
APPLICATION AU CONTEXTE DE STOCKAGE GEOLOGIQUE DE CO₂

Sommaire

CHAPITRE 5. APPLICATION AU CONTEXTE DE STOCKAGE GEOLOGIQUE DE CO ₂	147
5.1 Introduction.....	148
5.2 Modèle géologique du bassin de Paris et scénario d'injection	149
5.2.1 Description géologique du bassin et de la faille.....	149
5.2.2 Modèle aux éléments finis et conditions aux limites.....	152
5.2.3 Définition d'un scénario d'injection.....	153
5.3 Comportement de la zone de faille.....	154
5.3.1 Etat initial avant injection	154
5.3.2 Au cours de la procédure d'injection.....	155
5.4 Conclusions.....	160

5.1 Introduction

De nos jours, l'effet de serre lié à l'émission de CO₂ relève la nécessité de stocker ce gaz dans des formations géologiques profondes. Le stockage de CO₂ peut se faire dans (i) des gisements de pétrole en fin d'exploitation, (ii) des aquifères salins profonds ou bien (iii) des veines de charbon non-exploités (Orr, 2004). Plusieurs difficultés sont rencontrées lors du stockage de CO₂ en raison de la présence de faille ou bien des réseaux de fractures complexes et très hétérogènes dans la zone de stockage. D'une manière générale, la zone de faille est une structure complexe composée d'un noyau entouré par des zones endommagées contenant une densité forte de micro-fractures de longueur et d'orientation différentes. En plus, différents phénomènes peuvent se produire lors du processus de l'injection de CO₂ tels que : le développement de la plastification dans la zone de faille (Vu, 2012), le risque de propagation aux extrémités de la faille ou bien des fractures en mode II (par cisaillement), le risque de pénétration des fluides dans les couches géologiques supérieurs par propagation en Mode I (Gor et al., 2013) qui peut entraîner la pollution des nappes phréatiques, le phénomène de sismicité induite lié à l'instabilité de propagation, etc.

En général, un modèle élastoplastique de type Mohr-Coulomb est très souvent utilisé pour la zone de faille afin de modéliser le risque de rupture en cisaillement lié à l'injection de CO₂ (i.e. le glissement) (Streit et Hillis, 2004 ; van Ruth et al., 2006). Dans le cadre du Bassin de Paris, l'étude de l'évolution de l'état de plastification du noyau de la faille au cours du processus d'injection de CO₂ a été étudiée par Vu (2012) en utilisant le modèle élastoplastique de Drucker-Prager, avec une loi associée sans écrouissage. Dans son travail, Vu a montré qu'il existait une gamme de pressions d'injection très sensible dans laquelle la longueur totale de plastification de la faille évolue assez brusquement (pour l'injection des pressions entre 1.5 et 1.6 fois la pression hydrostatique à l'état initial au niveau du puits d'injection). A la fin de l'opération d'injection correspondant à une pression d'injection d'environ 2 fois de la pression hydrostatique, environ 80% de la longueur totale de la faille est plastifiée.

En plus de la plastification, le risque de propagation de la faille et de sismicité induite peut également se produire en raison de la diminution de la contrainte effective dans la zone de stockage. L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats d'une étude d'injection de CO₂ dans le Bassin de Paris en utilisant le Modèle de Fracture Cohésive (MFC) présenté dans le Chapitre 4. Pour ce faire, la zone de faille est simplifiée par un noyau rempli d'un matériau très peu perméable et deux zones endommagées horizontales situées à deux côtés de la faille. Le noyau de la faille est modélisé par des éléments de joints cohésifs à 4 nœuds d'épaisseur nulle. Les deux zones endommagées fortement fracturées autour de la faille sont simplifiées en deux zones élastiques avec des perméabilités équivalentes. Le CO₂ à l'état supercritique (i.e. en liquide) est injecté dans le puits d'injection. Pour des raisons de simplification, l'injection de CO₂ supercritique est considérée comme l'injection d'eau pure à faible incrément de pression pendant une longue durée. D'où aucun effet chimique n'est pris en

considération. On cherche à déterminer la longueur endommagée de la faille ainsi que le phénomène d'instabilité possible durant la procédure d'injection. Ce phénomène d'instabilité est potentiellement utile pour expliquer la sismicité induite qui peut être produite comme l'on a vu dans le cadre du projet de stockage de Castor en Espagne.

5.2 Modèle géologique du bassin de Paris et scénario d'injection

5.2.1 Description géologique du bassin et de la faille

Le Bassin de Paris est un système géologique complexe multicouche, qui se compose de plusieurs aquifères séparés par des formations peu perméables (Rohmer et Seyed, 2010):

- Aquifère de craie de l'unité géologique du Crétacé supérieur,
- Aquifère de grès de l'unité géologique Albien,
- Aquifère carbonaté des unités géologiques Crétacé inférieur et Oxfordien,
- Aquifère carbonaté de l'unité géologique du Dogger,
- Couches argileuses et couverture de faibles perméabilités.

Pour des raisons de simplicité, toutes les couches sont supposées horizontales ayant un poids volumique de 25 kN/m³.

Le modèle géométrique simplifié utilisé est un rectangle de 2500m de profondeur et de 24000m de largeur qui est traversé par une faille ayant une pente de 63°. Cette faille traverse quatre couches différentes : aquifère du Dogger inférieur, couverture, et partiellement aquifère carbonaté. Le modèle simplifié du Bassin de Paris et de la zone de faille est similaire à celui étudié par Vu (2012) et est présenté sur les Figure 5-1 et Figure 5-2.

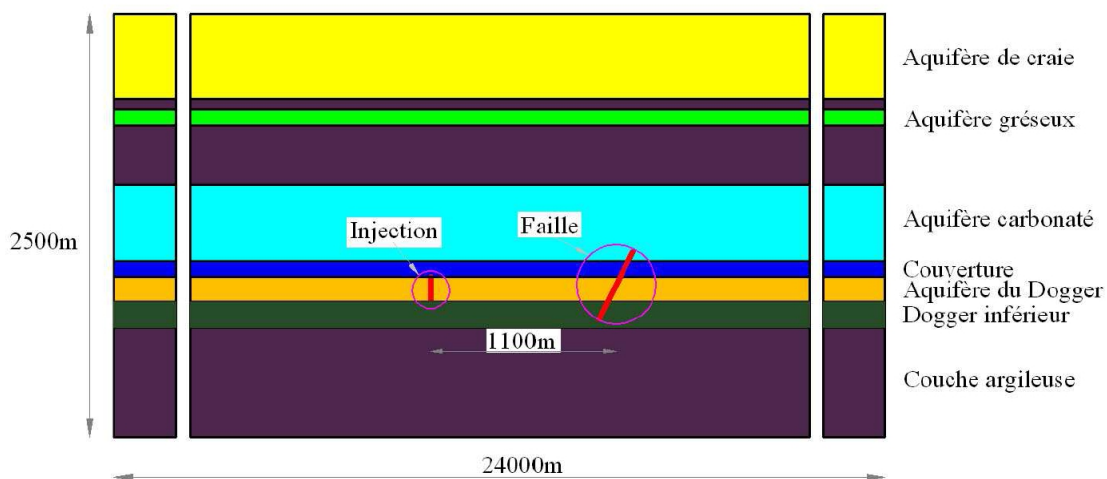


Figure 5-1 – Modèle géologique simplifié du Bassin de Paris (d'après Vu, 2012).

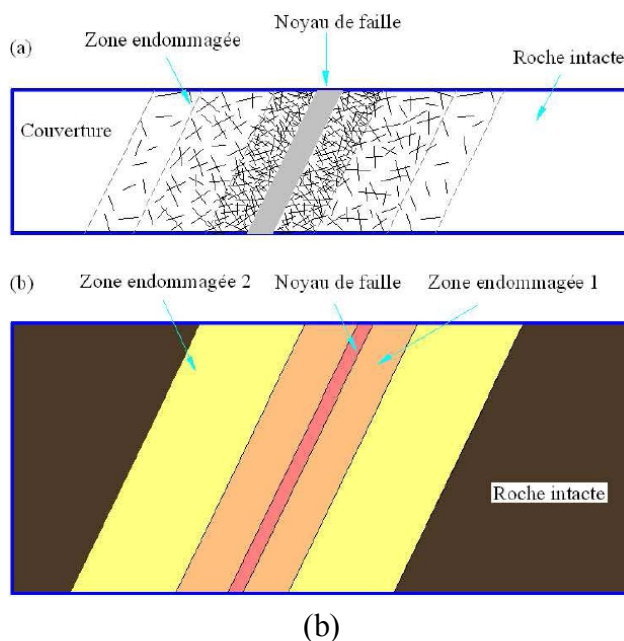


Figure 5-2 – Zones endommagées au tour de la faille (d'après Vu, 2012).

La composition minéralogique des couches géologiques sont données dans le [Tableau 5-1](#). Cette composition permet une estimation du module de compression des grains solides et puis le coefficient de Biot du milieu.

Tableau 5-1: Composition minéralogique en pourcentage (%) des couches géologiques du Bassin de Paris ([Thiebaut, 1925](#); [Nauleau, 2013](#))

Couches	Calcite	Dolomite	Phyllite	Halloysite	Mica Blanc
Aquifère de craie	95	5	0	0	0
Couche argileuse	8.25	0	23	4.2	15.4
Aquifère gréseux	7.9	28.85	50.6	0	4.65
Couche argileuse	8.25	0	23	4.2	15.4
Aquifère carbonaté	95	5	0	0	0
Couverture	11.5	0	64.05	3	7.9
Aquifère du Dogger	20	7.5	23.65	0	10.6
Dogger inférieur	20	7.5	23.65	0	10.6
Couche argileuse	0	0	29.9	0	17.3
Couches	Hmenite, rutile	Pyrite	Orthose	Quarts	
Aquifère de craie	0	0	0	0	
Couche argileuse	1.7	0	4.6	42.85	
Aquifère gréseux	0.55	0	0	7.45	
Couche argileuse	1.7	0	4.6	42.85	
Aquifère carbonaté	0	0	0	0	
Couverture	0.85	0.2	4.6	7.9	
Aquifère du Dogger	1.05	0.4	8.9	27.9	
Dogger inférieur	1.05	0.4	8.9	27.9	
Couche argileuse	0.8	0	26	26	

A partir de la composition minéralogique des couches géologiques dans le [Tableau 5-1](#) et des modules de compression des minéraux donnés par [Bass \(1995\)](#), le module équivalent des grains solides de chaque couche peut être estimé en utilisant le moyen de [Hill \(1952\)](#).

Ghabezloo et Sulem (2009) ont montré que cette méthode donne une bonne estimation de module de compression des grains solides pour une roche ayant une microstructure hétérogène. Les modules de compression des grains solides et d'autres propriétés hydromécaniques des couches géologiques du Bassin de Paris, partiellement basées sur Ducellier et al. (2011) et Seyedi et al. (2011), sont récapitulés dans le Tableau 5-2.

Tableau 5-2: Propriétés hydromécaniques des couches géologiques du Bassin de Paris (t : épaisseur ; D : profondeur ; E : module d'Young ; ν : coefficient de Poisson ; ϕ : porosité ; k : perméabilité) (partiellement basées sur Ducellier et al., 2011 et Seyedi et al., 2011)

Nom de la couche	t(m)	D(m)	E (GPa)	ν	ϕ (%)	k (m ²)	K_s (GPa)	b
Aquifère de craie	500	500	5	0.3	30	1.0×10^{-16}	74.26	0.94
Couche argileuse	60	560	6.65	0.285	5	1.0×10^{-16}	59.01	0.91
Aquifère gréseux	100	660	10	0.3	25	0.5×10^{-12}	57.48	0.86
Couche argileuse	350	1010	6.65	0.285	5	1.0×10^{-19}	59.01	0.91
Aquifère carbonaté	450	1460	15	0.3	15	1.0×10^{-14}	74.26	0.83
Couverture	90	1550	20	0.3	15	1.0×10^{-22}	51.77	0.68
Aquifère du Dogger	150	1700	6.65	0.285	5	1.0×10^{-14}	60.85	0.92
Dogger inférieur	150	1850	24	0.29	15	1.0×10^{-19}	60.85	0.92
Couche argileuse	650	2500	42	0.29	10	1.0×10^{-21}	63.63	0.48

La zone de faille se compose d'un noyau entouré par une structure très complexe, celle qui est simplifiée par deux zones fracturées (zone endommagée 1 et 2) avoisinantes. La faille ayant une longueur d'environ 450 m dont les extrémités se trouvent respectivement à une profondeur de 1400 m et 1800 m et entre la coordonnée horizontale de 6900 m et 7100 m par rapport au centre du modèle. Une description plus détaillée de cette zone est présentée dans la Figure 5-2b. Le noyau de faille est considéré comme une couche d'argile très peu perméable d'une épaisseur de 1 m dont les propriétés hydromécaniques sont données dans le Tableau 5-3.

Tableau 5-3: Propriétés hydromécaniques du noyau de faille (Vu, 2012)

Paramètres	Valeurs
Module d'Young	6.65GPa
Coefficient de Poisson	0.285
Cohésion	1.22MPa
Angle de frottement	25.4°
Perméabilité intrinsèque	10^{-21} m ²
Porosité	0.05

La zone endommagée 1, d'épaisseur de 10 m de chaque côté de la faille, contient une densité très forte de fractures intersectées. La zone endommagée 2, d'épaisseur de 30 m de chaque côté de la faille, présente une densité moyenne de fractures intersectées ou non. A l'extérieur de la zone de faille se trouve la roche intacte. Grâce à son architecture, la zone de faille joue deux rôles différents : (i) en raison de son réseau de fractures intersectées, la zone de faille se comporte comme une conduite hydraulique vers le haut, (ii) en revanche, la faible perméabilité du noyau de la faille fournit une barrière hydraulique latérale. Chaque zone endommagée comprend plusieurs familles de fractures avec différents densité, longueur,

angle d'orientation, épaisseur et raideur. Les paramètres de deux zones endommagées et différentes familles de fractures sont présentés dans le [Tableau 5-4](#).

Tableau 5-4: Paramètres des familles des fractures dans les zones endommagées 1 et 2 (ρ : densité des fractures ; l : longueur moyenne ; θ : orientation moyenne ; e_0 : ouverture initiale moyenne ; k_{nn} : raideur normale) (Vu, 2012)

Numéro de famille	ρ	l (m)	$\theta(0 \leq \theta < \pi)$	e_0 (mm)	k_{nn} (GPa)
Zone endommagée 1					
1	0.56	0.70	2.6167	0.125	60
2	0.33	0.92	1.0467	0.125	60
3	0.36	0.81	2.3550	0.125	60
4	0.15	0.62	1.0467	0.125	60
5	0.18	0.22	1.9189	0.125	60
Zone endommagée 2					
1	0.36	0.70	2.6167	0.125	60
2	0.33	0.92	1.0467	0.125	60
3	0.16	0.81	2.3550	0.125	60

En se basant sur la perméabilité intrinsèque du noyau de la faille ainsi que d'autres paramètres de deux zones endommagées, [Vu \(2012\)](#) a utilisé le modèle auto-cohérent afin de calculer les perméabilités équivalentes de ces deux zones. Les valeurs obtenues par [Vu \(2012\)](#) sont réemployées dans le cadre de ce travail. Il est à noter qu'avec les familles de fracture considérés dans le [Tableau 5-4](#), les perméabilités initiales des zones endommagées 1 et 2 sont respectivement de quatre et deux ordres de grandeur supérieures à la perméabilité de la roche de couverture.

5.2.2 Modèle aux éléments finis et conditions aux limites

Le maillage et des conditions aux limites du modèle simplifié du Bassin de Paris sont présentés dans la [Figure 5-3](#). La zone de faille est raffinée afin d'obtenir des résultats avec une bonne précision. Les éléments triangulaires sont utilisés pour la matrice environnante tandis que les éléments de joints cohésifs à 4 nœuds sont utilisés pour le noyau de la faille. Le modèle en éléments finis se compose de 5467 nœuds avec 10310 éléments.

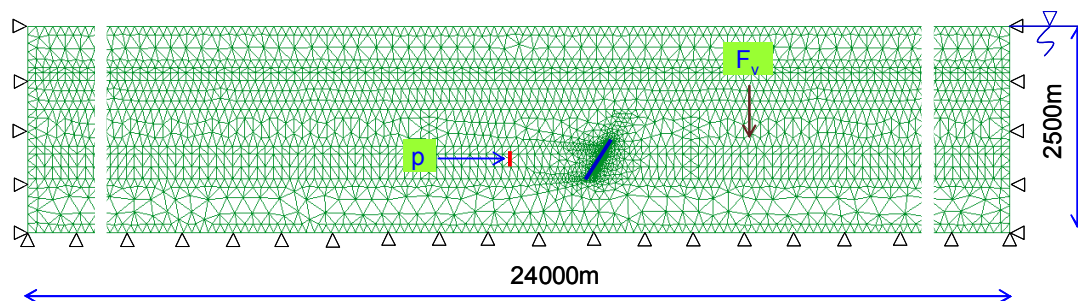


Figure 5-3 – Modèle en éléments finis et conditions aux limites du modèle de Bassin de Paris

Les types de charges suivants sont à considérer :

- Charge due au poids propre des couches géologiques. Pour des raisons de simplicité, toutes les couches sont supposées avoir le même poids volumique de 25 kN/m³ afin de calculer la contrainte verticale initiale.
- Pression hydrostatique due à la nappe phréatique. Son niveau est supposé à la surface du modèle (Rohmer et Seyedi, 2010 ; Nauleau, 2013). Le poids volumique de l'eau est de 10 kN/m³ et son module de compression est de 2.2 GPa.
- Pression de fluide dans le puits d'injection.

Les propriétés hydromécaniques des couches géologiques sont présentées dans le [Tableau 5-2](#). Pour les deux zones endommagées 1 et 2, les perméabilités initiales de ces zones sont respectivement de quatre et deux ordres de grandeur supérieure à la perméabilité de la roche couverture. En ce qui concerne le noyau de la faille, à part quelques propriétés présentées dans le [Tableau 5-3](#), les autres paramètres sont déterminés de la manière suivante :

Les raideurs des éléments de joints sont estimées en utilisant l'hypothèse d'une couche mince avec E et e étant respectivement le module d'Young et l'épaisseur du noyau de la faille: $k_{nn} = E/e$, $k_{tt} = G^*/e = E/2e(1+\nu)$, $k_{nt} = k_{tn} = 0$. Les raideurs résiduelles sont supposées égales à 20% de la raideur normale initiale k_{nn} (Bemani Yazdi, 2009), la fermeture maximale est supposée égale à $e_0 = 1$ mm. Les autres paramètres sont : la résistance en traction $\sigma_R = 1.55$ MPa et le paramètre de radoucissement $\beta = 1.0$.

Pour ce qui est des conditions aux limites, des déplacements normaux nuls sont imposés sur les bords gauche et droit car ces deux bords sont suffisamment loin de la zone de faille ainsi que le puits d'injection. Les résultats de quelques simulations élémentaires ont permis de justifier ces conditions. En ce qui concerne le bord inférieur du modèle, il est supposé que ce bord repose sur une structure rocheuse infiniment rigide, d'où le bord inférieur est bloqué verticalement. Un flux de fluide normal nul est imposé sur les bords gauche et droit, ce qui signifie qu'il n'y a pas de fluide qui sort horizontalement au niveau de ces deux bords. Cette condition de flux de fluide nul sera justifiée ultérieurement par des résultats de simulations numériques. Sur le bord supérieur, la pression de fluide est mise à zéro, la pression de fluide de référence étant égale à la pression atmosphérique. Les calculs sont faits en configuration de déformations planes.

5.2.3 Définition d'un scénario d'injection

Pour des raisons de simplicité, il est à noter que la procédure d'injection de CO₂ à l'état supercritique (i.e. en état fluide) dans ce travail doit être comprise comme une injection d'eau dans un milieu saturé. L'effet chimique n'est pas pris en compte. Un puits d'injection se trouve dans le réservoir du Dogger (entre 1550 et 1700m de profondeur). Ce puits est localisé à 1100m du milieu de la faille. Le gradient de température est de 0.041°C/m. Dans le puits d'injection, la température moyenne s'élève à 67°C. Le fluide a souvent une faible viscosité car cette dernière évolue avec la température. Dans cette étude, la viscosité dynamique du fluide est prise égale à 4.04×10^{-4} Pa.s. La procédure d'injection est opérée pendant 22.5 ans

pour une pression d'injection totale de 22.5 MPa (Figure 5-4). Le processus d'injection peut être modélisé par un accroissement linéaire de la pression interstitielle dans le réservoir à partir de la pression hydrostatique au niveau du puits (17 MPa) jusqu'à la pression d'injection souhaitée (39.5 MPa). L'injection est suffisamment lente avec des pas de temps de simulation petits.

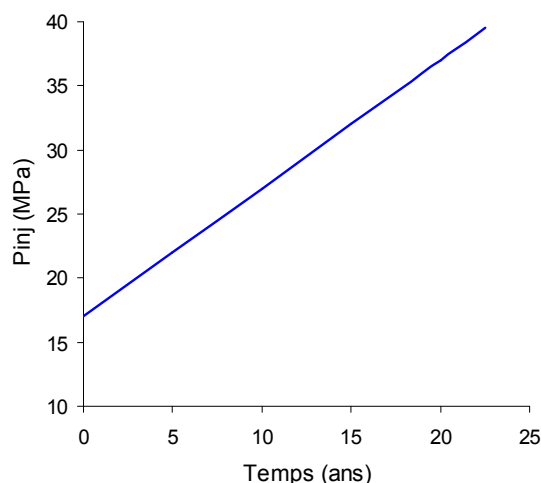


Figure 5-4 – Scénario d'injection : la pression est linéairement injectée dans le puits à partir de la pression hydrostatique au niveau du puits (17 MPa) jusqu'à une valeur maximale de 39.5 MPa sur une durée totale de 22.5 années.

5.3 Comportement de la zone de faille

5.3.1 Etat initial avant injection

La Figure 5-5 présente le champ de pression interstitielle et de contraintes dans le massif avant l'opération d'injection. A cet état initial, la pression interstitielle augmente graduellement avec la profondeur de 0 (à la surface supérieure du Bassin) à 25 MPa (à la surface inférieure du Bassin). Au niveau du puits d'injection, la pression interstitielle est d'environ 17 MPa. La contrainte verticale due au poids propre des couches géologiques augmente linéairement avec la profondeur de 0 (à la surface supérieure du Bassin) à 62.5 MPa (à la surface inférieure du Bassin). Ainsi, la contrainte effective verticale à l'état initial dans le massif avant l'opération d'injection évolue linéairement selon la profondeur pour atteindre sa valeur maximale à la surface inférieure du Bassin. Vu sa géométrie, la faille est sollicitée en mode mixte de compression-cisaillement, la faille est considérée saine à l'état initial.

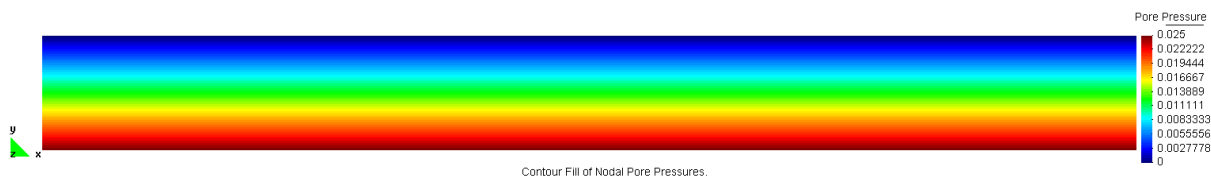


Figure 5-5 – (a) Champ de pression interstitielle à l'état initial avant l'injection.

Les champs de contraintes effectives σ'_{xx} , σ'_{yy} , σ'_{xy} et σ'_{zz} sont présentés dans la Figure 5-6. Il est à noter que la présence de la faille est à l'origine d'une perturbation légère de ces champs de contraintes au tour de la zone de faille. Loin de cette dernière, les champs de contraintes sont distribués de façon quasiment homogène dans la direction horizontale.

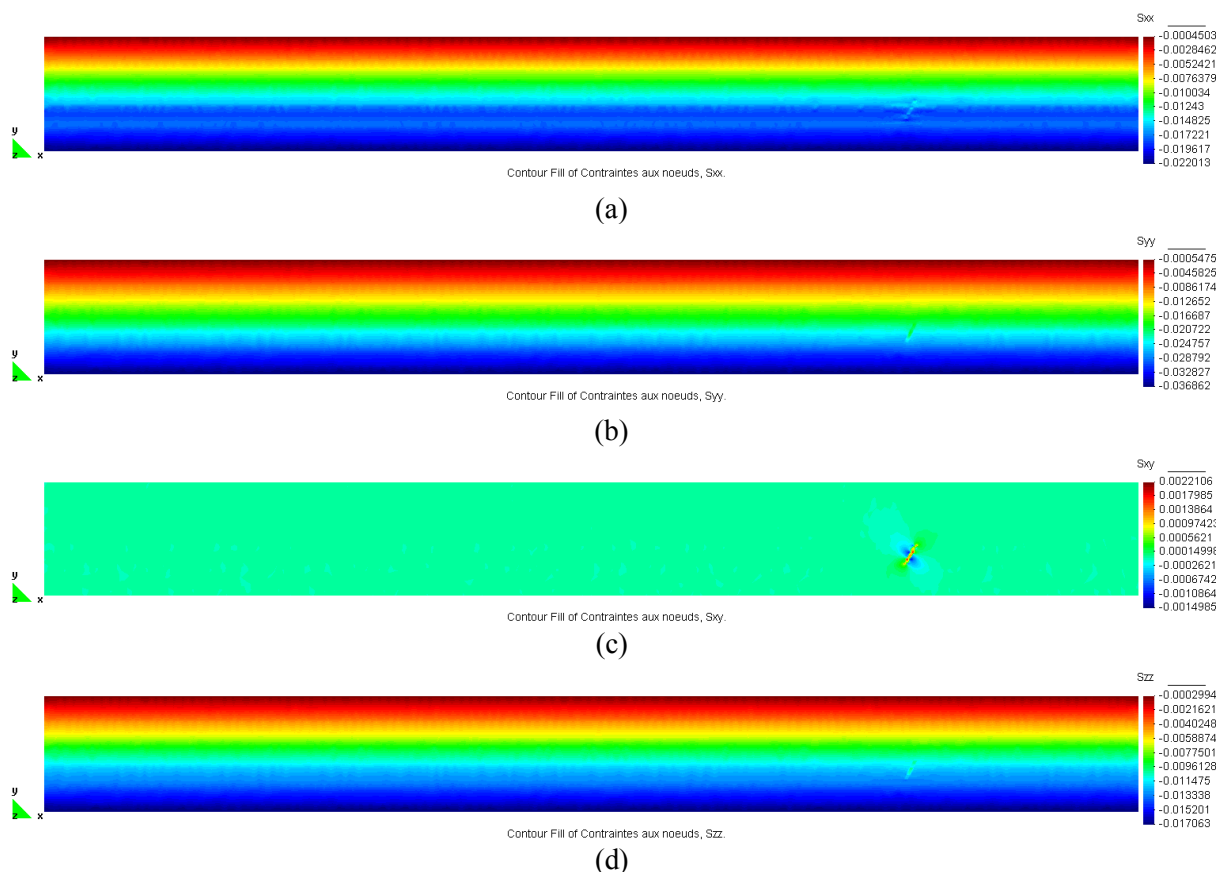


Figure 5-6 – (a) Champ de contrainte σ'_{xx} , (b) Champ de contrainte σ'_{yy} , (c) Champ de contrainte σ'_{xy} et (d) Champ de contrainte σ'_{zz} à l'état initial avant l'opération d'injection.

5.3.2 Au cours de la procédure d'injection

La Figure 5-7 présente l'évolution du champ de pression interstitielle dans le Bassin à différents temps jusqu'à la fin de la procédure d'injection.

Etant donné que la perméabilité du réservoir est beaucoup plus grande que celles de la couche de couverture supérieure et de l'aquifère du Dogger inférieur, le fluide est diffusé plus facilement et principalement dans le réservoir. En plus, les deux zones de faille ont une densité forte de fractures hétérogènes, qui augmente considérablement la perméabilité équivalente de ces deux zones par rapport à la perméabilité de la couche de couverture, d'où une facilité pour le fluide de s'écouler le long de ces deux zones vers la couverture supérieure ainsi que l'aquifère du Dogger inférieur. Il est à noter que la pression interstitielle sur les deux bords gauche et droite ne varie quasiment pas pendant la procédure d'injection. D'où les conditions aux limites de flux de fluide nul appliqué sur ces deux bords dans notre modèle.

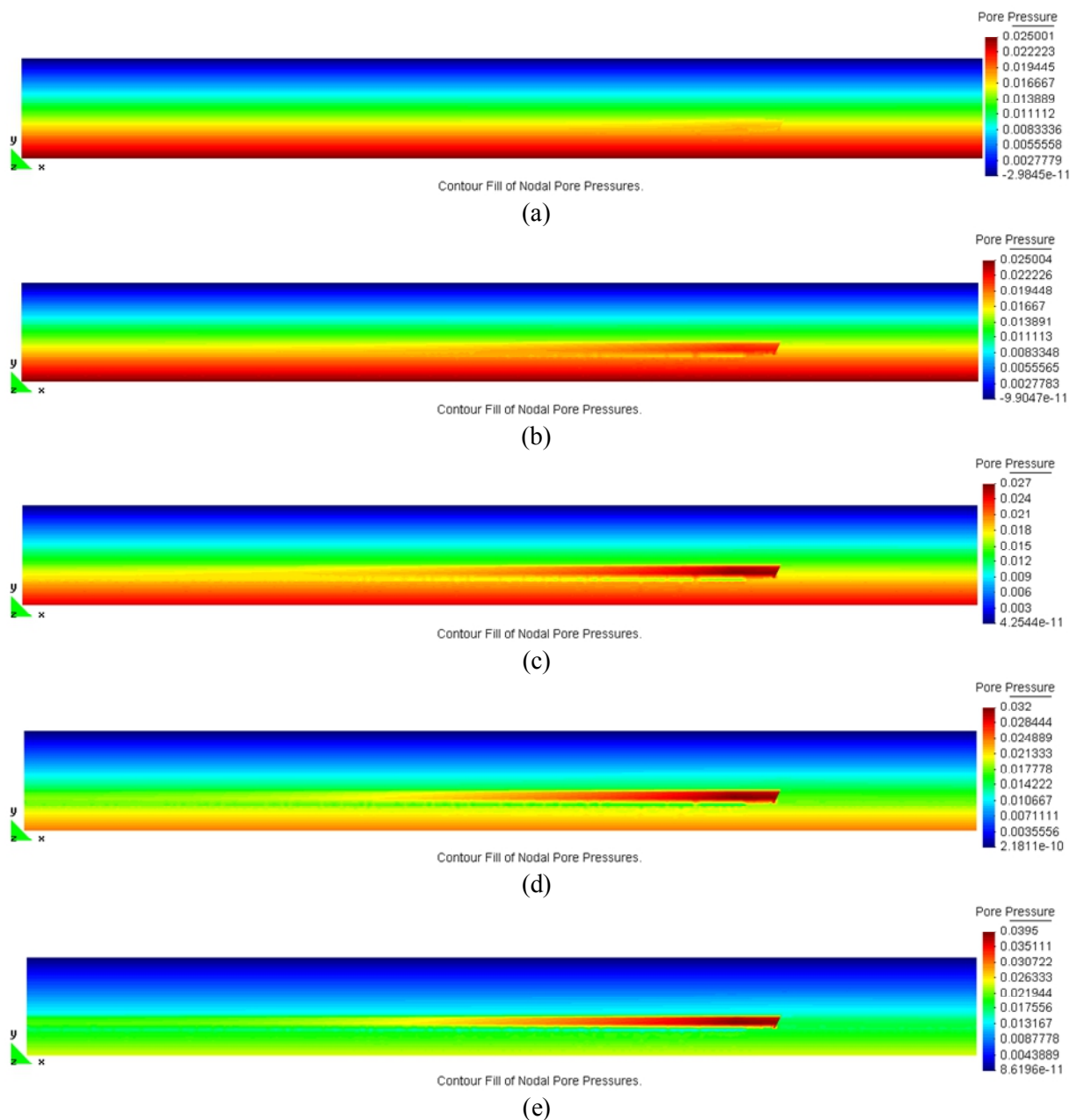


Figure 5-7 – Evolution du champ de pression interstitielle dans la formation géologique à différents temps d'injection : (a) à 1 an, (b) à 5 ans, (c) à 10 ans, (d) à 15 ans, et (e) à 22.5 ans (i.e. fin de la procédure d'injection).

La Figure 5-8 présente l'évolution de pression interstitielle sur une coupe horizontale passant par le point d'injection ainsi que la zone de faille à différents temps d'injection. La pression interstitielle est maximale au point d'injection et diminue vers les deux côtés. Pour le côté droit, du fait de la présence de la faille qui a une perméabilité très faible par rapport au réservoir et aux zones endommagées et fonctionne comme une barrière hydraulique, la pénétration du fluide est empêchée. Une discontinuité de la pression interstitielle sur la coupe horizontale est observée. Cette discontinuité augmente au cours du processus d'injection.

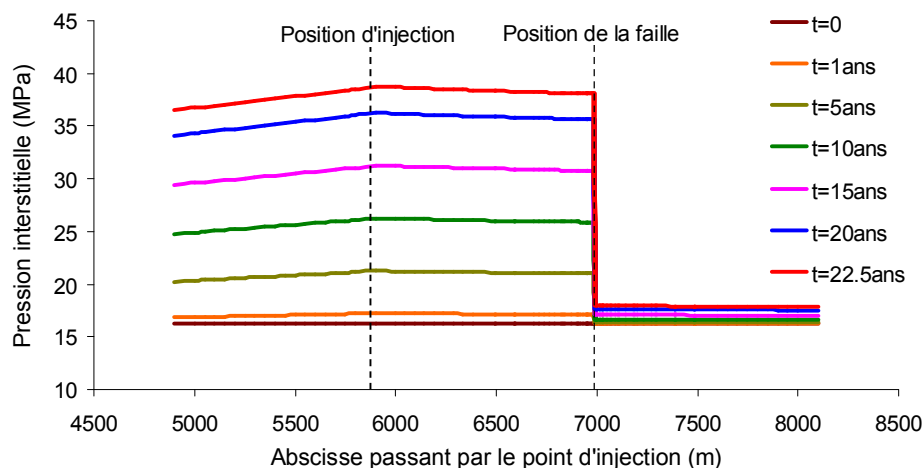


Figure 5-8 – Evolution de la pression interstitielle dans la couche de réservoir en présence de la zone de faille à différents temps d'injection.

La Figure 5-9 présente l'évolution de la pression interstitielle sur une coupe passant par l'interface entre le noyau de la faille et le réservoir à différents temps d'injection.

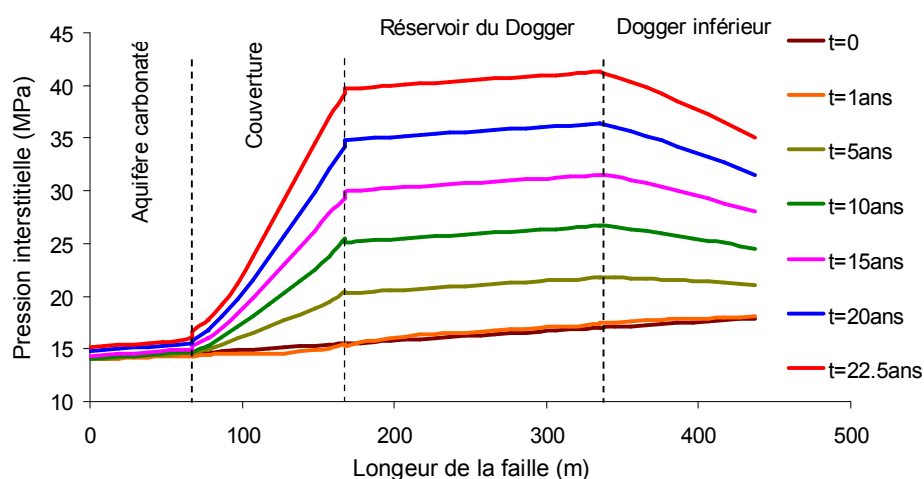


Figure 5-9 – Evolution de la pression interstitielle à l'interface entre les couches géologiques et la zone de faille à différents temps d'injection.

En général, la pression interstitielle augmente au cours de l'injection. Étant donné que l'injection se fait dans le réservoir du Dogger, la pression interstitielle augmente très facilement dans ce réservoir et puis se diffuse vers la couche de couverture supérieure ou bien vers la couche de Dogger inférieur. La perméabilité de la zone endommagée dans la couverture ayant une perméabilité plus grande que celle de la couverture mais reste encore plus petite que celles de l'aquifère carbonaté et du réservoir du Dogger, ainsi, le fluide s'écoule plus difficilement dans la zone endommagée de la couverture par rapport aux autres couches. On peut constater également une légère augmentation de la pression interstitielle dans l'aquifère carbonaté au cours de l'injection, ce qui signifie que le fluide injecté a traversé la zone endommagée dans la couverture et est monté vers l'aquifère carbonaté plus haut. De