce paramètre permettrait de rapprocher la roche de la rupture.
- **Coefficient $K_{0,h}$ et $K_{0,H}$** Les contraintes horizontales et verticales in-situ comprennent de nombreuses incertitudes. La manière dont sont définis les contraintes initiales et les coefficients de poussée des terres au repos a eu un impact important sur les résultats obtenus puisque l'état de rupture n'a pas pu être atteint. Comme expliqué précédemment, une autre manière de définir l'état de contrainte initiale serait de le considérer proche de l'état critique.

5.2 Profil de pression et température du réservoir

Plusieurs résultats liés à la pression et à la température du réservoir ont été obtenus.

Premièrement, une comparaison de la pression de pore autour du puits d'injection avec et sans couplage thermique a été réalisée. On a pu observer à la Figure 4.21 une augmentation plus importante de la pression de pore sur une largeur de plus d'1 km lorsqu'on ajoute le couplage thermique au couplage hydromécanique. Une hypothèse qui pourrait expliquer ce phénomène vient de la manière dont Moose définit la température dans la simulation hydromécanique. En effet, une température par défaut est définie, égale à 293K. Cette température, qui n'évolue pas dans le modèle hydromécanique puisqu'elle ne fait pas partie des variables, est plus faible que les températures du réservoir et du fluide injecté, définies dans le couplage hydro-thermo-mécanique. L'explication de la différence de pression de pore entre les deux modèles serait donc que la température du milieu et du fluide est plus élevée dans ce dernier modèle et influe sur la pression du fluide. Cette augmentation de température aurait ainsi pour effet de dilater le fluide et donc d'induire une augmentation de la pression de pore autour du puits d'injection.

La Figure 5.5 compare l'évolution de la pression de pore au cours du temps pour 3 modèles : un modèle hydromécanique, un modèle hydro-thermo-mécanique avec le gradient géothermique et un fluide à 333.15 K et un modèle hydro-thermo-mécanique avec la température de 293 K appliquée pour tout le réservoir.

On observe bien un rapprochement des solutions lorsqu'on impose la température par défaut mais il reste quand même une différence significative si l'on compare avec le modèle hydro-thermo-mécanique complet. D'autres hypothèses doivent être formulées et vérifiées pour expliquer cette différence restante en investiguant davantage la manière dont Moose calcule la pression de pore avec et sans couplage thermique.

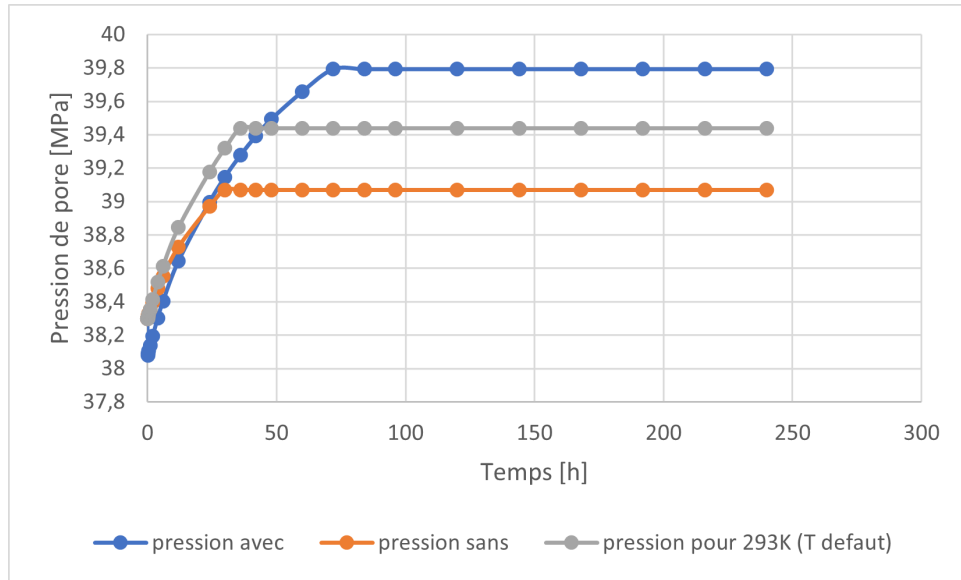


FIGURE 5.5 – Comparaison entre l’évolution de la pression de pore au puits d’injection pour 3 modèles : un modèle hydromécanique, un modèle hydro-thermo-mécanique avec le gradient géothermique et un fluide à 333.15 K et un modèle hydro-thermo-mécanique avec la température de 293 K appliquée partout.

Dans un deuxième temps, l’évolution de la température à long terme aux puits d’injection et de production a été étudiée. Au puits d’injection, un fluide à 60°C entre en contact avec une roche dont la température, à cette profondeur, avoisine les 140°C. Cela a pour impact la diminution progressive de la température de la roche dans la zone entourant le puits d’injection. Plus loin, la roche du puits de production peut subir le même effet car la zone froide autour du puits d’injection devrait s’agrandir pour atteindre, à terme, le puits producteur. Ce phénomène n’est pas observé dans les résultats de ce mémoire.

En effet, d’après la tendance de ces résultats, le thermal breakthrough ne devrait se produire qu’après des centaines, voire des milliers d’années, ce qui n’est pas très réaliste. Les valeurs types de durée d’exploitation d’un réservoir géothermiques avant que la production ne diminue sont de l’ordre de quelques années à plusieurs dizaines d’années. Ces valeurs varient évidemment en fonction des paramètres spécifiques de la formation rocheuse. Par exemple, le déclin de la température de production d’une des treize centrales exploitant le réservoir de Malm, dans la région de Munich, est survenu après seulement trois ans d’exploitation [FADEL et al. 2022]. M. Fadel et al. ont représenté la solution analytique développée par Schulz (1987) et modifiée par Lauwerier en 1955 pour un milieu poreux, en utilisant des paramètres du même ordre de grandeur que ceux utilisés dans ce travail. Leur résultat est visible à la Figure 5.6.

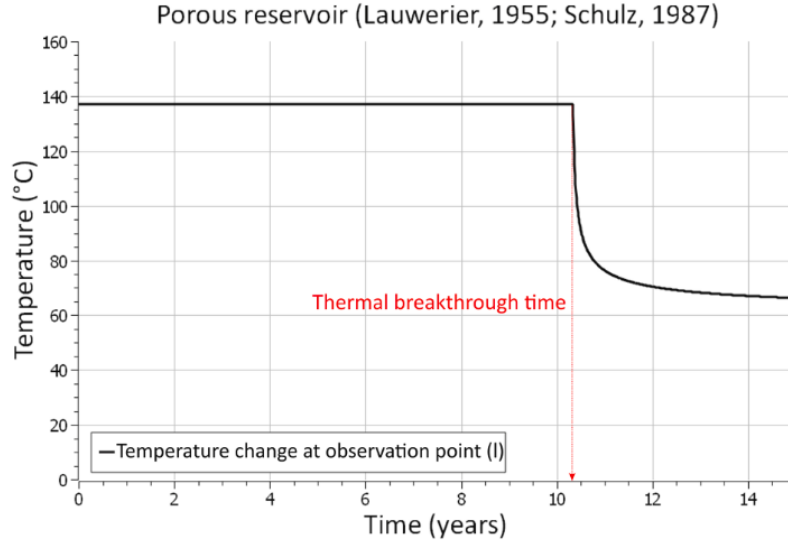


FIGURE 5.6 – Courbe d’évolution de la température au puits de production calculée analytiquement pour un milieu poreux [FADEL et al. 2022].

Cette courbe ressemble à celle réalisée grâce à une simulation thermo-hydro-chimique du réservoir de Rittershoffen en Alsace par Han S. et al. [HAN et al. 2019] (Figure 5.7).

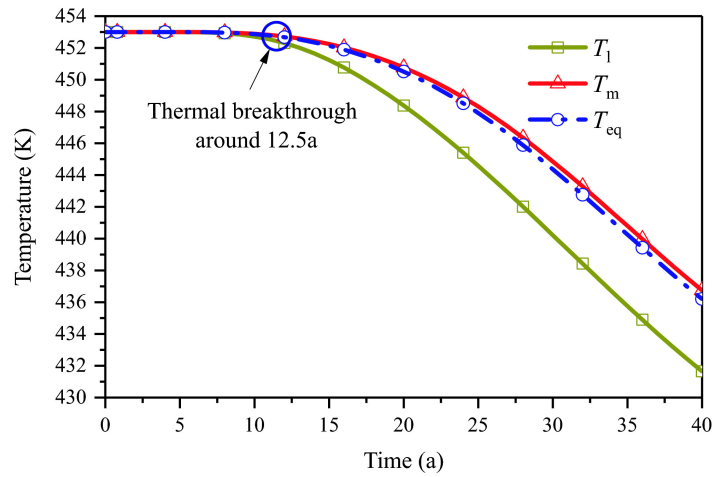


FIGURE 5.7 – Changement de température de production u cours du temps. T_l est la température du fluide produit, T_m est la température de la roche au puits de production et T_{eq} est la température équivalente [HAN et al. 2019].

On observe bien une température stable pendant une période d’une dizaine d’années, puis une diminution progressive, bien que cette diminution n’ait pas la même forme dans les deux études.

En revanche, l’augmentation de 2 K qui se produit au début de notre simulation peut être expliquée par le fait que le puits de production se trouve 655 m plus haut par rapport au puits injecteur. À cause du gradient géothermique, la roche y est plus froide que le fluide que l’on pompe, qui lui s’est réchauffé à plus grande profondeur.

Un lien peut être fait entre la zone d'influence de 1 km observée au puits d'injection, qui n'évolue presque pas en 15 ans. Il y a donc un problème qui peut venir de différentes limitations du modèle.

5.3 Limitations du modèle

La première limitation provient du raffinement du maillage. En effet, nous avons pu constater, plus tôt dans ce papier, que le choix de la taille des éléments du maillage influençait les résultats obtenus. Bien que l'on ait pu observer une convergence des résultats à partir d'un maillage dont les éléments faisaient 250 m de longueur d'arête, il est peut-être nécessaire de réaliser les simulations avec un maillage plus fin pour obtenir des données plus précises.

Ensuite, le choix du pas de temps, en particulier pour les simulations à long terme, est crucial pour capturer correctement les variations de chaque paramètre. Un pas de temps plus petit peut améliorer la précision des résultats mais aura un impact sur le temps de calcul, tout comme un raffinement du maillage.

Finalement, la géométrie du modèle 3D peut ne pas capturer correctement toutes les particularités du réservoir réelle. En effet, le réservoir est modélisé avec des propriétés homogènes et 3 failles représentées par des surfaces. En réalité, le réservoir est karstifié à certains endroits, non homogène et les failles possèdent une certaine épaisseur. De plus, l'épaisseur de la couche du réservoir a été augmentée artificiellement pour éviter les effets de bords. Néanmoins, il existe peut-être une influence de la couche géologique du Dévonien qui se trouve sous la couche du Dinantien que l'on modélise.

Chapitre 6

Conclusion

6.1 Conclusion et perspectives

L’objectif de ce travail était de modéliser le réservoir géothermique de Mol en trois dimensions et de réaliser plusieurs simulations avec le logiciel d’éléments finis Moose. Dans cette démarche, une approche simplifiée de la géométrie et des propriétés isotropes pour les formations rocheuses et les failles a été adoptée. Le but était d’analyser l’impact de différents paramètres hydrauliques, mécaniques et thermiques sur le comportement du réservoir.

L’analyse paramétrique a révélé des tendances cohérentes avec les connaissances antérieures, notamment celles obtenues grâce au modèle en deux dimensions élaboré par Maximilien Van Breusegem. Par exemple, il est ressorti de cette étude que l’augmentation de la perméabilité et de la porosité entraîne une baisse de la pression de pore, tandis qu’une augmentation du débit d’injection et du coefficient de Biot induit une hausse de cette pression. De même, l’effet du coefficient de Biot, de la masse volumique de la roche et du coefficient de poussée des terres au repos sur le critère de Mohr-Coulomb a été étudié, mettant en évidence leur influence sur les contraintes effectives et la stabilité globale du réservoir.

Cependant, pour mieux calibrer les simulations et tendre vers la courbe de pression observée au puits d’injection avant le séisme de 2019, certains paramètres ont été ajustés. Toutefois, ces paramètres pourraient ne pas être représentatifs de l’ensemble du réservoir. Par exemple, une perméabilité de $5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ au point d’injection pourrait être trop basse pour une zone présumée fracturée, ce qui compromettrait la circulation fluide-puits. Il est également important de noter que l’augmentation de la pression de pore reste localisée autour du puits d’injection.

L’analyse des contraintes effectives et du critère de Mohr-Coulomb a révélé des diminutions très faibles, inférieures à 1 MPa. Ces résultats soulignent des incertitudes dans la définition des contraintes initiales et appellent à des recherches plus approfondies dans ce domaine.

L’exploration de l’impact du couplage thermique sur le comportement du réservoir a généré des résultats intrigants. Bien que le couplage thermique ait influencé l’évolution de la pression de pore, des hypothèses ont été avancées pour expliquer ces variations, mettant en évidence l’importance du traitement thermique dans le modèle. Il est également important de noter que l’augmentation de la pression de pore reste localisée autour du puits d’injection.

L’observation de la sismicité induite à Mol a révélé une tendance d’allongement dans la direction nord-nord-ouest au sud-sud-est (NNO-SSE). Pour parvenir à modéliser cette sismicité, il serait crucial de caractériser les trajectoires du fluide dans le réservoir. Il est donc impératif de garder à l’esprit les limitations intrinsèques au modèle utilisé dans cette étude. Des ajustements supplémentaires du maillage, du pas de temps et de la géométrie pourraient s’avérer nécessaires afin de raffiner les résultats et d’obtenir une représentation plus fidèle du réservoir.

Les résultats obtenus dans cette recherche ouvrent la voie à plusieurs perspectives de recherche futures dans le domaine de la géothermie. Une amélioration du modèle thermique pourrait aboutir à des résultats en meilleure adéquation avec la réalité. Il serait particulièrement intéressant d’analyser l’impact de la température d’injection et des paramètres thermiques de la roche sur l’évolution de la température et de la pression dans le réservoir, ainsi que sur le phénomène de *thermal breakthrough*. Par ailleurs, les interactions chimiques entre les roches et l’eau, et leur influence sur le comportement du réservoir, pourraient être explorées. Enfin, la création d’un modèle prenant en compte le glissement des failles et fractures les unes par rapport aux autres, et évaluant l’amplitude des séismes induits, pourrait offrir une compréhension plus approfondie du comportement du réservoir et de la sismicité induite.

Annexe A

Vue d'ensemble des événements sismiques induits sur le site géothermique de Balmatt

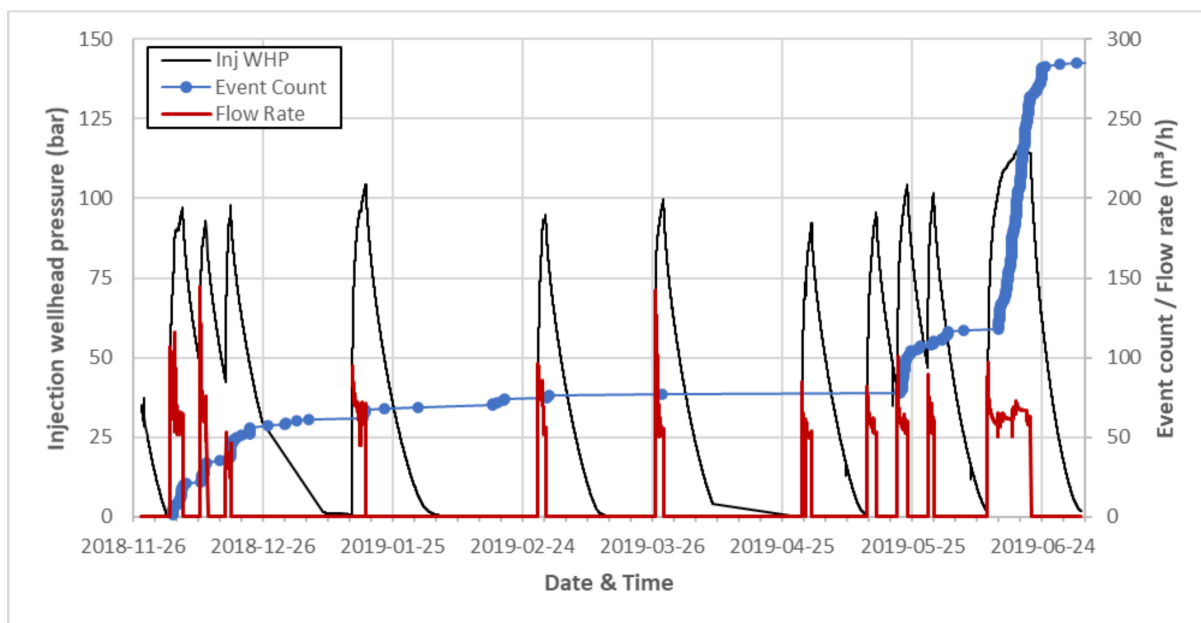


FIGURE A.1 – Vue d'ensemble des événements sismiques induits sur le site géothermique de Balmatt pour les phases d'exploitation de 2018-2019 [HEEGE 2022].

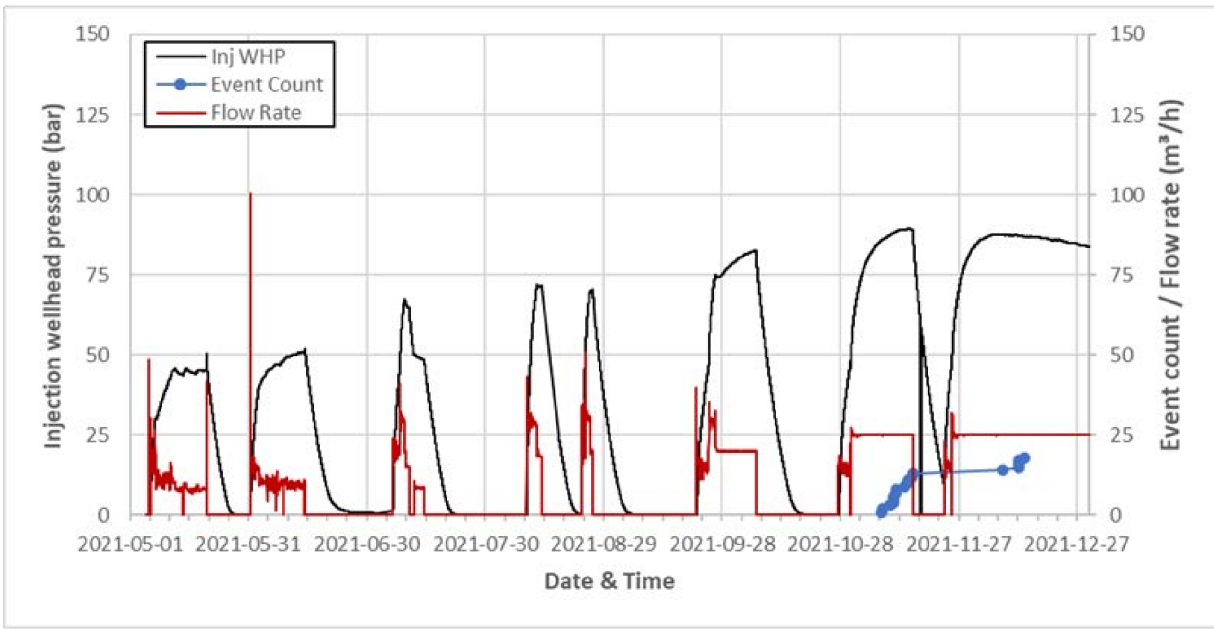


FIGURE A.2 – Vue d’ensemble des événements sismiques induits sur le site géothermique de Balmatt pour les phases d’exploitation de 2018-2019 [HEEGE 2022].

Annexe B

Analyse paramétrique avec leurs critères de Mohr-Coulomb

Coefficient de Biot [/]	MC [MPa]
0.4	-33.72
0.5	-33.31
0.6	-32.88
0.7	-32.43
0.8	-31.93
0.9	-31.42
1	-30.85

TABLE B.1 – Critère de MC pour différents coefficients de Biot.

Masse volumique [kg/m ³]	MC [MPa]
1700	-31.22
1900	-31.76
2100	-32.22
2300	-32.64
2500	-33.02
2700	-33.37
2900	-33.70

TABLE B.2 – Critère de MC pour différentes masses volumiques de la roche.

Coefficient $K_{0,h}$ [/]	MC [MPa]
0.15	-20.82
0.2	-23.71
0.25	-26.58
0.3	-29.37
0.35	-31.90
0.39	-33.20

TABLE B.3 – Critère de MC pour différents coefficients $K_{0,h}$.

Annexe C

Exemple de code pour Moose

```
injection_rate = 18.05 # kg/s
density=2600 #kg/m^3
biot_coefficient=0.5
Koh=0.39
KoH=0.39
[Mesh]
  [basic_mesh]
    type = FileMeshGenerator
    file=mesh_250.e
  [ ]
  [renamed_mesh]
    type = RenameBlockGenerator
    input = basic_mesh
    old_block = '0 1 2 3'
    new_block = 'matrix Ber Des Ret'
  []
  [finalMesh]
    type = RenameBoundaryGenerator
    input = renamed_mesh
    old_boundary = '1 2 3 4 5 6 7 8 9'
    new_boundary = 'bottom top Ber Des Ret front left back
                  right '
  []
[ ]
[GlobalParams]#Every parameter in the block will be inserted into
every block/sub-block where that parameter name is defined
  PorousFlowDictator = dictator
  displacements = 'disp_x disp_y disp_z'
  biot_coefficient = ${biot_coefficient}
[ ]
[Variables]
  [porepressure]
  []
  [temperature]
```

```

        scaling = 1E-8
[]
[disp_x]
    scaling = 1E-10
[]
[disp_y]
    scaling = 1E-10
[]
[disp_z]
    scaling = 1E-10
[]
[]
[Functions]
[insitu_pp]
    type = ParsedFunction
    expression = '-10000 * z' # Approximate hydrostatic in MPa
[]
[grad_therm]
    type = ParsedFunction
    expression = '283.15-34*z/1000' # Approximate hydrostatic in
        MPa
[]
[sigmav_eff]
    type = ParsedFunction
    expression = '10*z*({density}-{biot_coefficient}*1000)'
[]
[sigmah_eff]
    type = ParsedFunction
    expression = '10*z*{Koh}*({density}-{biot_coefficient}
        )*1000)'
[]
[sigmaH_eff]
    type = ParsedFunction
    expression = '10*z*{KoH}*({density}-{biot_coefficient}
        )*1000)'
[]
[]
[ICs]
[porepressure]
    type = FunctionIC
    variable = porepressure
    function = insitu_pp
[]
[temperature]
    type = FunctionIC
    variable = temperature
    function = grad_therm

```

```

[]
[]
[PorousFlowFullySaturated]
    porepressure = porepressure
    temperature = temperature
    coupling_type = ThermoHydroMechanical
    gravity = '0 0 -9.81'
    fp = the_simple_fluid
    stabilization=KT
    add_stress_aux=true
    add_darcy_aux = true
    eigenstrain_names = 'thermal_contribution ini_stress'
    use_displaced_mesh = false
[]
[DiracKernels]
    [fluid_injection]
        type = PorousFlowPointSourceFromPostprocessor
        point = '202534 214488 -3830'
        mass_flux = ${injection_rate}
        variable = porepressure
    []
    [source_h]
        type = PorousFlowPointEnthalpySourceFromPostprocessor
        variable = temperature
        mass_flux = ${injection_rate}
        point = '202534 214488 -3830'
        T_in = 333.15
        pressure = porepressure
        fp = the_simple_fluid
    []
    [fluid_production]
        type = PorousFlowPointSourceFromPostprocessor
        point = '201859 212565 -3175'
        mass_flux = -${injection_rate}
        variable = porepressure
    []
    [prod_h]
        type = PorousFlowPointEnthalpySourceFromPostprocessor
        variable = temperature
        mass_flux = -${injection_rate}
        point = '201859 212565 -3175'
        T_in = temperature_production
        pressure = porepressure
        fp = the_simple_fluid
    []
[]
[BCs]

```

```

[constant_injection_porepressure]
    type = FunctionDirichletBC
    variable = porepressure
    function = insitu_pp
    boundary = 'right left top bottom back front '
[]
[constant_injection_temperature]
    type = FunctionDirichletBC
    variable = temperature
    function = grad_therm
    boundary = 'right left top bottom back front '
[]
[stress_x_right]
    type = DirichletBC
    value = 0
    variable = disp_x
    boundary = right
[ ]
[stress_x_left]
    type = DirichletBC
    value = 0
    variable = disp_x
    boundary = left
[ ]
[stress_y_back]
    type = DirichletBC
    value = 0
    variable = disp_y
    boundary = back
[ ]
[stress_y_front]
    type = DirichletBC
    value = 0
    variable = disp_y
    boundary = front
[ ]
[stress_z_top]
    type = DirichletBC
    value = 0
    variable = disp_z
    boundary = top
[ ]
[stress_z_bottom]
    type = DirichletBC
    value = 0
    variable = disp_z
    boundary = bottom

```

```

[ ]
[]

[FluidProperties]
[the_simple_fluid]
    type = SimpleFluidProperties
    bulk_modulus = 2E9
    viscosity = 1.0E-3
    density0 = 1000.0
    thermal_expansion = 0.0002
    cp = 4194
    cv = 4186
    porepressure_coefficient = 0
[]
[]
[AuxVariables]
[insitu_pp]
[]
[density]
    family = MONOMIAL
    order = CONSTANT
[]
[porosity]
    family = MONOMIAL
    order = CONSTANT
[]
[hydrostatic]
    order = FIRST
    family = LAGRANGE
[ ]
[mc]
    order = FIRST
    family = LAGRANGE
[ ]
[maxshear]
    order = FIRST
    family = LAGRANGE
[ ]
[maxprincipal]
    order = FIRST
    family = LAGRANGE
[ ]
[minprincipal]
    order = FIRST
    family = LAGRANGE
[ ]

```

```

[ midprincipal]
    order = FIRST
    family = LAGRANGE
[ ]
[ permeability]
    order = CONSTANT
    family = MONOMIAL
[ ]
[]

[AuxKernels]
[insitu_pp]
    type = FunctionAux
    execute_on = initial
    variable = insitu_pp
    function = insitu_pp
[]
[density]
    type = PorousFlowPropertyAux
    variable = density
    property = density
[]
[porosity]
    type = PorousFlowPropertyAux
    variable = porosity
    property = porosity
[]
[mc_aux]
    type = RankTwoScalarAux #Compute a scalar property of a
                             RankTwoTensor
    rank_two_tensor = stress
    variable = mc
    scalar_type = MC
[ ]
[maxshear_aux]
    type = RankTwoScalarAux
    rank_two_tensor = stress
    variable = maxshear
    scalar_type = MaxShear
[ ]
[hydrostatic_aux]
    type = RankTwoScalarAux
    rank_two_tensor = stress
    variable = hydrostatic
    scalar_type = Hydrostatic
[ ]
[maxprincipal_aux]

```

```

        type = RankTwoScalarAux
        rank_two_tensor = stress
        variable = maxprincipal
        scalar_type = MaxPrincipal
[ ]
[minprincipal_aux]
    type = RankTwoScalarAux
    rank_two_tensor = stress
    variable = minprincipal
    scalar_type = MinPrincipal
[ ]
[midprincipal_aux]
    type = RankTwoScalarAux
    rank_two_tensor = stress
    variable = midprincipal
    scalar_type = MidPrincipal
[ ]
[permeability]
    type = PorousFlowPropertyAux #to provide access to
        properties evaluated at quadpoints
    property = permeability
    variable = permeability
    row = 0 #Row of permeability tensor to output
    column = 0 #Column of permeability tensor to output
[ ]
[]

[Materials]
[./density]
    type =
        PorousFlowTotalGravitationalDensityFullySaturatedFromPorosity

    rho_s = ${density}
[./]
[porosity_reservoir]
    type = PorousFlowPorosity
    porosity_zero = 0.015
    fluid = true
    reference_porepressure = insitu_pp
    solid_bulk = 40E9
    block='matrix'
[ ]
[porosity_faults]
type = PorousFlowPorosity
porosity_zero = 1
block='Ber Des Ret'
[]

```

```

[biot_modulus]
    type = PorousFlowConstantBiotModulus
    solid_bulk_compliance = 40E9
    fluid_bulk_modulus = 2E9
[]
[permeability_fault]
    type = PorousFlowPermeabilityConst
    block = 'Ber Des Ret'
    permeability = '1E-14 0 0    0 1E-14 0    0 0 1E-14'
[]
[permeability_reservoir]
    type = PorousFlowPermeabilityKozenyCarman #calculates the
        permeability tensor
    poroperm_function = kozeny_carman_phi0
    k0 = 3E-15
    m = 2 #(1-porosity) exponent
    n = 3 #Porosity exponent
    phi0 = 0.015
    block='matrix'
[ ]
[rock_internal_energy_rock]
    type = PorousFlowMatrixInternalEnergy
    density = ${density}
    block = 'matrix'
    specific_heat_capacity = 880.0
[]
[rock_internal_energy_fault]
    type = PorousFlowMatrixInternalEnergy
    density = ${density}
    specific_heat_capacity = 0
    block='Ber Des Ret'
[]
[thermal_conductivity_rock]
    type = PorousFlowThermalConductivityIdeal
    dry_thermal_conductivity = '2.4 0 0    0 2.4 0    0 0 2.4'
    block = 'matrix'
[]
[thermal_conductivity_fault]
    type = PorousFlowThermalConductivityIdeal
    dry_thermal_conductivity = '1 0 0    0 1 0    0 0 1'
    block = 'Ber Des Ret'
[]
[elasticity_tensor]
    type = ComputeIsotropicElasticityTensor
    youngs_modulus = 50E9
    poissons_ratio = 0.281
[]

```

```

[ strain ]
    type = ComputeSmallStrain
    displacements = 'disp_x disp_y disp_z'
    eigenstrain_names = 'thermal_contribution ini_stress'
[]
[ thermal_contribution ]
    type = ComputeThermalExpansionEigenstrain
    temperature = temperature
    thermal_expansion_coeff = 1E-5# this is the linear thermal
        expansion coefficient
    eigenstrain_name = thermal_contribution
    stress_free_temperature = 350
[]
[ stress ]
    type = ComputeLinearElasticStress
[]
[ ini_stress ]
    type = ComputeEigenstrainFromInitialStress
    initial_stress = 'sigmaH_eff 0 0 0 sigmaH_eff 0 0 0
        sigmav_eff'
    eigenstrain_name = ini_stress
[ ]
[]

[Postprocessors]#object that computes a single scalar
[ temperature_production ]
    type=PointValue
    point='201859 212565 -3175'
    variable=temperature
[]
[ porepressure_injection ]
    type = PointValue
    point = '202534 214488 -3830'
    variable = porepressure
[ ]
[ temperature_injection ]
    type = PointValue
    point = '202534 214488 -3830'
    variable = temperature
[ ]
[ mc_injection ]
    type = PointValue
    point = '202534 214488 -3830'
    variable = mc
[ ]
[ sigma1_injection ]
    type = PointValue

```

```

        point = '202534 214488 -3830'
        variable = minprincipal
[ ]
[sigma3_injection]
    type = PointValue
    point = '202534 214488 -3830'
    variable = maxprincipal
[ ]
[sigma2_injection]
    type = PointValue
    point = '202534 214488 -3830'
    variable = midprincipal
[ ]
[darcy_x]
    type = PointValue
    point = '202534 214488 -3830'
    variable = darcy_vel_x
[]
[darcy_y]
    type = PointValue
    point = '202534 214488 -3830'
    variable = darcy_vel_y
[]
[darcy_z]
    type = PointValue
    point = '202534 214488 -3830'
    variable = darcy_vel_z
[]
[hydrostatic]
    type=PointValue
    point = '202534 214488 -3830'
    variable = hydrostatic
[]
[maxshear]
    type=PointValue
    point = '202534 214488 -3830'
    variable = maxshear
[]
[ ]
[Preconditioning]#to define which type of preconditioning matrix
to build and what process to apply
    active = basic
[basic]
    type = SMP#Single matrix preconditioner (SMP) builds a
        preconditioner using user defined off-diagonal parts of
        the Jacobian
    full = true

```

```

[ ]
[ ]

[Executioner]
  type = Transient
  solve_type = Newton
  end_time = 864000
  [TimeStepper]
    type = TimeSequenceStepper
    time_sequence = '0 300 600 900 1800 3600 7200 14400
      21600 43200 86400 108000 129600 151200 172800 216000
      259200 302400 345600 432000 518400 604800 691200
      777600 864000'

    [ ]
    steady_state_detection = true
    nl_abs_tol = 1E-9
[]

[Outputs]
  exodus = true
  csv = true
[]

```

Bibliographie

- 1.3.2 Lois du frottement "sec" (lois de Coulomb) / Physique (s. d.). URL : https://public.iutenligne.net/mecanique/mecanique-du-solide/charbonnieres/mecanique/132_lois_du_frottement_sec_lois_de_coulomb.html.
- A. WILKINS, C. GREEN et J. ENNIS-KING (2021). "An open-source multiphysics simulation code for coupled problems in porous media". In : *Computers & Geosciences* 154. ISSN : 0098-3004. DOI : [10.1016/j.cageo.2021.104820](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104820).
- (2020). "PorousFlow : a multiphysics simulation code for coupled problems in porous media". In : *Journal of Open Source Software* 5. DOI : [10.21105/joss.02176](https://doi.org/10.21105/joss.02176). URL : <https://doi.org/10.21105/joss.02176>.
- ALEXANDER D. LINDSAY et al. (2022). "2.0_Moose_Enabling massively parallel multiphysics simulation". In : *SoftwareX* 20. ISSN : 2352-7110. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.softx.2022.101202>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352711022001200>.
- Aseismic creep - Wikipedia (s. d.). URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Aseismic_creep.
- BELL FG (1981). *A SURVEY OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF SOME CARBONATE ROCKS*. Rapp. tech.
- BOMBARDA, Paola et Mario GAIA (2017). *Énergie géothermique : une importante ressource cachée*. Rapp. tech. URL : www.rie.it.
- BOURNE, S. J., S. J. OATES et J. van ELK (juin 2018). "The exponential rise of induced seismicity with increasing stress levels in the Groningen gas field and its implications for controlling seismic risk". In : *Geophysical Journal International* 213.3, p. 1693-1700. ISSN : 1365246X. DOI : [10.1093/gji/ggy084](https://doi.org/10.1093/gji/ggy084).
- BREUSEGEM, Van (2021). *"Sismicité induite par les projets de géothermie"*. Rapp. tech. URL : <http://hdl.handle.net/2078.1/>.
- BRUXELLES ENVIRONNEMENT (déc. 2020). *La géothermie à Bruxelles*. URL : <https://environnement.brussels/citoyen/lenvironnement-bruxelles/renover-et-construire/la-geothermie-bruxelles>.
- Bulk modulus - Wikipedia (s. d.). URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Bulk_modulus.
- CACACE, Mauro et Guido BLÖCHER (sept. 2015). "MeshIt—a software for three dimensional volumetric meshing of complex faulted reservoirs". In : *Environmental Earth Sciences* 74.6, p. 5191-5209. ISSN : 18666299. DOI : [10.1007/S12665-015-4537-X](https://doi.org/10.1007/S12665-015-4537-X). URL : <https://doi.org/10.1007/S12665-015-4537-X>.

-
- [//www.researchgate.net/publication/277614030_MeshIt_-_a_software_for_three_dimensional_volumetric_meshing_of_complex_reservoirs](https://www.researchgate.net/publication/277614030_MeshIt_-_a_software_for_three_dimensional_volumetric_meshing_of_complex_reservoirs).
- Carboniferous / National Commission for Stratigraphy Belgium (s. d.). URL : <https://ncs.naturalsciences.be/carboniferous>.
- CÉDRIC DE MEYER (2019). *Bachelorproef Geologie Theoretical model for the analysis of induced seismicity at geothermal projects in the Campine Basin (Belgium)*. Rapp. tech.
- CHANG, K. W. et H. YOON (avr. 2021). “Mitigating Injection-Induced Seismicity Along Basement Faults by Extraction : Application to 2016–2018 Pohang Earthquakes”. In : *Journal of Geophysical Research : Solid Earth* 126.4. ISSN : 21699356. DOI : [10.1029/2020JB021486](https://doi.org/10.1029/2020JB021486).
- CSTC (1997). “PIERRES NATURELLES”. In : ISSN : 0528-4880.
- DALLA LONGA, Francesco et al. (sept. 2020). “Scenarios for geothermal energy deployment in Europe”. In : *Energy* 206. ISSN : 03605442. DOI : [10.1016/j.energy.2020.118060](https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118060).
- DEPARTEMENT OF EARTH AND PLANETARY SCIENCES (2019). *Lamber Fieldhouse - Fossiliferous Limestone*. URL : https://mlp.arboretum.purdue.edu/web01/oecgi3.exe/INET_ECM_DisFeat?FEATCODE=FOSSILIFEROUS&TOURMODE=0.
- DEPARTMENT OF ENERGY, US (déc. 2012). *Enhanced Geothermal System (EGS) Fact Sheet*. Rapp. tech. URL : <http://geothermal.inel.gov/publications/>.
- DOSSIERPOURLASCIENCE.FR (déc. 2010). “Énergies fossiles : l’état des réserves Le vent, le Soleil, la mer... Comment favoriser la transition énergétique?” In : 69.
- E. DE JAEGER, P. GERIN et H. JEANMART (2022). *Energy context*.
- EROL, Selçuk (2018). “Reactive Transport Simulations of the Lower Carboniferous Limestone Geothermal Reservoir Analytical Algorithm for Reactive Transport Modeling to Evaluate Dual-Porosity and Reactive Transport Simulations of the Lower Carboniferous Limestone Geothermal Reservoir Analytical Algorithm for Reactive Transport Modeling to Evaluate Dual-Porosity and Permeability”. In : DOI : [10.13140/RG.2.2.11725.90083](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11725.90083). URL : <https://www.researchgate.net/publication/333132676>.
- Exploitation et propriétés d’un réservoir : de l’étude pétrophysique à la fracturation hydraulique - Pression et fracturation* (s. d.). URL : https://pairform.imt-atlantique.fr/doc/58/273/888/web/co/grain_M1-4_G3-7.html.
- FADEL, Mohamed et al. (nov. 2022). “Causes of a premature thermal breakthrough of a hydrothermal project in Germany”. In : *Geothermics* 105. ISSN : 03756505. DOI : [10.1016/j.geothermics.2022.102523](https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102523).
- Faults and Fractures (U.S. National Park Service)* (s. d.). URL : <https://www.nps.gov/articles/faults-and-fractures.htm>.
- FRASH, Luke P et al. (2023). *A Proposal for Safe and Profitable Enhanced Geothermal Systems in Hot Dry Rock*. Rapp. tech.

Géothermie profonde sur l'Eurométropole de Strasbourg / Strasbourg.eu (s. d.). URL : <https://www.strasbourg.eu/geothermie-profonde-eurometropole-strasbourg?fbclid=IwAR3qXwC9UmXJgDppQXSJ5xXxsh0fuAPdhw1Wx-CecdDJYqdcpsIJlMCaiJg>.

GOENSE, T (2019). *Physical Characterization of the Lower Carboniferous Limestone as a potential Geothermal Reservoir*. Rapp. tech.

HAMPTON, Jesse et Greg BOITNOTT (2018). *The misnomer of "Effective Stress" and its relation to Biot Coefficients*. Rapp. tech. URL : <https://www.researchgate.net/publication/327558842>.

HAN, Songcai et al. (oct. 2019). "Investigation on heat extraction characteristics in randomly fractured geothermal reservoirs considering thermo-poroelastic effects". In : *Energy Science and Engineering* 7.5, p. 1705-1726. ISSN : 20500505. DOI : [10.1002/ese3.386](https://doi.org/10.1002/ese3.386).

HEEGE, ter (août 2022). *Seismicity Potential Dinantian geothermal reservoirs-implications of case study Balmatt for projects in the Netherlands-SeiMoD*. Rapp. tech.

Induced seismicity - Wikipedia (s. d.). URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Induced_seismicity.

JAMES KIM, Taeho et Jean-Philippe AVOUAC (2023). "Stress-Based and Convolutional Forecasting of Injection-Induced Seismicity : Application to The Otaniemi Geothermal Reservoir Stimulation". In : DOI : [10.22541/essoar.167590824.42840153/v1](https://doi.org/10.22541/essoar.167590824.42840153/v1). URL : <https://doi.org/10.22541/essoar.167590824.42840153/v1>.

KINSCHER, Jannes L et al. (2022). *Source characteristics and triggering of seismicity at the 2 geothermal doublet of the Balmatt site (Mol, Belgium)*. Rapp. tech. URL : <https://ssrn.com/abstract=4089157>.

KIVI, Iman R et al. (2023). "Global physics-based database of injection-induced seismicity". In : DOI : [10.20350/digitalCSIC/14813](https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14813). URL : <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14813>.

KLOSE, Christian D. (juill. 2012). "Evidence for anthropogenic surface loading as trigger mechanism of the 2008 Wenchuan earthquake". In : *Environmental Earth Sciences* 66.5, p. 1439-1447. ISSN : 18666280. DOI : [10.1007/s12665-011-1355-7](https://doi.org/10.1007/s12665-011-1355-7).

LAGROU, David et al. (2019). *Geothermal Energy Use, Country Update for Belgium*. Rapp. tech., p. 11-14.

Le chauffage par géothermie : avantages et inconvénients (s. d.). URL : https://climatisationduplessis.com/le-chauffage-par-geothermie-avantages-et-inconvenients/?fbclid=IwAR0YBQBV10K430_rFuTcU4ZCkMRUJFND_-ORpdxuyPWAsVs_HFj90Ve2doI.

LEMALE, Jean (sept. 2015). *La géothermie*. 2e. Dunod.

Les Séismes - Tpe séisme (s. d.). URL : <https://tpeseisme-architectureprevention.weebly.com/les-seacuteismes.html>.

Magnitude (sismologie) — Wikipédia (s. d.). URL : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Magnitude_\(sismologie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Magnitude_(sismologie)).

- Magnitude de moment* — Wikipédia (s. d.). URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Magnitude_de_moment.
- MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, Javier, Anna ARIZZI et David BENAVENTE (août 2021). “The role of calcite dissolution and halite thermal expansion as secondary salt weathering mechanisms of calcite-bearing rocks in marine environments”. In : *Minerals* 11.8. ISSN : 2075163X. DOI : [10.3390/min11080911](https://doi.org/10.3390/min11080911).
- MAZUYER, Antoine (2018). “estimation de l etat de contrainte initial in situ”. In.
- MERRIMAN, Jesse D. et al. (2018). “Temperature-dependent thermal transport properties of carbonate minerals and rocks”. In : *Geosphere* 14.4, p. 1961-1987. ISSN : 1553040X. DOI : [10.1130/GES01581.1](https://doi.org/10.1130/GES01581.1).
- MOECK, Inga S. (2014). *Catalog of geothermal play types based on geologic controls*. DOI : [10.1016/j.rser.2014.05.032](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.032).
- MOOSE Framework - Open Source Multiphysics* (s. d.). Idaho National Laboratory. URL : <http://mooseframework.inl.gov/>.
- NEBHANI, Manal (2022). *Étude de l'intégration d'un système géothermique dans un réseau de chaleur à basse température*. Rapp. tech. URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/16758>.
- PETITCLERC, Estelle et Yves VANBRABANT (2011). *Développement de la plate-forme Géothermique de la Wallonie Rapport final*. Rapp. tech.
- Poisson's ratio* - Wikipedia (s. d.). URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Poisson%27s_ratio.
- REINOUT VERBEKE (fév. 2016). *Nos sources de géothermie épinglées sur une carte*. URL : <https://www.naturalsciences.be/fr/news/item/5670>.
- Relations entre séismes et glissements asismiques* (s. d.). URL : <https://www.techno-science.net/actualite/relations-entre-seismes-glissements-asismiques-N14729.html>.
- ROMANOV, D. et B. LEISS (oct. 2022). *Geothermal energy at different depths for district heating and cooling of existing and future building stock*. DOI : [10.1016/j.rser.2022.112727](https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112727).
- Séisme classique, séisme lent : quelles différences ?* (s. d.). URL : <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/terre-seisme-classique-seisme-lent-differences-18388/>.
- SELVADURAI, A. P.S. (mai 2021). “On the poroelastic biot coefficient for a granitic rock”. In : *Geosciences (Switzerland)* 11.5. ISSN : 20763263. DOI : [10.3390/geosciences11050219](https://doi.org/10.3390/geosciences11050219).
- SPW (s. d.). *Valoriser la chaleur du ventre de la terre, c'est possible!* URL : <https://energie.wallonie.be/fr/la-geothermie-profonde.html?IDC=6173>.
- SYLVAIN ZAFFINI (2023). *Prix d'une pompe à chaleur à géothermie*. URL : <https://www.prix-pose.com/pompe-a-chaleur-geothermique/>.

- THOMAS, Marion Y, Harsha S BHAT et Harsha S BHAT LOI (2023). *Loi de friction et modélisation numérique du cycle sismique*. Rapp. tech. URL : <https://hal.science/hal-03923984>.
- VARRET, Jacques (juin 2011). *5.4-Ressources minérales et énergétiques 7.1-Energies*. Rapp. tech.
- VITO (2021). *Infoavond aardwarmte*. Rapp. tech.
- (s. d.). *Radioactivity and deep geothermal energy*. URL : <https://vito.be/en/radioactivity-and-deep-geothermal-energy>.
 - (2022). *RESEARCH INTO DEEP GEOTHERMAL ENERGY ON THE BALMATT SITE*. URL : <https://vito.be/en/deep-geothermal/balmatt-energy-plant>.
- Welkom bij Databank Ondergrond Vlaanderen / DOV (s. d.). URL : <https://www.dov.vlaanderen.be/>.
- WIKIPEDIA (2021). *Flemish Institute for Technological Research*. URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Flemish_Institute_for_Technological_Research.
- (2023). *Géothermie*. URL : <https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9othermie>.
 - (jan. 2022). *Gradient géothermique*. URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Gradient_g%C3%A9othermique.
- YEO, I. W. et al. (déc. 2020). “Causal mechanism of injection-induced earthquakes through the Mw 5.5 Pohang earthquake case study”. In : *Nature Communications* 11.1. ISSN : 20411723. DOI : [10.1038/s41467-020-16408-0](https://doi.org/10.1038/s41467-020-16408-0).
- ZANG, Arno et al. (fév. 2019). “How to Reduce Fluid-Injection-Induced Seismicity”. In : *Rock Mechanics and Rock Engineering* 52.2, p. 475-493. ISSN : 07232632. DOI : [10.1007/s00603-018-1467-4](https://doi.org/10.1007/s00603-018-1467-4).
- ZHU, Xi et al. (mai 2022). “Study on the Thermophysical Properties and Influencing Factors of Regional Surface Shallow Rock and Soil in China”. In : *Frontiers in Earth Science* 10. ISSN : 22966463. DOI : [10.3389/feart.2022.864548](https://doi.org/10.3389/feart.2022.864548).

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl