

# THESE

Présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE LILLE 1 SCIENCES ET  
TECHNOLOGIES

L'école doctorale : Sciences pour l'ingénieur (SPI)

Spécialité : Génie civil

Préparée au

Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement(LGCgE)

## CONTRIBUTION A L'ETABLISSEMENT D'UN MODELE RHEOLOGIQUE THERMO-HYDRO-CHIMIO MECANIQUE DE L'ARGILITE DU CALLOVO OXFORDIEN

Présentée par :

TRAN Tan Huy

*Soutenue le 08 décembre 2015 devant la commission d'examen composée de Messieurs:*

M. Yu Jun CUI	Professeur	Ecole des Ponts ParisTech	Rapporteur
M. Fabrice BERNARD	MdC-HDR	INSA de Rennes	Rapporteur
M. François Laigle	Ingénieur de recherche	EDF	Examinateur
Christophe IMBERT	Ingénieur de recherche	CEA	Examinateur
M. Isam SHAHROUR	Professeur	Université Lille 1	Examinateur
M. Jean Claude ROBINET	Professeur	EGC	Invité
M. Ali ZAOUÏ	Professeur	Ecole Polytechnique de Lille / Université Lille 1 Sciences et Technologies	Directeur de thèse

## REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier Monsieur Ali ZAOUI, Professeur de l'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille, et Monsieur Jean Claude ROBINET, directeur du laboratoire Euro-Géomat-Consulting, qui m'ont accueilli au sein de leurs équipes et m'ont permis de réaliser ce travail. J'ai pu apprécier leurs conseils, leur connaissance ainsi que leur rigueur scientifique.

Je voudrais adresser ma plus grande reconnaissance à Monsieur Yu Jun CUI, professeur de l'Ecole des Ponts ParisTech, et à Monsieur Fabrice BERNARD, MdC-HDR de l'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce mémoire. C'est un grand honneur qu'ils me font en acceptant de juger mon travail, apportant ainsi à ce mémoire leur caution scientifique.

Je tiens à remercier Isam SHAHROUR, professeur de l'Université Lille 1, directeur du LGCgE, pour m'avoir fait l'honneur d'être président du jury. Je remercie également Monsieur François Laigle, ingénieur de recherche à l'EDF, et Monsieur Christophe IMBERT, ingénieur de recherche au CEA, d'avoir acceptée de faire partie du jury en tant qu'examineurs

Je remercie tous les collègues et amis avec qui j'ai contribué à travers leurs discussions scientifiques, leur amitié et leur assistance en français et surtout un énorme merci à tous les membres de ma famille pour leur soutien pendant des années en France.

## TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>2</b>
<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>I</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>V</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>IX</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>I</b>
<b>CHAPITRE I. SPECIFICITES DE L'ARGILITE DU CALLOVO-OXFORDIEN ET LES IMPLICATIONS SUR LA MODELISATION.....</b>	<b>3</b>
<b>I.1 Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>I.2 Le modèle conceptuel de l'argilite.....</b>	<b>5</b>
I.2.1 Diagenèse .....	5
I.2.2 Endommagement .....	6
I.2.3 Interaction fluide-solide .....	8
I.2.4 Comportement à long terme des argilites .....	8
<b>I.3 Conclusion .....</b>	<b>10</b>
<b>CHAPITRE II. FORMULATION D'UN MODELE HYDROMECHANIQUE POUR L'ARGILITE DU CALLOVO-OXFORDIEN .....</b>	<b>11</b>
<b>II.1 Formulation du modèle élasto-plastique avec endommagement anisotrope .....</b>	<b>12</b>
II.1.1 Rappel du modèle conceptuel.....	12
II.1.2 Formulation du modèle.....	13
<b>II.2 Modèle SC2D pour l'argilite de Callovo-Oxfordien .....</b>	<b>13</b>
II.2.1 La distribution des contraintes dans le modèle SC2D .....	14
II.2.2 Comportement élasto-plastique d'endommagement de l'argilite.....	16
II.2.3 Caractérisation des coefficients d'endommagement .....	17
II.2.3.1 La loi de Weibull originale .....	17
II.2.3.2 La loi de Weibull adaptée aux matériaux cimentaires.....	17
a) Evaluations du paramètre m et de la contrainte $\sigma_u$ .....	17
b) Nouvelle formulation - Modèle de Mazars .....	19

II.2.3.3 Evaluations des valeurs des déformations limites en extension $\varepsilon_{lim}^-$ à partir des essais en extension sur échantillons carottés .....	19
II.2.4 Caractérisation des surfaces de discontinuités.....	20
II.2.5 Caractérisation de la viscosité .....	21
<b>II.3 Rappel succinct des hypothèses du modèle SC2D pour l'argilite de Callovo-Oxfordien .....</b>	<b>22</b>
<b>II.4 Application du Modèle SC2D Pour le cas de déformations planes .....</b>	<b>24</b>
II.4.1 Modèle SC2D endommagement piloté par les déformations en extension sans prise en compte de la rotation des contraintes principales .....	25
II.4.2 Modèle SC2D endommagement anisotrope avec prise en compte de la rotation des contraintes principales.....	26
II.4.3 Méthode de régularisation .....	27
<b>II.5 Conclusion.....</b>	<b>27</b>
 <b>CHAPITRE III. APPLICATION DU MODELE SC2D A LA SIMULATION DES CHEMINS DE SOLLICITATION SIMPLE .....</b>	 <b>29</b>
<b>III.1 Parametres utilises.....</b>	<b>30</b>
<b>III.2 Simulation des chemins de contraintes à proximité de la paroi d'une galerie (Tâche 1).....</b>	<b>30</b>
III.2.1 Cas test n°11 (état de contrainte initial isotrope) .....	30
III.2.1.1 Chemin de sollicitation.....	30
III.2.1.2 Résultats des simulations du test 11 .....	31
III.2.2 Cas test n°12 (état de contrainte initial anisotrope).....	33
III.2.2.1 Chemin de sollicitation.....	33
III.2.2.2 Résultats des simulations du test 12.....	34
III.2.3 Cas test n°13 (état de contrainte initial anisotrope).....	36
III.2.3.1 Chemin de sollicitation.....	36
III.2.3.2 Résultats des simulations du test 13 .....	38
<b>III.3 Simulation des chemins de contraintes avec rotation des axes principaux de contrainte (Tâche 2) .....</b>	<b>39</b>
III.3.1 Cas test n°21 (état de contrainte initial isotrope) .....	39
III.3.1.1 Chemin de sollicitation.....	39
III.3.1.2 Résultats des simulations du test 21 .....	41
III.3.2 Cas test n°22 (état de contrainte initial anisotrope).....	42
III.3.2.1 Chemin de sollicitation.....	42

---

III.3.2.2 Résultats des simulations du test 22 .....	46
<b>III.4 Simulation des chemins en contraintes effectives avec couplage HM (Tâche 3) .....</b>	<b>47</b>
III.4.1 Cas tests n°31 (état de contrainte initial isotrope).....	47
III.4.1.1 Chemin de sollicitation.....	47
III.4.1.2 Résultats des simulations du test 31 .....	48
III.4.2 Cas tests n°32 (état de contrainte initial anisotrope) .....	49
III.4.2.1 Chemin de sollicitation.....	49
III.4.2.2 Les résultats des simulations du test 32 .....	51
<b>III.5 Conclusion .....</b>	<b>52</b>
<b>CHAPITRE IV. APPLICATION DU MODELE SC2D A LA CREATION DES ZONES ENDOMMAGEES FRACTUREES AUTOUR DES OUVRAGES EXCAVEES.....</b>	<b>53</b>
<b>IV.1 Position du problème .....</b>	<b>54</b>
<b>IV.2 Modèle SC2D pour l'argilite non perturbée et les paramètres utilisés.....</b>	<b>54</b>
<b>IV.3 Simulation de l'excavation d'une galerie orientée suivant la contrainte horizontale mineure petit h (test1) .....</b>	<b>57</b>
IV.3.1 Les conditions limites du problème et le maillage utilisé.....	57
IV.3.2 Evolution des valeurs suivant l'axe X (coupe C1-C1).....	57
IV.3.2.1 Contraintes .....	57
IV.3.2.2 Déplacements et déformations .....	60
IV.3.3 Evolution des valeurs suivant l'axe Y (coupe C2-C2).....	61
IV.3.3.1 Contraintes .....	61
IV.3.3.2 Déplacements et déformations .....	63
IV.3.4 Evolution des valeurs suivant l'axe à 45° (coupe C3-C3) .....	64
IV.3.4.1 Contraintes .....	64
IV.3.4.2 Déplacements et déformations .....	67
IV.3.5 Evolution des coefficients d'endommagements du test 1 .....	69
IV.3.6 Conclusion .....	70
<b>IV.4 Simulation de l'excavation d'une galerie orientée suivant la contrainte horizontale majeure grand H (test2).....</b>	<b>72</b>
IV.4.1 Les conditions limites du problème et le maillage utilisé.....	72
IV.4.2 Evolution des valeurs suivant l'axe X (coupe C1-C1).....	72
IV.4.2.1 Contraintes .....	72
IV.4.2.2 Déplacements et déformations .....	75

---

---

IV.4.3 Evolution des valeurs suivant l'axe Y (coupe C2-C2).....	76
IV.4.3.1 Contraintes .....	76
IV.4.3.2 Déplacements et déformations .....	78
IV.4.4 Evolution des valeurs suivant l'axe à 45° (coupe C3-C3) .....	79
IV.4.4.1 Contraintes .....	79
IV.4.4.2 Déplacements et déformations .....	82
IV.4.5 Evolution des coefficients d'endommagement du test 2 .....	84
IV.4.6 Conclusion .....	85
<b>CHAPITRE V. APPLICATION DU MODELE SC2D A L'OBSERVATION DES EFFETS DIFFERES AUTOUR DES OUVRAGES APRES L'EXCAVATION.....</b>	<b>87</b>
<b>V.1 Calage des parametres de viscosite .....</b>	<b>88</b>
V.1.1 Sur les essais de fluage dans la direction perpendiculaire à la stratification $\sigma_v$ et dans la direction de la contrainte majeure .....	88
V.1.2 Application du modèle de viscosité aux mesures de convergence de la galerie orientée dans la direction horizontale majeure $\sigma_H$ .....	90
V.1.2.1 Cas de la convergence verticale .....	90
V.1.2.2 Cas de la convergence horizontale .....	91
V.1.3 Application du modèle de viscosité aux mesures de convergence de la galerie orientée dans la direction horizontale mineure $\sigma_h$ .....	92
V.1.3.1 Cas de la convergence verticale .....	92
V.1.3.2 Cas de la convergence horizontale .....	92
<b>V.2 Simulation de l'évolution spatio-temporelle des déformations différées du test 1 ....</b>	<b>94</b>
V.2.1 Simulation de l'évolution spatio-temporelle des déformations.....	94
V.2.2 Simulation de l'évolution spatio-temporelle des déplacements et convergences .....	95
<b>V.3 Simulation de l'évolution spatio-temporelle des déformations différées du test 2 ....</b>	<b>96</b>
V.3.1 Simulation de l'évolution spatio-temporelle des déformations.....	96
V.3.2 Simulation de l'évolution spatio-temporelle des déplacements et convergences .....	97
<b>V.4 Comparaison avec des autres resultats .....</b>	<b>98</b>
V.4.1 Test 1 (direction petit h) .....	98
V.4.2 Test 2 (direction grand H) .....	99
<b>V.5 Conclusion.....</b>	<b>100</b>
<b>CHAPITRE VI. CONCLUSIONS ET DISCUSSIONS .....</b>	<b>101</b>
<b>VI.1 Evolution d'une zone endommagée fracturée pendant l'excavation .....</b>	<b>101</b>

---

<b>VI.2 Evolution des effets differes autour des ouvrages apres l’excavation.....</b>	<b>105</b>
<b>VI.3 Perspectives .....</b>	<b>107</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>109</b>
<b>ANNEXE A : EVOLUTION DE LA POROSITE.....</b>	<b>113</b>
<b>ANNEXE B : EVALUATION DES COEFFICIENTS DU TENSEUR DE BIOT.....</b>	<b>115</b>
<b>ANNEXE C : EVALUATION DE LA PRESSION DE CONSOLIDATION APPARENTE DE L’ARGILITE ET CALIBRATION DE LA SURFACE DE DIAGENESE .....</b>	<b>116</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 0-1 : Site de stockage des déchets radioactifs.....	i
Figure I-1 : Bloc diagramme géologique 3D du secteur de Meuse/Haute Marne (Andra 2005)4	4
Figure I-2 : Carte minéral de l’argilte (J.Ch ROBINET, 2006) .....	4
Figure I-3 : Argilite observée au MEB (dans la matrice argileuse, on distingue au microscope, P : macroporosité, Q: grain de quartz, Cal: grain de calcite, Ma: minéraux argileux), (Andra 2005).....	5
Figure I-4 : Photographie MEB des deux types de «fissure » d’endommagement des argilites(ANDRA,2011) .....	6
Figure I-5 : Photographie MEB de «macro fissure » d’endommagements orientées suivant lrd carbonates(ANDRA,2011).....	7
Figure I-6 : Les discontinuités observées dans le laboratoire URL pour des galeries orientées dans la direction $\sigma_H$ et $\sigma_h$ (Armand & al 2013) .....	7
Figure I-7 : Essais triaxiaux (a) en compression et (b) en extension (EGC 2011).....	8
Figure I-8 : Evolution des déformations visqueuses sous confinement de 12MPa et déviateur de 43.5MPa (EGC 2013).....	9
Figure I-9 : Evolution des déformations visqueuses sous confinement de 12MPa et déviateur de 38.25MPa (EGC 2013).....	9
Figure I-10 : Evolution des déformations visqueuses sous confinement de 12MPa et déviateur de 29.5MPa (EGC 2013).....	10
Figure II-1 : Schématisation de la surface limite de diagénèse de l’argilite Meuse Haute Marne en deux étapes .....	12
Figure II-2 : Schématisation de l’état de contrainte totale anisotrope à 517 m de profondeur	13
Figure II-3 : Surfaces de charge pour l’argilite .....	15

---

Figure II-4 : Simulations paramétriques de l'essai de traction directe dans les directions perpendiculaire et parallèle à la stratification (Data source EGC-CEA LG géomécanique). ..	18
Figure II-5 : Simulation paramétrisée de l'essai de traction directe (Data source EGC-CEA) .....	20
Figure II-6 : Les premières surfaces de discontinuité pendant le phase d'excavation (16 jours) pour une galerie orientée dans la direction $\sigma_H$ .....	21
Figure II-7 : Les premières surfaces de discontinuité pendant le phase d'excavation (16 jours) pour une galerie orientée dans la direction $\sigma_h$ .....	21
Figure II-8: Comparaison entre le modèle SC2D et les essais du LAEGO sur des chemins de chargement triaxiaux pour Hr :90% et 75% du déviateur de pic .....	22
Figure II-9 : Réponse à une sollicitation triaxiale du modèle SC2D de l'argilite pour essais de compression et d'extension .....	24
Figure II-10 : Référentiel confondu avec les directions des contraintes principales in situ.....	25
Figure II-11 : Schématisation des déformations limites et plans de discontinuités correspondants aux valeurs unitaires des coefficients d'endommagement.....	25
Figure II-12 : Essai de torsion sur cylindre creux .....	26
Figure III-1 : Chemin de sollicitation en contraintes totales du cas n°11 .....	30
Figure III-2 : Chemin AB en contraintes effectives, déviateur et pression moyenne du test 11 .....	31
Figure III-3 : Evolutions temporelles des déformations du test n°11 .....	31
Figure III-4 : Evolutions des contraintes en fonction de déformation du test n°11 .....	32
Figure III-5 : Evolutions temporelles des coefficients d'endommagement du test n°11 .....	32
Figure III-6 : Plan de discontinuité cas test 11 .....	33
Figure III-7 :Chemin de sollicitation en contraintes totales du cas n°12 .....	33
Figure III-8 : Chemin AB en contraintes effectives, déviateur et pression moyenne du test 12 .....	34
Figure III-9 : Evolutions temporelles des déformations du test n°12 .....	35
Figure III-10 : Evolutions des contraintes en fonction de déformation du test n°12 .....	35
Figure III-11 : Evolutions temporelles des coefficients d'endommagement du test n°12 .....	35
Figure III-12 : Plan de discontinuité cas test 12.....	36
Figure III-13 : Chemin de sollicitation en contraintes totales du cas n°13 .....	36
Figure III-14 : Chemin AB en contraintes effectives, déviateur et pression moyenne du test 13 .....	37
Figure III-15 : Evolutions temporelles des déformations du test n°13 .....	38
Figure III-16 : Evolutions des contraintes en fonction de déformation du test n°13 .....	38
Figure III-17 : Evolutions temporelles des coefficients d'endommagement du test n°13 .....	39
Figure III-18 : Plan de discontinuité cas test 13.....	39
Figure III-19 : Chemin de sollicitation en contraintes totales du cas n°21 .....	40
Figure III-20 : Evolution temporelle de l'angle de torsion .....	41

---

Figure III-21 : Chemin AB en contraintes effectives, déviateur et pression moyenne du test 21 .....	41
Figure III-22 : Evolutions temporelles des déformations du test n°21 .....	41
Figure III-23 : Evolutions temporelles des coefficients d'endommagement du test n°21 .....	42
Figure III-24 : Plan de discontinuité cas test 21 .....	42
Figure III-25 : Chemin de sollicitation en contraintes totales du cas n°22 .....	42
Figure III-26 : Chemin AB en contraintes effectives et pression moyenne du test 22.....	43
Figure III-27 : Chemin BC en contraintes effectives, pression moyenne , déviateur et pression d'eau du test 22 .....	44
Figure III-28 : Chemin CD en contraintes effectives et pression moyenne du test 22.....	45
Figure III-29 : Chemin DE en contraintes effectives et pression moyenne du test 22.....	46
Figure III-30 : Chemin AB-B-BC-C-CD-D-DE-E en contraintes effectives et pression moyenne du test 22.....	46
Figure III-31 : Evolutions temporelles des déformations du test n°22 .....	46
Figure III-32 : Evolutions temporelles des coefficients d'endommagement du test n°22 .....	47
Figure III-33 : Chemin de sollicitation en contraintes totales du cas n°31 .....	47
Figure III-34 : Chemin AB-BC en contraintes effectives, déviateur et pression moyenne du test 31 .....	48
Figure III-35 : Evolutions temporelles des déformations du test n°31 .....	48
Figure III-36 : Evolution des contraintes en fonction de déformations du test n°31 .....	49
Figure III-37 : Evolutions temporelles des coefficients d'endommagement du test n°31 .....	49
Figure III-38 : Chemin de sollicitation en contraintes totales du cas n°32 .....	50
Figure III-39 : Chemin AB-BC en contraintes effectives, déviateur et pression moyenne du test 32 .....	51
Figure III-40 : Evolutions temporelles des déformations du test n°32 .....	51
Figure III-41 : Evolution des contraintes en fonction de déformations du test n°32 .....	52
Figure III-42 : Evolutions temporelles des coefficients d'endommagement du test n°32 .....	52
Figure IV-1 : Taux de dé-confinement pendant l'excavation(ANDRA,2013) .....	54
Figure IV-2 : Maillage utilisé pour les simulations des zones endommagées fracturées autour des galeries .....	55
Figure IV-3 : Conditions aux limites et maillage utilisé .....	57
Figure IV-4 : Evolution de contrainte totale $\sigma_{xx}$ en paroi de galerie orientée petit h au cours de l'excavation .....	57
Figure IV-5 : Evolution des contraintes totales $\sigma_{xx}$ suivant l'axe X (coupe C1) au cours de l'excavation du test 1.....	58
Figure IV-6 : Evolution des contraintes totales $\sigma_{yy}$ suivant l'axe X (coupe C1) au cours de l'excavation du test 1.....	58

Figure IV-7 : Evolution de contrainte effective $\sigma'_{xx}$ en paroi de galerie orientée petit h au cours de l'excavation.....	58
Figure IV-8 : Evolution des contraintes effectives $\sigma'_{xx}$ suivant l'axe X (coupe C1) au cours de l'excavation du test 1.....	59
Figure IV-9 : Evolution des contraintes effectives $\sigma'_{yy}$ suivant l'axe X (coupe C1) au cours de l'excavation du test 1.....	59
Figure IV-10 : Evolution de pression interstitielle $P_w$ en paroi de galerie orientée petit h au cours de l'excavation.....	59
Figure IV-11 : Evolution des pressions interstitielles $P_w$ suivant l'axe X (coupe C1) au cours de l'excavation du test 1.....	60
Figure IV-12 : Evolution des déplacements horizontaux $u$ suivant l'axe X (coupe C1) au cours de l'excavation du test 1.....	60
Figure IV-13 : Evolution des déformations $\epsilon_{xx}$ suivant l'axe X (coupe C1) au cours de l'excavation du test 1.....	60
Figure IV-14 : Evolution de contrainte totale $\sigma_{yy}$ en paroi de galerie orientée petit h au cours de l'excavation.....	61
Figure IV-15 : Evolution des contraintes totales $\sigma_{yy}$ suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 1.....	61
Figure IV-16 : Evolution des contraintes totales $\sigma_{xx}$ suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 1.....	61
Figure IV-17 : Evolution de contrainte effective $\sigma'_{yy}$ en paroi de galerie orientée petit h au cours de l'excavation.....	62
Figure IV-18 : Evolution des contraintes effectives $\sigma'_{yy}$ suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 1.....	62
Figure IV-19 : Evolution des contraintes effectives $\sigma'_{xx}$ suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 1.....	62
Figure IV-20 : Evolution de pression interstitielle $P_w$ en paroi de galerie orientée petit h au cours de l'excavation.....	63
Figure IV-21 : Evolution des pressions interstitielles $P_w$ suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 1.....	63
Figure IV-22 : Evolution des déplacements verticaux $v$ suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 1.....	63
Figure IV-23 : Evolution des déformations $\epsilon_{yy}$ suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 1.....	64
Figure IV-24 : Evolution des contraintes totales $\sigma_{xx}$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1.....	64
Figure IV-25 : Evolution des contraintes totales $\sigma_{yy}$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1.....	64
Figure IV-26 : Evolution des contraintes totales $\sigma_{xy}$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1.....	65

Figure IV-27 : Evolution des contraintes totales radiales $\sigma_r$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1 .....	65
Figure IV-28 : Evolution des contraintes totales orthoradiales $\sigma_\theta$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1 .....	65
Figure IV-29 : Evolution des contraintes effectives $\sigma'_{xx}$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1.....	66
Figure IV-30 : Evolution des contraintes effectives $\sigma'_{yy}$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1.....	66
Figure IV-31 : Evolution des contraintes effectives radiales $\sigma'_r$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1 .....	66
Figure IV-32 : Evolution des contraintes effectives orthoradiales $\sigma'_\theta$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1 .....	67
Figure IV-33 : Evolution des déplacements horizontaux $u$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1.....	67
Figure IV-34 : Evolution des déplacements verticaux $v$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1.....	67
Figure IV-35 : Evolution des déplacements radiaux $u_r$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1.....	68
Figure IV-36 : Evolution des déformations $\epsilon_{xx}$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1.....	68
Figure IV-37 : Evolution des déformations $\epsilon_{yy}$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1.....	68
Figure IV-38 : Evolution des déformations radiales $\epsilon_r$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1.....	69
Figure IV-39 : Evolution des coefficients d'endommagement $D_{xx}$ suivant la coupe C1-C1 au cours de l'excavation du test 1 (phases 11-15).....	69
Figure IV-40 : Evolution des coefficients d'endommagement $D_{yy}$ suivant la coupe C2-C2 au cours de l'excavation du test 1 (phases 11-15).....	69
Figure IV-41 : Evolution des coefficients d'endommagement $D_{xy}$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1 (phases 11-15).....	70
Figure IV-42 : Surface limite de forme elliptique de la zone endommagée fracturée pour des galeries orientées dans la direction petit $h$ .....	70
Figure IV-43 : Les discontinuités dans la zone endommagée fracturée pour des galeries orientées dans la direction petit $h$ .....	71
Figure IV-44 : Les discontinuités observées dans le laboratoire URL pour une galerie orientée dans la direction $\sigma_h$ (Armand & al 2013) .....	71
Figure IV-45 : Conditions aux limites et maillage utilisé .....	72
Figure IV-46 : Evolution de contrainte totale $\sigma_{zz}$ en paroi de galerie orientée grand $H$ au cours de l'excavation .....	72
Figure IV-47 : Evolution des contraintes totales $\sigma_{zz}$ suivant l'axe $Z$ (coupe C1) au cours de l'excavation du test 2.....	73

Figure IV-48 : Evolution des contraintes totales $\sigma_{yy}$ suivant l'axe Z (coupe C1) au cours de l'excavation du test 2.....	73
Figure IV-49 : Evolution de contrainte effective $\sigma'_{zz}$ en paroi de galerie orientée grand H au cours de l'excavation.....	73
Figure IV-50 : Evolution des contraintes effectives $\sigma'_{zz}$ suivant l'axe Z (coupe C1) au cours de l'excavation du test 2.....	74
Figure IV-51 : Evolution des contraintes effectives $\sigma'_{yy}$ suivant l'axe Y (coupe C1) au cours de l'excavation du test 2.....	74
Figure IV-52 : Evolution de pression interstitielle $P_w$ en paroi de galerie orientée petit h au cours de l'excavation.....	74
Figure IV-53 : Evolution des pressions interstitielles $P_w$ suivant l'axe Z (coupe C1) au cours de l'excavation du test 2.....	75
Figure IV-54 : Evolution des déplacements horizontaux $w$ suivant l'axe Z (coupe C1) au cours de l'excavation du test 2.....	75
Figure IV-55 : Evolution des déformations $\epsilon_{zz}$ suivant l'axe Z (coupe C1) au cours de l'excavation du test 2.....	75
Figure IV-56 : Evolution de contrainte totale $\sigma_{yy}$ en paroi de galerie orientée petit h au cours de l'excavation.....	76
Figure IV-57 : Evolution des contraintes totales $\sigma_{yy}$ suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 2.....	76
Figure IV-58 : Evolution des contraintes totales $\sigma_{zz}$ suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 2.....	76
Figure IV-59 : Evolution de contrainte effective $\sigma'_{yy}$ en paroi de galerie orientée petit h au cours de l'excavation.....	77
Figure IV-60 : Evolution des contraintes effectives $\sigma'_{yy}$ suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 2.....	77
Figure IV-61 : Evolution des contraintes effectives $\sigma'_{zz}$ suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 2.....	77
Figure IV-62 : Evolution de pression interstitielle $P_w$ en paroi de galerie orientée grand H au cours de l'excavation.....	78
Figure IV-63 : Evolution des pressions interstitielles $P_w$ suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 2.....	78
Figure IV-64 : Evolution des déplacements verticaux $v$ suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 2.....	78
Figure IV-65 : Evolution des déformations $\epsilon_{yy}$ suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 2.....	79
Figure IV-66 : Evolution des contraintes totales $\sigma_{zz}$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2.....	79
Figure IV-67 : Evolution des contraintes totales $\sigma_{yy}$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2.....	79

Figure IV-68 : Evolution des contraintes totales $\sigma_{zy}$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2.....	80
Figure IV-69 : Evolution des contraintes totales radiales $\sigma_r$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2.....	80
Figure IV-70 : Evolution des contraintes totales orthoradiales $\sigma_\theta$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2.....	80
Figure IV-71 : Evolution des contraintes effectives $\sigma'_{zz}$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2.....	81
Figure IV-72 : Evolution des contraintes effectives $\sigma'_{yy}$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2.....	81
Figure IV-73 : Evolution des contraintes effectives radiales $\sigma'_r$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2.....	81
Figure IV-74 : Evolution des contraintes effectives orthoradiales $\sigma'_\theta$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2.....	82
Figure IV-75 : Evolution des déplacements horizontaux $w$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2.....	82
Figure IV-76 : Evolution des déplacements verticaux $v$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2.....	82
Figure IV-77 : Evolution des déplacements radiaux $u_r$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2.....	83
Figure IV-78 : Evolution des déformations $\epsilon_{zz}$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2.....	83
Figure IV-79 : Evolution des déformations $\epsilon_{yy}$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2.....	83
Figure IV-80 : Evolution des déformations radiales $\epsilon_r$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2.....	84
Figure IV-81 : Evolution des coefficients d'endommagement $D_{zz}$ suivant la coupe C1-C1 au cours de l'excavation du test 2 (phases 11-15).....	84
Figure IV-82 : Evolution des coefficients d'endommagement $D_{yy}$ suivant la coupe C2-C2 au cours de l'excavation du test 2 (phases 11-15).....	84
Figure IV-83 : Evolution des coefficients d'endommagement $D_{zy}$ suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2 (phases 11-15).....	85
Figure IV-84 : Surface limite de forme elliptique de la zone endommagée fracturée pour des galeries orientées dans la direction grand H.....	85
Figure IV-85 : Les discontinuités dans la zone endommagée fracturée pour des galeries orientées dans la direction H.....	86
Figure IV-86 : Les discontinuités observées dans le laboratoire URL pour une galerie orientée dans la direction $\sigma_H$ (Armand & al 2013).....	86
Figure V-1 : Résultat de l'essai mixte saturation – extension axiale sur chemin à pression moyenne constante de 12MPa et fluage sous déviateur de 6 MPa perpendiculaire à la stratification.....	89

---

Figure V-2 : Comparaison entre le modèle SC2D et les essais de fluage (EGC et CEA). ....	89
Figure V-3 : Comparaison entre le modèle SC2D et les essais du LAEGO sur des chemins de chargement triaxiaux pour Hr :90% et 75% du déviateur de pic .....	90
Figure V-4 : Comparaison des convergences $C_y$ entre le modèle et les résultats in situ de la galerie orientée $\sigma_H$ .....	90
Figure V-5 : Comparaison des convergences $C_z$ entre le modèle et les résultats in situ de la galerie orientée $\sigma_H$ .....	91
Figure V-6 : Les vitesses de déformation dans le plan YZ pour des ouvrages orientés dans la direction $\sigma_H$ .....	91
Figure V-7 : Comparaison des convergences $C_y$ entre le modèle et les résultats in situ de la galerie orientée $\sigma_h$ .....	92
Figure V-8 : Comparaison des convergences $C_x$ entre le modèle et les résultats in situ de la galerie orientée $\sigma_h$ .....	92
Figure V-9 : Etude paramétrique des vitesses de déformation réduites par le boulonnage .....	93
Figure V-10 : Les vitesses de déformation dans le plan XY pour des ouvrages orientés dans la direction $\sigma_h$ .....	93
Figure V-11 : Evolutions spatio-temporelles des déformations pour différents points suivant 3 coupes d'une galerie orientée $\sigma_h$ (test1).....	94
Figure V-12 : Evolutions spatio-temporelles des déplacements pour différents points suivant 3 coupes d'une galerie orientée $\sigma_h$ (test1).....	95
Figure V-13 : Convergences aux points en paroi d'une galerie orientée suivant $\sigma_h$ (test1) ....	96
Figure V-14 : Evolutions spatio-temporelles des déformations pour différents points suivant 3 coupes d'une galerie orientée $\sigma_H$ (test2).....	97
Figure V-15 : Evolutions spatio-temporelles des déplacements pour différents points suivant 3 coupes d'une galerie orientée $\sigma_H$ (test2).....	98
Figure V-16 : Convergences aux points en paroi d'une galerie orientée suivant $\sigma_H$ (test2)....	98
Figure V-17 : Comparaison des convergences modélisées par les différentes équipes par rapport aux mesurés réalisées dans une galerie orientée suivant $\sigma_h$ .....	99
Figure V-18 : Comparaison des convergences modélisées par les différentes équipes par rapport aux mesurés réalisées dans une galerie orientée suivant $\sigma_H$ .....	100
Figure VI-1 : Schématisation de l'état de contrainte totale anisotrope à 517 m de profondeur .....	101
Figure VI-2 : Simulation de la zone endommagée fracturée autour une galerie orientée suivant la contrainte horizontale mineure $\sigma_h$ .....	103
Figure VI-3 : Simulation de la zone endommagée fracturée autour une galerie orientée suivant la contrainte horizontale majeure $\sigma_H$ .....	104
Figure VI-4 : Comparaison entre le modèle SC2D et les essais du LAEGO sur des chemins de chargement triaxiaux pour Hr :90% et 75% du déviateur de pic.....	105
Figure VI-5 : Comparaison entre le modèle SC2D et les essais de fluage (EGC et CEA)...	106
Figure VI-6 : La suppression intertitielle et différents états hydriques autour des ouvrages ..	106

Figure VI-7 : Simulations des convergences des galeries orientées suivant la direction de la contrainte (a) mineure-test1 (b) majeure-test2 .....	107
Figure VI-8 : Zones endommagées fracturées après 100 ans autour des galeries orientées suivant la direction de la contrainte (a) mineure-test1 (b) majeure-test2.....	107
Figure VI-9 : Essais en cinématique rotationnelle .....	108
Figure VI-10 : Essais sur échantillon de type voussoirs compressives.....	108
Figure B- 1 : Déformations axiales et radiales résultant d'un essai de désorption à volume libre.....	115
Figure C- 1 : Comparaison du comportement sur des chemins triaxiaux de compression des échantillons d'argilite remaniée par rapport à une argilite massive.....	116
Figure C- 2 : Calibration de la surface de diagenèse par des essais de compression triaxiale : (a) Hr : 100% (saturé), (b) Hr : 90% et Hr : 83%.....	117
Figure C- 3 : Evolution des modules d'élasticité initiaux.....	117

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau II-1 : Valeurs des paramètres de l'évolution de la pression de consolidation apparente (source Del Olmo & al 1996).....	12
Tableau II-2 : Etat de contrainte à la profondeur 517 m dans l'argilite du Callovo-Oxfordien .....	14
Tableau II-3 : Valeurs des paramètres des surfaces de charge.....	15
Tableau II-4 : Valeur des déformations limites par rapport aux directions des contraintes in situ .....	20
Tableau II-5: Valeurs des paramètres utilisés pour la simulation des déformations visqueuses .....	21
Tableau II-6 : Relation des coefficients d'endommagement de cisaillement utilisés dans le calcul .....	27
Tableau III-1 : Valeurs des paramètres du modèle SCD utilisées pour les simulations des chemins simples .....	30
Tableau III-2 : Valeurs utilisées par la simulation de la viscosité du test 11 .....	31
Tableau III-3 : Valeurs utilisées par la simulation de la viscosité du test 12.....	34
Tableau III-4 : Valeurs utilisées par la simulation de la viscosité du test 13.....	37
Tableau III-5 : Valeurs utilisées par la simulation de la viscosité en B du test 22 .....	44
Tableau III-6 : Valeurs utilisées par la simulation de la viscosité en C du test 22 .....	44
Tableau III-7 : Valeurs utilisées par la simulation de la viscosité en D du test 22 .....	45
Tableau III-8 : Valeurs utilisées par la simulation de la viscosité en E du test 22.....	46
Tableau III-9 : Valeurs utilisées par la simulation de la viscosité du test 31 .....	48
Tableau III-10 : Valeurs utilisées par la simulation de la viscosité en B du test 32 .....	50

Tableau IV-1 : La modélisation des excavations des galeries en déformation plane suivant deux plans.....	55
Tableau IV-2 : Etat de contrainte à la profondeur 517m.....	55
Tableau IV-3 : Valeurs des déformations limites pour l'état de contrainte .....	55
Tableau IV-4 : Paramètres utilisés pour les simulations des excavations des galeries dans l'argilite non perturbée à la profondeur 517 m.....	56
Tableau V-1 : Comparaison des convergences modélisées par les différentes équipes.....	99
Tableau V-2 : Comparaison des convergences modélisées par les différentes équipes.....	100
Tableau VI-1 : Valeurs des déformations limites pour les profondeurs 517m .....	102

## INTRODUCTION GENERALE

Les observations dans le laboratoire souterrain Meuse Haute Marne ont mis en évidence que les effets différés (convergence évolution des contraintes) étaient principalement gouvernés par les zones endommagées fracturées entourant les ouvrages (Zone EDZ). Pour évoluer aussi bien à court terme qu'à long terme, d'une part les convergences et d'autre part les contraintes appliquées sur les soutènements, il est nécessaire de reproduire par simulations numériques ces discontinuités.

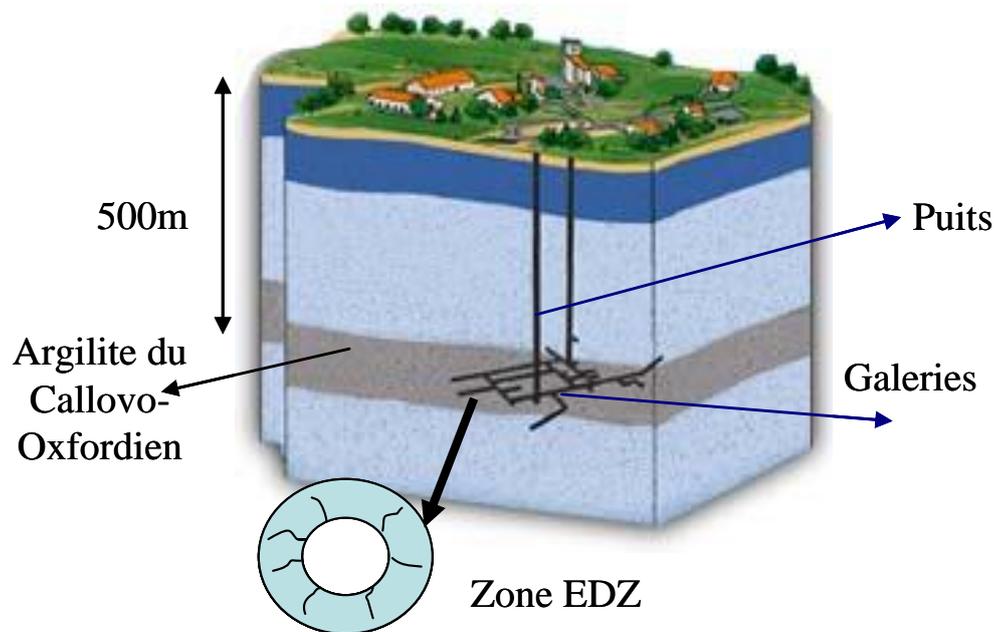


Figure 0-1 : Site de stockage des déchets radioactifs

Mon travail de thèse concerne la simulation numérique des ouvrages de stockage des déchets radioactifs en formation géologique profonde installés dans l'argilite du Callovo-Oxfordien. Ces simulations numériques concernent le comportement des alvéoles de déchets C et CU (combustibles usés), les scellements de puits et des galeries et les galeries remblayées sur des intervalles de temps d'environ 3000 ans.

Ce travail a permis d'une part d'intégrer dans le code de calcul *CLEO* les développements des modèles rhéologiques les plus récents développés au sein *EGC* et d'autre part d'évaluer à long terme l'impact des sollicitations THM en prenant en compte les phases d'excavation, de soutènement, d'exploitation et la période post fermeture sur le comportement à long terme des ouvrages. Mon mémoire comporte six chapitres :

- Le premier chapitre étudie les comportements hydromécaniques de l'argilite à court et long terme
- Le deuxième présente le modèle hydromécanique SC2D (Swelling-Creep-Diagenesis-Damage) pour l'argilite qui permet de décrire le comportement du matériau des stockages à court terme et à long terme.
- Le troisième chapitre présente des résultats de simulation des chemins de sollicitation simple
- Le chapitre suivant concerne l'application du modèle SC2D à la création des zones endommagées fracturées autour des ouvrages excavées. Cette application permet de

décrire l'évolution des discontinuités au cours de l'excavation. L'amplitude de ces EDZ est comparée aux observations in situ.

- Le cinquième chapitre ajoute l'influence de la phase fluage aux ouvrages après l'excavation. Nous observons des effets différés autour des ouvrages après la phase de l'excavation
- Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion générale, dans laquelle nous rappelons le cadre de la modélisation, puis nous évaluons les apports du modèle, ainsi que ses limites.

## **CHAPITRE I. SPECIFICITES DE L'ARGILITE DU CALLOVO-OXFORDIEN ET LES IMPLICATIONS SUR LA MODELISATION**

*L'argilite du Callovo Oxfordien est une roche sédimentaire formée dans l'eau de mer qui est composée majoritairement de 23% à 25% de quartz, de 20% à 27% de carbonates (calcite principalement) de 40% à 50% de minéraux argileux et de 5% à 10% de minéraux divers (pyrite, mica, dolomite, halite, gypse). Cette hétérogénéité de constitution associée à une très faible porosité de l'ordre de 12% constituée majoritairement par des mésopores (2 à 50nm) confère à l'argilite un comportement spécifique (c'est ni une roche ni un sol). Il en résulte un matériau multiphasique minéral.*

*Basé sur son comportement et des observations expérimentales, un modèle conceptuel spécifique est proposé permettant de construire des modèles rhéologiques du comportement à court terme et à long terme « intégrés » dans le code CLEO pour évoluer les zones endommagées et les contraintes appliqués sur les soutènements des galeries.*

## I.1 INTRODUCTION

La roche hôte d'un éventuel stockage géologique profond, étudiée par l'ANDRA depuis 1995 est une formation d'argilite du Callovo-Oxfordien, datant de 150 millions d'années. Elle est située à la frontière des départements de Meuse et de Haute-Marne à -500m de profondeur environ. Cette couche a pour origine la sédimentation de matériaux détritiques (minéraux argileux jusqu'à 60 % en masse, quartz fins) et de carbonates dans une mer relativement calme qui débute à la base du Jurassique moyen (Dogger) et se termine par les formations du Jurassique supérieur (Malm), soit une tranche de temps d'environ 40 millions d'années. Le Callovo-Oxfordien est une couche dont le toit se trouve à une profondeur variant de 420 mètres (correspondant au site du laboratoire) à plus de 600 mètres suivant la direction du pendage, et dont l'épaisseur varie aussi progressivement de 130 mètres au sud à 160 mètres au nord de la zone (Figure I-1).

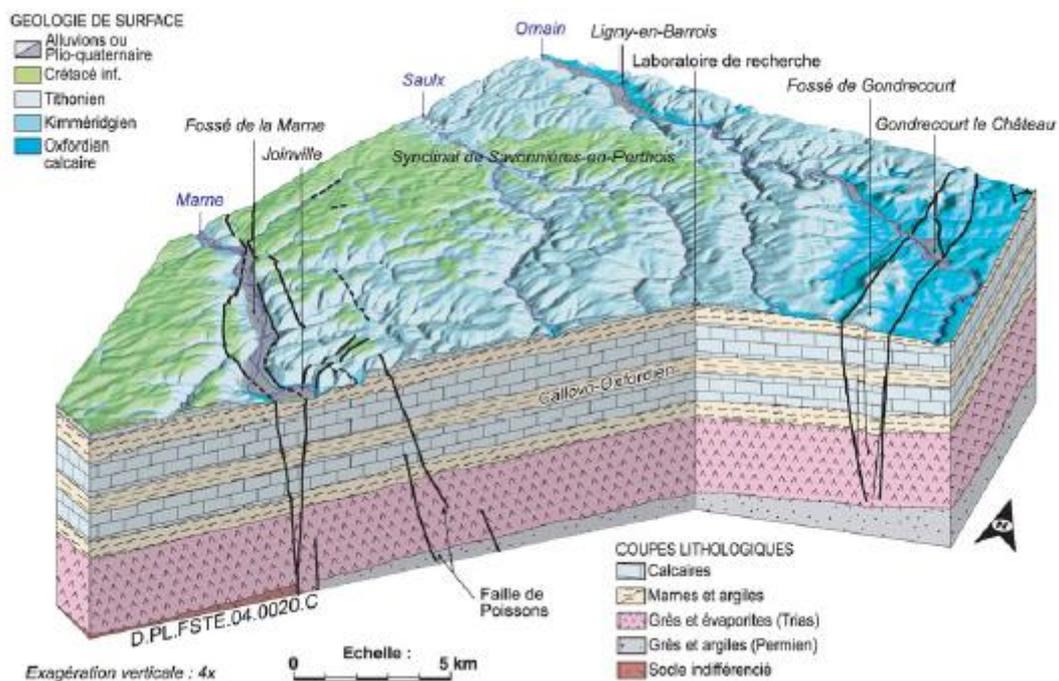


Figure I-1 : Bloc diagramme géologique 3D du secteur de Meuse/Haute Marne (Andra 2005)

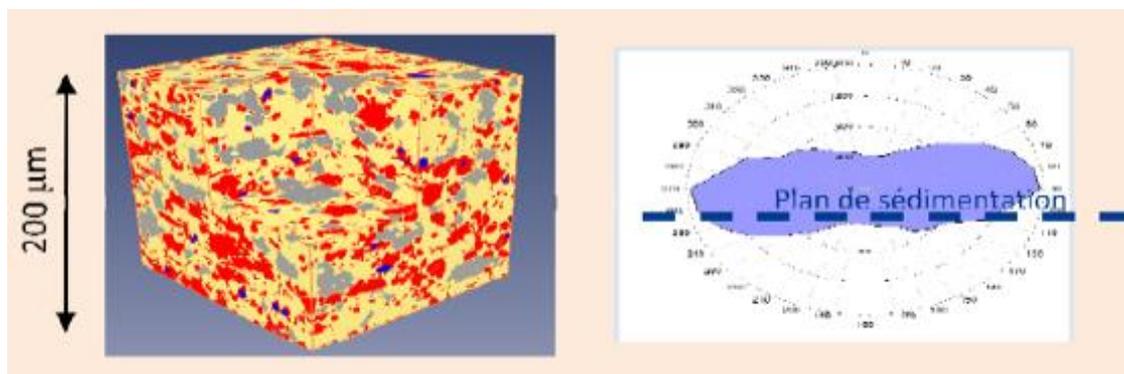


Figure I-2 : Carte minéral de l'argilite (J.Ch ROBINET, 2006)

On peut constater que l'argilite est un **multiphasique minéral**, les proportions des phases minéralogiques principales varient et s'organisent en plusieurs séquences sédimentaires dans les proportions suivantes:

- 40 à 50% de minéraux argileux d'origine détritique (érosion d'un continent). La phase argileuse est essentiellement composée de phyllosilicates non gonflants (mica+illite, chlorite, kaolinite) et de phyllosilicates gonflants (illite/smectite) ;
- 20 à 27% de carbonate principalement la calcite de forme arrondie (origine diéritique) ou rhomboédrique (origine diagénétique, calcite néo formée) et de dimensions variant de 10 à 40 microns. On notera que la séquence supérieure se caractérise par une teneur en carbonates plus élevée (27 à 37%) que la séquence médiane (22 à 30%). Ces carbonates sont en équilibre chimique avec le gaz carbonique dissous dans l'eau et régulent ainsi le pH du milieu ;
- 23 à 25% de tectosilicates principalement de quartz de forme plus ou moins arrondie et de diamètre se situant entre 20 à 40 microns ;
- 5 à 10% de minéraux divers (pyrite, mica, dolomite, gypse) ;
- 0,5 à 1% de matière organique.

Ces proportions varient en fonction de la profondeur dans la formation du Callovo Oxfordien (référentiel géologique Andra 2005). Cette hétérogénéité de constitution associée à une très **faible porosité** de l'ordre de 12% constituée majoritairement par des mésopores (2 à 50nm) confère à l'argilite un comportement spécifique (ce n'est ni une roche, ni un sol).

Par ailleurs la couche du Callovo-Oxfordien est encadrée par deux grandes formations calcaires, le Dogger sous-jacent et l'Oxfordien carbonaté sus-jacent, au sein desquels se trouvent des horizons sédimentaires poreux où s'écoule de l'eau (cf Figure I-3). Toutefois, la perméabilité de ces horizons est faible et ils ne sont pas aquifères au sens de l'hydrogéologie (ils ne représentent pas une ressource en eau).

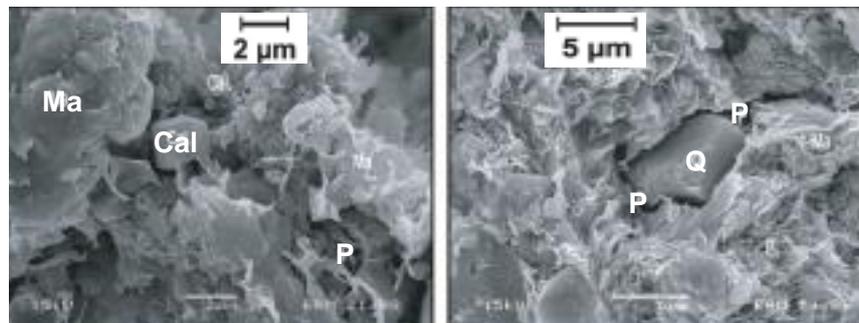


Figure I-3 : Argilite observée au MEB (dans la matrice argileuse, on distingue au microscope, P : macroporosité, Q: grain de quartz, Cal: grain de calcite, Ma: minéraux argileux), (Andra 2005).

## I.2 LE MODELE CONCEPTUEL DE L'ARGILITE

### I.2.1 Diagenèse

L'argilite du Callovo-Oxfordien est issue d'une diagenèse qui implique une consolidation de la phase argileuse et une précipitation de la calcite dans les macro-pores. La précipitation de calcite dans l'argilite de Callovo-oxfordien cause une grande surconsolidation qui affecte la pression de consolidation et la porosité de l'argilite.

Del Olmo & al (1996), ont mis en évidence un renforcement mécanique par le squelette de calcite caractérisé par :

- \* Une diminution du module de compressibilité  $k$  avec l'augmentation du pourcentage de carbonate (versus une augmentation de la rigidité)
- \* Une augmentation de la pression de consolidation avec l'augmentation du pourcentage de carbonate
- \* Le matériau change du matériau ductile (avec porosité de 30%) vers un matériau semi-fragile (avec porosité 15-18%) à cause de la précipitation de la phase calcite dans les macro et méso pores

**Conséquence :** Existence d'un large domaine élastique. On propose de définir une surface de diagenèse  $FD$  à plasticité associative.

## I.2.2 Endommagement

Des effets de cisaillement, de traction et de décollement entre les minéraux argileux et les minéraux non argileux (carbonates, quartz...) causent l'endommagement dans le matériau ; ces effets peuvent être issus de sollicitations mécaniques pures (effort déviatorique, effort en traction...) de sollicitation mécaniques liées à la désaturation/resaturation ou de sollicitations physico-chimiques.

Sur un chemin triaxial en compression, bien que des déformations apparaissent au sein de la phase argileuse par rotation des particules sous le champ de contrainte imposé, les processus de décollement, de cisaillement et de traction s'initient principalement aux interfaces entre les minéraux non argileux, assimilables à des points de rigidité, et les minéraux non argileux, qui s'interconnectent ; et enfin s'organisent en une bande de cisaillement. Sur un chemin en extension, les minéraux non argileux jouent toujours le rôle de catalyseur local de la rupture, mais la rupture est très rapide, franche et localisé.

Suivant le chemin de sollicitation et les conditions aux limites en déformation, la localisation spatiale des processus de traction, de cisaillement et de décollement se manifestent dans le volume d'argilites, entre deux schémas extrêmes, soit de manière homogène et localisée, soit uniquement de manière localisée selon des structures planaires pouvant être de grandes dimensions, comme cela est observé autour des galeries :

- \* L'endommagement à la fois diffus et localisé, est celui généré sur un chemin triaxial en compression, comme décrit ci-dessus : les fissures localisées s'interconnectent progressivement en un réseau 3D homogène, jusqu'à la rupture et la formation d'une grande bande de cisaillement ;
- \* L'endommagement strictement localisé s'observe sur des chemins en cisaillement pur, traction pure ou triaxial en extension

Dans tous les cas, de part la direction privilégiée des contraintes appliquées et/ou l'anisotrope structurale des minéraux non argileux, in fine à l'échelle « macroscopique » (échantillons et ouvrages), la fissuration n'est pas isotrope (cf. Figure I-4 et Figure I-5), d'où un endommagement anisotrope.

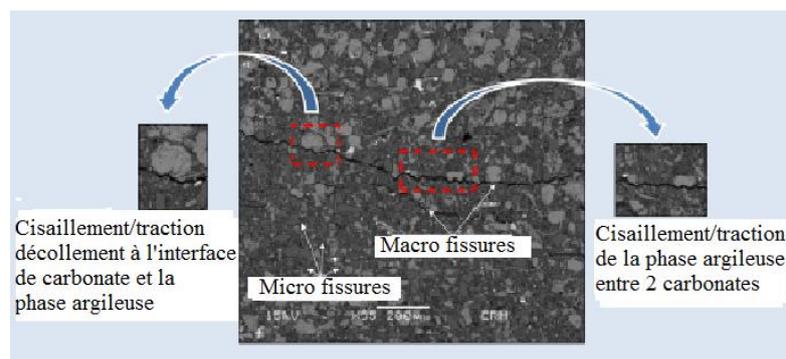


Figure I-4 : Photographie MEB des deux types de « fissure » d'endommagement des argilites(ANDRA,2011)

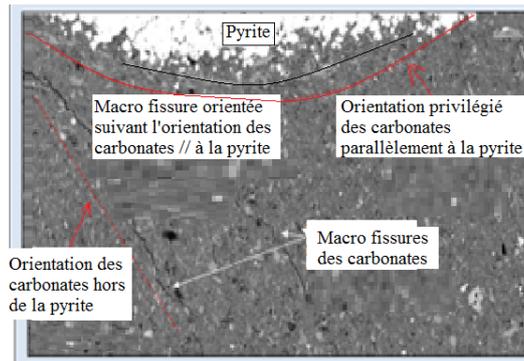


Figure I-5 : Photographie MEB de «macro fissure» d'endommagements orientées suivant lrd carbonates(ANDRA,2011)

Observant les résultats des essais in situ (Figure I-6), on trouve un endommagement anisotrope qui se produit autour des galeries et des ouvrages excavés, et qui est clairement mis en évidence par les observations faites en laboratoire souterrain ; on peut voir que les zones endommagées fracturées autour des ouvrages sont anisotropes, elles ont une forme elliptique.

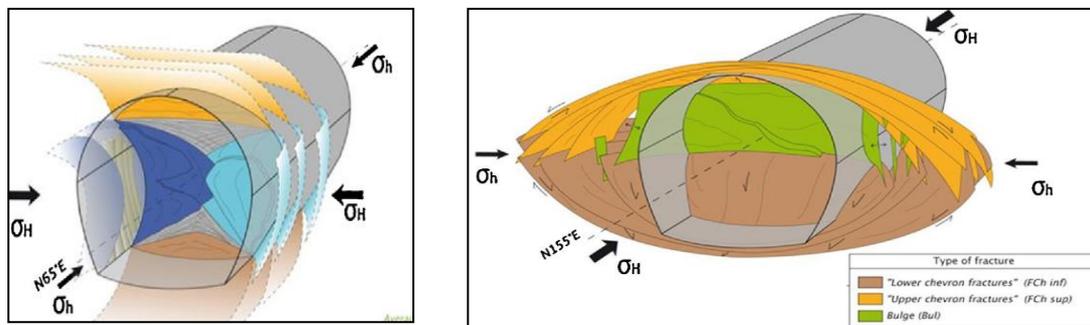
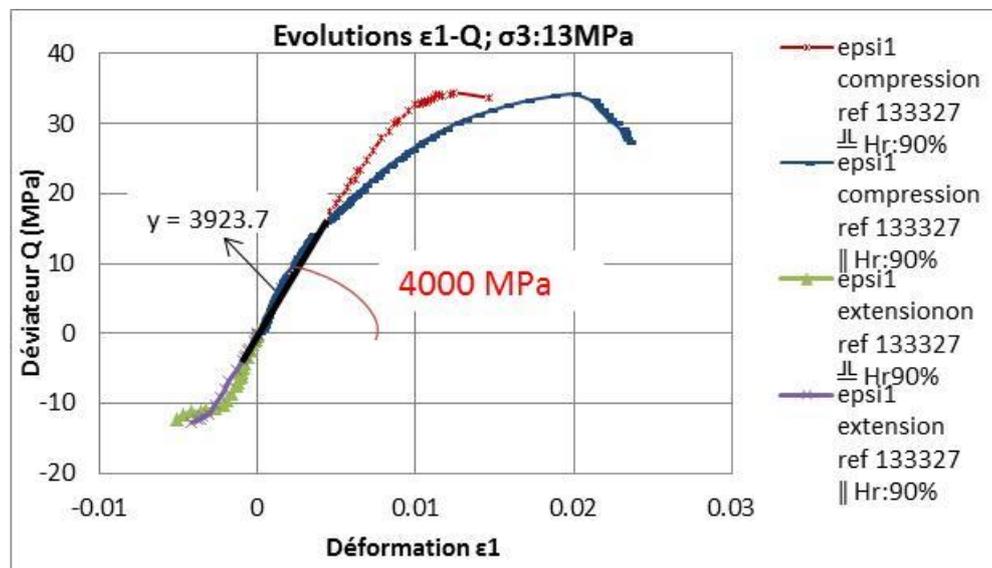


Figure I-6 : Les discontinuités observées dans le laboratoire URL pour des galeries orientées dans la direction  $\sigma_H$  et  $\sigma_h$ (Armand & al 2013)

Les essais triaxiaux en compression et en extension réalisés perpendiculaires et parallèles à la contrainte verticale in situ sont présentés sur Figure I-7. Ces essais mettent en exergue un comportement très dissymétrique entre la compression et l'extension au niveau du déviateur au pic. Alors que le déviateur à la rupture pour les essais en extension est de 12MPa.



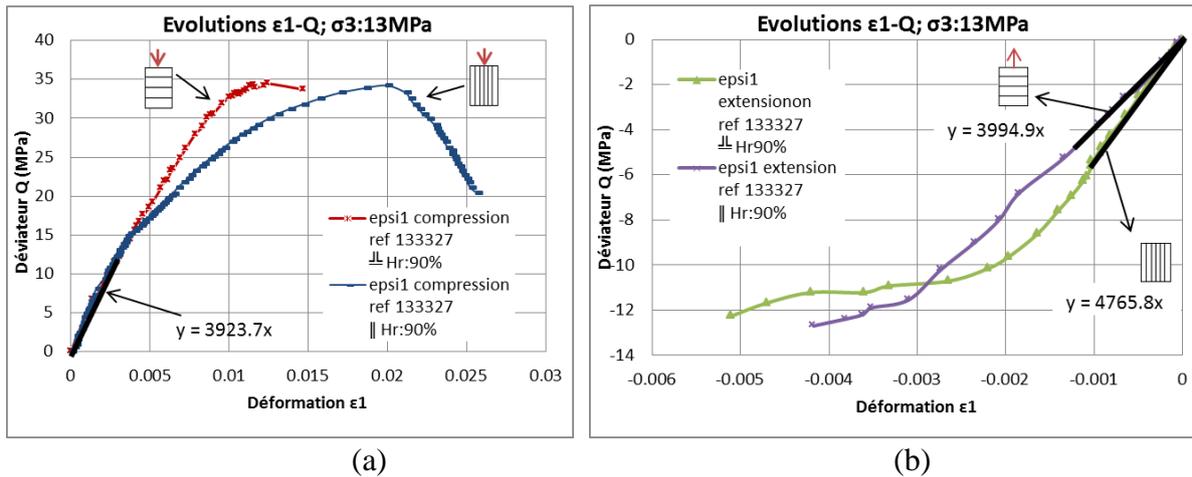


Figure I-7 : Essais triaxiaux (a) en compression et (b) en extension (EGC 2011)

Sur les essais triaxiaux en compression la hauteur du pic en compression n'est pas affecté par l'orientation (perp ou parallèle). En revanche, en extension on observe une différence notable entre perp et parallèle. Un endommagement induit par les sollicitations subies sur un chemin de décharge est à prendre en compte.

**Conséquence:** Introduction d'un endommagement anisotrope induit par les sollicitations subies sur un chemin de décharge

Donc, on peut dire que l'argilite de Callovo-oxfordien a :

- \* un comportement ductile élasto-plastique en compression
- \* un comportement semi-fragile avec endommagement anisotrope en extension

### 1.2.3 Interaction fluide-solide

Pour les sols, Terzaghi (1936) propose que les contraintes extérieures sont équilibrées par les contraintes de contact entre les molécules d'eau et la pression du fluide interstitiel. Appliquant cette hypothèse pour des milieux dans lesquels le fluide interstitiel est en interaction partielle avec la phase solide comme les argilites, Biot propose de modifier la distribution des contraintes entre les phases fluide et solide en introduisant le coefficient de Biot  $b$ .

Ainsi, la distribution des contraintes dans l'argilite Callovo-oxfordien est supposée obéir au principe des contraintes effectives :  $\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + b.p_w.\delta_{ij}$ . Le modèle considère le concept étendu des contraintes effectives, un tenseur de type Biot fonction du niveau d'endommagement.

### 1.2.4 Comportement à long terme des argilites

L'ouverture de la porosité du fait de l'endommagement rend significatifs les mécanismes de viscosité et consolidation (couplage hydromécanique) au sein de la phase argileuse et aux interfaces entre les minéraux argileux et les minéraux non argileux. A cela s'ajoute le gonflement du fait de la présence des minéraux smectites. Ce dernier mécanisme est aujourd'hui identifié comme ayant une contribution importante à la propriété d'auto-colmatage des argilites endommagées et ses conséquences en termes de récupération d'une perméabilité à l'eau proche de celle des argilites en place.

Les poids relatifs des mécanismes du comportement différé et leurs cinétiques respectives, notamment dans le temps, dépendent de la nature et de l'importance de l'endommagement donc de la sollicitation (par exemple le chemin mécanique), et des conditions aux limites (déformation, contrainte etc.).

A partir des données consignées dans le référentiel géologique, les rapports d'Andra et des nombreuses discussions avec le service géologique il en ressort des essais dits de fluage :

- \* L'amplitude des déformations différées est fonction du déviateur de contrainte et de la pression moyenne.
- \* Pour un même déviateur, les déformations différées diminuent avec l'augmentation de la pression moyenne.
- \* Les déformations différées varient avec le logarithme du temps

EGC a réalisé des essais de fluage sur des échantillons carottés sous différents déviateurs de contrainte de pic 90%, 75% et 50% :

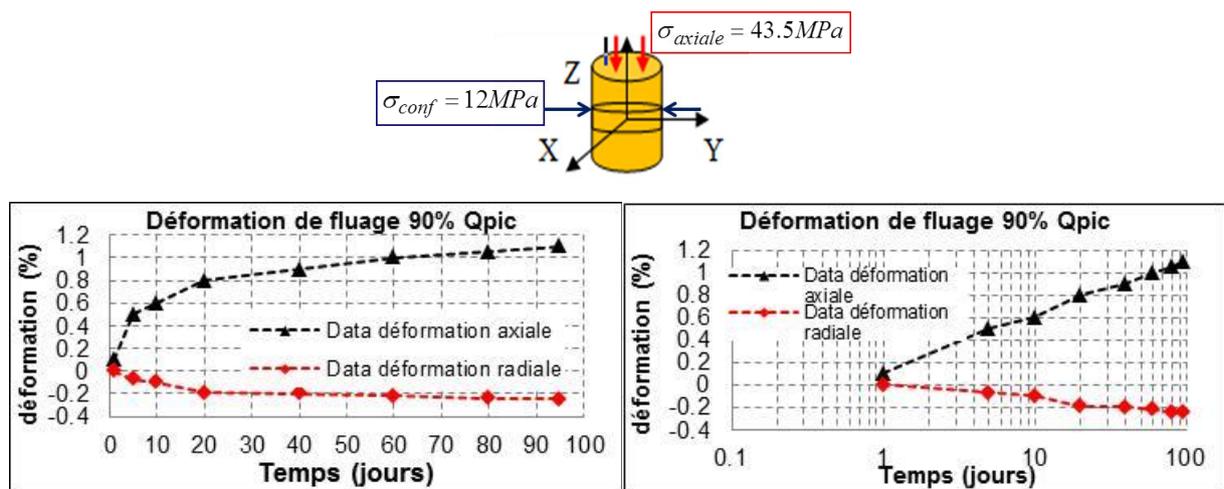


Figure I-8 : Evolution des déformations visqueuses sous confinement de 12MPa et déviateur de 43.5MPa (EGC 2013)

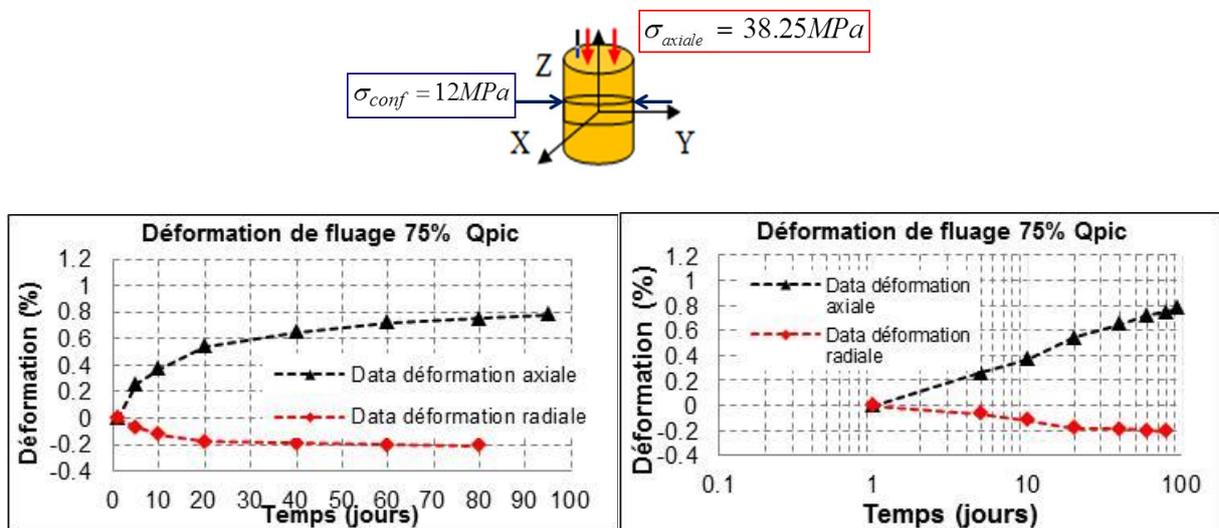


Figure I-9 : Evolution des déformations visqueuses sous confinement de 12MPa et déviateur de 38.25MPa (EGC 2013)

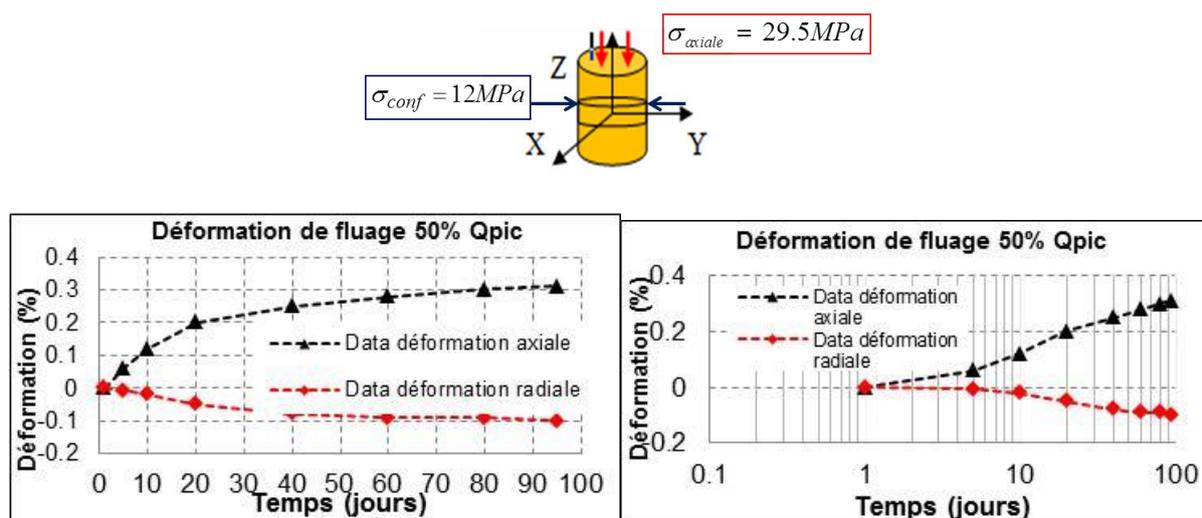


Figure I-10 : Evolution des déformations visqueuses sous confinement de 12MPa et déviateur de 29.5MPa (EGC 2013)

**Conséquence:** Les déformations liées à la viscosité sont en fonction :

- \* Du déviateur des contraintes  $s_{ij}$
- \* De la pression moyenne
- \* De l'endommagement
- \* Du logarithme du temps

### I.3 CONCLUSION

L'analyse et la synthèse des résultats expérimentaux sur l'argilite du Callovo Oxfordien a permis de proposer deux modèles conceptuels de l'argilite du Callovo Oxfordien.

Le modèle conceptuel du comportement à court terme a été construit en retenant

- \* un large domaine élasto-plastique lié à une très forte surconsolidation apparente et une faible porosité traduite dans le modèle par une pression de consolidation de l'ordre de 300MPa. On propose de définir une surface de charge appelée diagenèse FD à plasticité associative et une surface de prélèvement pour traduire le comportement de l'argilite.
- \* une interaction partielle entre les phases solides et fluides prise en compte dans le modèle conceptuel en faisant appel à la théorie de Biot avec coefficient de Biot dépendant de l'endommagement
- \* la création d'un endommagement anisotrope

L'absence de données expérimentales contrôlées (état hydrique, fluide de resaturation, niveau d'endommagement etc.) pour décrire le comportement à long terme des argilites nous a contraint de proposer un modèle conceptuel simplifié. Compte tenu du large domaine élastique de l'argilite, ce modèle phénoménologique propose que la déformation totale soit la contribution d'une partie élastique et d'une partie visqueuse.

## **CHAPITRE II. FORMULATION D'UN MODELE HYDROMECHANIQUE POUR L'ARGILITE DU CALLOVO-OXFORDIEN**

*Le travail présenté dans ce chapitre est consacré à une synthèse de modèle hydromécanique modèle SC2D (swelling creep diagenesis damage) pour l'argilite. L'objectif est de simuler le comportement des matériaux des ouvrages de stockage à court terme et à long terme.*

*Les paramètres HM pour l'argilite ne sont pas accessibles par les techniques usuelles des essais de laboratoire sur échantillons carottés. En effet la décharge hydro-mécanique de prélèvement induit un endommagement. Les caractéristiques mécaniques résultent d'une sorte "d'analyse inverse" des observations in situ du laboratoire souterrain de Meuse Haute Marne. Ces modèles sont développés dans le cadre des milieux poreux, associés au concept des contraintes effectives.*

*Les caractéristiques hydromécaniques retenues dans le modèle conceptuel SC2D du comportement de l'argilite non perturbée sont traduites par:*

- (1) Une surface de charge de l'argilite en place dite de diagenèse, décrite par le modèle de Drescher & Mroz, associée à une pression de consolidation de 300MPa et une cohésion de 10MPa*
- (2) La création d'un endommagement anisotrope induit par les déformations en extension dans les directions principales des contraintes*
- (3) Les coefficients d'endommagement anisotrope sont déduits du Modèle de Mazars étendus aux déformations.*

## II.1 FORMULATION DU MODELE ELASTO-PLASTIQUE AVEC ENDOMMAGEMENT ANISOTROPE

### II.1.1 Rappel du modèle conceptuel

Le modèle conceptuel relatif à la diagénèse de l'argilite de Callovo-oxfordien proposé par EGC s'organise en 2 étapes (cf. Figure II-1):

- \* Consolidation de la phase argileuse sous le poids des terrains.
- \* Processus diagénétiques par précipitation des carbonates dans les méso-pores avec une, orientée préférentiellement dans le plan de la sédimentation (Robinet 2008) aboutissant à une absence de macroporosité. La porosité est du type microporosité et méso-porosité (c.à.d. des tailles de pores comprises entre quelques nanomètres et quelques dizaines de nanomètres).

Del Olmo & al (1996), sur des argilites Espagnoles contenant des carbonates d'environ 13%, ont mis en évidence un renforcement mécanique par le squelette de calcite caractérisé par :

- \* Une diminution du module de compressibilité  $k$  avec l'augmentation du pourcentage de carbonate  $k = k_0 \cdot \exp(-\xi \cdot C)$  (versus une augmentation de la rigidité  $E = \frac{1}{k \cdot \exp(-\xi \cdot C)}$ ) avec  $k$ ,  $\xi$  deux paramètres et  $C$  le pourcentage de carbonate.
- \* Une augmentation de la pression de consolidation avec l'augmentation du pourcentage de carbonate :  $p'_c = p'_{c0} \exp\left\{\frac{(e_0 - e_{10} \cdot \exp(-\chi C))}{\Lambda_0 \cdot \exp(-\xi \cdot C)}\right\}$

Avec les valeurs consignées dans le Tableau II-1, la pression de consolidation de l'argilite passe de 10 MPa à plus de 300 MPa (valeur de la pression de consolidation apparente vierge) avec 20 % de calcite.

$e_0$	$e_{10}$	C % carbonate	$p'_{c0}$	$\chi$	$\xi$	$\Lambda_0$
0.3	0.3	0.2	10 MPa	3.3	8.44	0.205

Tableau II-1 : Valeurs des paramètres de l'évolution de la pression de consolidation apparente (source Del Olmo & al 1996)

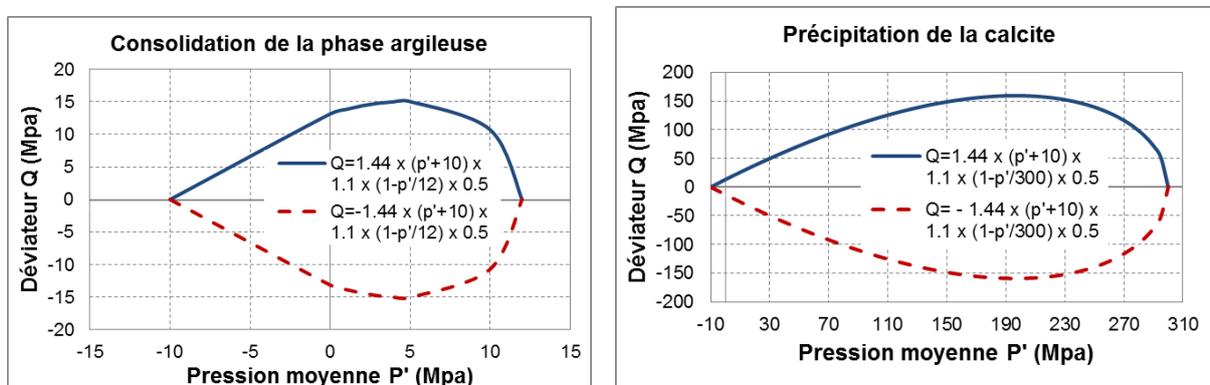


Figure II-1 : Schématisation de la surface limite de diagénèse de l'argilite Meuse Haute Marne en deux étapes

## II.1.2 Formulation du modèle

A partir des observations expérimentales, un modèle élasto-plastique couplé à un endommagement anisotrope est proposé pour décrire le comportement des argilites. Dans les conditions isothermes et en prenant les petites déformations, les variables d'état sont le tenseur des déformations totales  $\underline{\underline{\varepsilon}}$  et le tenseur d'endommagement  $\underline{\underline{D}}$

Ainsi classiquement le tenseur des déformations totales est décomposé en une partie élastique, une partie plastique et une partie de viscosité :

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{\varepsilon}}^e + \underline{\underline{\varepsilon}}^p + \underline{\underline{\varepsilon}}^{vis} \quad (\text{II-1})$$

En reprenant les travaux sur les matériaux composites renforcés par fibres de verre distribuées de manière aléatoire (Mir 2003, Mir & al 2005), le comportement hypo élastique à l'intérieur de la surface de diagenèse avec endommagement anisotrope est décrit avec le tenseur de rigidité endommagé  $\underline{\underline{\tilde{C}}}(D)$  tel que :

$$d\sigma'_{ij} = \underline{\underline{\tilde{C}}}(D) : d\varepsilon_{kl}^e \quad (\text{II-2})$$

$\underline{\underline{\tilde{C}}}(D)$  est le tenseur de rigidité qui fait appel au tenseur de rigidité non endommagé  $\underline{\underline{C}}^0$  et à

l'opérateur tensoriel  $\underline{\underline{M}}(D)$  (Chen & al 1995):

$$\underline{\underline{M}}(D) = \delta_{ik} \cdot \delta_{jl} \cdot \sqrt{(1-D_i) \cdot (1-D_j)} n_i \otimes n_j \otimes n_k \otimes n_l \quad (\text{II-3})$$

Où  $n_i$  sont les directions principales de l'endommagement et  $D_i$  les valeurs principales de l'endommagement dans la direction  $i$ .

$$\underline{\underline{\tilde{C}}}(D) = \underline{\underline{M}}(D) : \underline{\underline{C}}^0 : \underline{\underline{M}}(D) \quad (\text{II-4})$$

Les déformations plastiques sont caractérisées à travers la surface de charge de prélèvement par la relation d'écoulement plastique et un potentiel d'écoulement plastique.

Les déformations visqueuses sont calculés par une formule expérience proposée par EGC :

$$\varepsilon_{ij}^{vis} = A \cdot \frac{D_{ij}}{1 + \frac{D_{ij}}{0.5}} \cdot \frac{s_{ij} - s_0}{p_{moy}} \cdot \ln(1+t) = V_{ij} dt \quad (\text{II-5})$$

## II.2 MODELE SC2D POUR L'ARGILITE DE CALLOVO-OXFORDIEN

Rappelons que l'état de contrainte à 517 m de profondeur est anisotrope (cf. Tableau II-2 et Figure II-2). On constate que, pour les ouvrages construits dans la direction  $\sigma_H$  (l'état de contrainte dans le plan Y( $\sigma_v$ )-Z( $\sigma_h$ )) est isotrope.

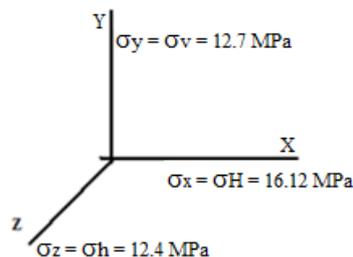


Figure II-2 : Schématisation de l'état de contrainte totale anisotrope à 517 m de profondeur

### II.2.1 La distribution des contraintes dans le modèle SC2D

Le comportement mécanique de l'argilite est classiquement exprimé par l'adaptation de la formulation de Biot pour les états hydriques non saturés (Coussy 2004, Gawin & al 1999, Lewis & Schrefler 1998, Robinet & al 1998, Nguyen 2008). Ici, seulement les petites transformations sont considérées. Il est par ailleurs supposé que l'interaction entre la phase gazeuse et la phase solide est négligeable vis-à-vis de la phase liquide ( $|p_w| \gg p_g$ ). Cette hypothèse est équivalente à celle qui consiste à considérer que la pression capillaire résulte essentiellement de la pression de l'eau,  $P_c \approx P_w$ .

Par ailleurs dans les cas très dé-saturés la phase eau n'est plus continue, une pression d'eau fictive est proposée notée  $p_w^{equ}$  :

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + b(D).p_w^{equ} .\delta_{ij} \quad (II-6)$$

Parmi les nombreuses relations des pressions d'eau équivalentes, nous avons opté pour la relation de Sun & al (2000) pour caractériser l'évolution des pressions d'eau équivalentes en fonction de la pression capillaire :

$$p_w^{eq} = -\frac{p_{cap}}{1 + p_{cap}/35} \quad (II-7)$$

Avec :  $b = a \max_{i \in \{I, II, III\}} D_i + b_0$  (Picandet et al.)  $a=0.4$  et  $b_0=0.6$

Distribution des contraintes à 517 m dans l'argilite	Relations utilisées dans le code CLEO
Distribution des contraintes $\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + b(D).p_w^{equ} .\delta_{ij}$	$p_w^{equ} = -b.p_w$ pour $p_w > 0$ $p_w^{equ} = \frac{-p_{cap}}{1 + \frac{p_{cap}}{55}}$ pour $p_w < 0$
Coefficient de Biot	$b = 0.4 \max D_i + 0,6$
Pression d'eau et coefficient de Biot à 517m	$p_{w/517m} = 4.85MPa$ $b_{517m} = 0.6$
Contraintes totales à 517m	$\sigma_{h/X} = 16.1MPa$ $\sigma_{H/Y} = 12.7MPa$ $\sigma_{v/Z} = 12.4MPa$
Pression moyenne effective plan Z - Y $\sigma'_v = 12.7 - 0.6 \times 4.7 = 9.88MPa$ $\sigma'_h = 12.4 - 0.6 \times 4.7 = 9.58MPa$	$P'_{moy\sigma_h - \sigma_v} = \frac{9.58 + 9.88}{2} = 9.73$
Pression moyenne effective plan X - Y $\sigma'_v = 12.7 - 0.6 \times 4.7 = 9.88MPa$ $\sigma'_H = 16.1 - 0.6 \times 4.7 = 13.3MPa$	$P'_{moy\sigma_H - \sigma_v} = \frac{13.3 + 9.88}{2} = 11.59$

Tableau II-2 : Etat de contrainte à la profondeur 517 m dans l'argilite du Callovo-Oxfordien

On a proposé de définir une surface de charge appelée diagenèse FD du type Mroz & Drescher (2003) à plasticité associative et une surface de prélèvement FP à plasticité non associative pour traduire le comportement élasto-plastique de l'argilite de Callovo-Oxfordien.

- \* Mécanise élasto-plastique de Diagenèse : argilite saine

$$\tilde{F}_D = \tilde{G}_D = (p', q, \theta) = q^2 - 0.5L^2(p' + \tilde{p}'_{cohe})^2 a(1 - \frac{p'}{\tilde{p}'_{cf}}) = 0 \tag{II-8}$$

- \* Mécanise élasto-plastique de Prélèvement : argilite perturbée

$$\begin{aligned} \tilde{F}_p(p', q, \theta) &= q^2 - L^2 \times (p' + \tilde{p}'_{cohe})^2 a \times (1 - \frac{p'}{\tilde{p}'_{cf}}) = 0 \\ \tilde{G}_p(p', q, \theta) &= q^2 - (p')^2 \times \left( \left( \frac{p'_g}{p'} \right)^{1/2r} - 1 \right)^{2r} = 0 \end{aligned} \tag{II-9}$$

Avec :

$$\chi_{ij} = \sigma'_{ij} - \frac{Tr(\sigma'_{ij})}{3} \delta_{ij} \quad I_1 = Tr(\sigma'_{ij}) \quad p' = \frac{I_1}{3} = \frac{Tr(\sigma'_{ij})}{3}$$

$$J_2 = \frac{1}{2} \chi_{ij} \cdot \chi_{ij} \quad q = \sqrt{3 \cdot J_2}$$

p'g est déterminé à partir des chemins triaxiaux p'g=3.pcf+42

Surfaces	a	L	$\tilde{p}'_{cohe}$ (MPa)	$\tilde{p}'_{cf}$ (MPa)
Diagenèse (FD)	1.2	1.2	-10	300
Prélèvement (FP)	1.2	1.2	-10	30

Tableau II-3 : Valeurs des paramètres des surfaces de charge

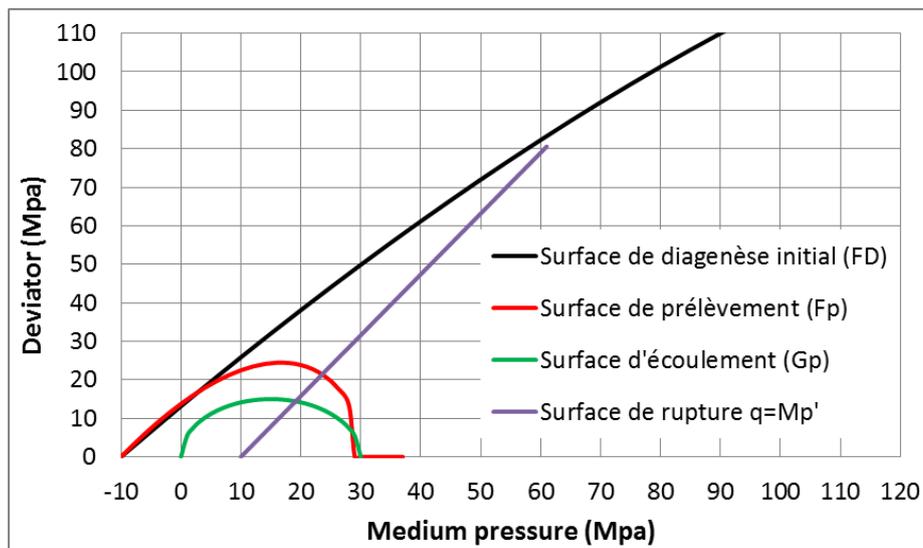


Figure II-3 : Surfaces de charge pour l'argilite

## II.2.2 Comportement élasto-plastique d'endommagement de l'argilite

Le comportement élasto-plastique à l'intérieur de la surface de diagenèse avec endommagement anisotrope est décrit avec le tenseur de rigidité endommagé  $\underline{\underline{\tilde{C}}}(D)$  tel que

$$d\sigma'_{ij} = \underline{\underline{\tilde{C}}}_{ijkl}(D) : d\varepsilon^e_{kl} \quad (\text{II-10})$$

Soit :

$$d\varepsilon^e_{ij} = (S_{ijkl}(D) + S_{ijkl}(p')).d\sigma^c_{kl} \quad \text{avec} \quad \underline{\underline{S}} = \underline{\underline{C}}^{-1} \quad (\text{II-11})$$

La matrice d'endommagement est déterminé selon la formule de Cordebois et Sidoroff (1982)

- La cas général

$$\underline{\underline{S}}(D) = \frac{1}{E_0} \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-D_1)^2} & \frac{1+\nu}{D_{12}^2} + \frac{-\nu}{(1-D_1)(1-D_2)} & \frac{1+\nu}{D_{13}^2} + \frac{-\nu}{(1-D_1)(1-D_3)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1+\nu}{D_{12}^2} + \frac{-\nu}{(1-D_2)(1-D_1)} & \frac{1}{(1-D_2)^2} & \frac{1+\nu}{D_{23}^2} + \frac{-\nu}{(1-D_2)(1-D_3)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1+\nu}{D_{13}^2} + \frac{-\nu}{(1-D_3)(1-D_1)} & \frac{1+\nu}{D_{23}^2} + \frac{-\nu}{(1-D_3)(1-D_2)} & \frac{1}{(1-D_3)^2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2(1+\nu)}{D_{23}(1-D_1)} & \frac{2(1+\nu)}{D_{23}(1-D_2)} & \frac{2(1+\nu)}{D_{23}(1-D_3)} & \frac{2(1+\nu)}{D_{23}^2} + \frac{2(1+\nu)}{(1-D_2)(1-D_3)} & 0 & 0 \\ \frac{2(1+\nu)}{D_{13}(1-D_1)} & \frac{2(1+\nu)}{D_{13}(1-D_2)} & \frac{2(1+\nu)}{D_{13}(1-D_3)} & \frac{2(1+\nu)}{D_{13}D_{23}} & \frac{2(1+\nu)}{D_{13}^2} + \frac{2(1+\nu)}{(1-D_1)(1-D_3)} & 0 \\ \frac{2(1+\nu)}{D_{12}(1-D_1)} & \frac{2(1+\nu)}{D_{12}(1-D_2)} & \frac{2(1+\nu)}{D_{12}(1-D_3)} & \frac{2(1+\nu)}{D_{12}D_{23}} & \frac{2(1+\nu)}{D_{12}D_{13}} & \frac{2(1+\nu)}{D_{12}^2} + \frac{2(1+\nu)}{(1-D_1)(1-D_2)} \end{bmatrix} \quad (\text{II-12})$$

- Le cas ou les directions principales de tenseur d'endommagement sont confondues avec les directions principales de contraintes  $\sigma$  et déformations  $\varepsilon$  (Challamel et al, 2005).

\* Elasto-plastique avec endommagement anisotrope

$$\underline{\underline{\tilde{S}}}(D) = \frac{1}{E_0} \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-D_1)^2} & \frac{-\nu}{(1-D_1)(1-D_2)} & \frac{-\nu}{(1-D_1)(1-D_3)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{(1-D_2)(1-D_1)} & \frac{1}{(1-D_2)^2} & \frac{-\nu}{(1-D_2)(1-D_3)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{(1-D_3)(1-D_1)} & \frac{-\nu}{(1-D_3)(1-D_2)} & \frac{1}{(1-D_3)^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{(1-D_2)(1-D_3)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{(1-D_1)(1-D_3)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{(1-D_1)(1-D_2)} \end{bmatrix} \quad (\text{II-13})$$

\* Hypo-élastique de la phase argileuse

$$\underline{\underline{S}}(p') = \frac{1}{E(p')} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \quad (\text{II-14})$$

### II.2.3 Caractérisation des coefficients d'endommagement

L'utilisation d'une variable d'endommagement tensorielle permettant de traduire l'anisotropie de la zone endommagée - fracturée doit être retenue vis-à-vis d'une anisotropie initiale des caractéristiques mécaniques.

#### II.2.3.1 La loi de Weibull originale

Dans les matériaux hétérogènes les déformations en extension menant à la rupture ne sont pas constantes mais varient d'un essai à un autre (Bazant & al 1997. Weibull 1939-1951 & Hudson & al 1961) ont montré que les déformations en extension à la rupture peuvent être décrites de manière statistique par une distribution :

$$P_{r(x)} = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x - x_u}{x_0} \right)^m \right] \quad (\text{II-15})$$

Avec :  $x_u \leq x < \infty$

$m$  : un paramètre de forme décrivant la dispersion de  $x$

$x_0$  : un paramètre d'échelle et  $x_u$  un paramètre local de la plus petite valeur de  $x$ .

#### II.2.3.2 La loi de Weibull adaptée aux matériaux cimentaires

Pour décrire le comportement des matériaux fragiles notamment les matériaux cimentaires, on a proposé une modification de la loi de Weibull en affectant à la distribution le coefficient d'endommagement sous la forme :

$$D_i^t = 1 - \exp \left( - \frac{1}{m} \left( \frac{\sigma_i^t}{\sigma_u^t} \right)^m \right) \quad (\text{II-16})$$

Avec :  $t$  (extension),  $m$  et  $\sigma_u^t$  sont les paramètres du matériau.

#### a) Evaluations du paramètre $m$ et de la contrainte $\sigma_u$

L'évaluation du paramètre  $m$  et des contraintes  $\sigma_u$  sont déterminés par ajustement sur des essais de traction réalisés dans les directions d'anisotropie. Cette anisotropie pour l'argilite est caractérisée par la verticale Y suivant  $\sigma_v$  et les horizontales (X suivant  $\sigma_H$ , Z suivant  $\sigma_h$ ). Par ailleurs, les essais ont été réalisés sur des échantillons partiellement saturés avec une humidité relative de 96% soit une pression capillaire de :

$$p_{\text{capillaire}} = -132.5 \times \ln(Hr) = 5.4 \text{MPa}$$

L'évaluation de la pression d'eau équivalente utilise la relation hyperbolique de Sun & al (2000) :

$$p_w^{\text{equ}} = - \frac{P_{\text{cap}}}{1 + \frac{P_{\text{cap}}}{35}} = -4.75 \text{MPa}$$

Figure II-4 présente les comparaisons entre les simulations paramétriques et les résultats expérimentaux dans les deux directions  $\sigma_v$  et  $\sigma_h$  avec un module d'élasticité de 4000 MPa

correspondant à l'état partiellement saturé. Six valeurs de la contrainte  $\sigma_u$  ont été utilisées, 3 valeurs de  $\sigma_u$  dans les directions Y- $\sigma_v$  : -2 MPa, -2.5MPa, -1.5MPa et 3 valeurs de  $\sigma_u$  dans la direction Z- $\sigma_h$  : -1MPa, -0.8MPa, -1.5MPa. La valeur du paramètre m a été pris égale à 10.

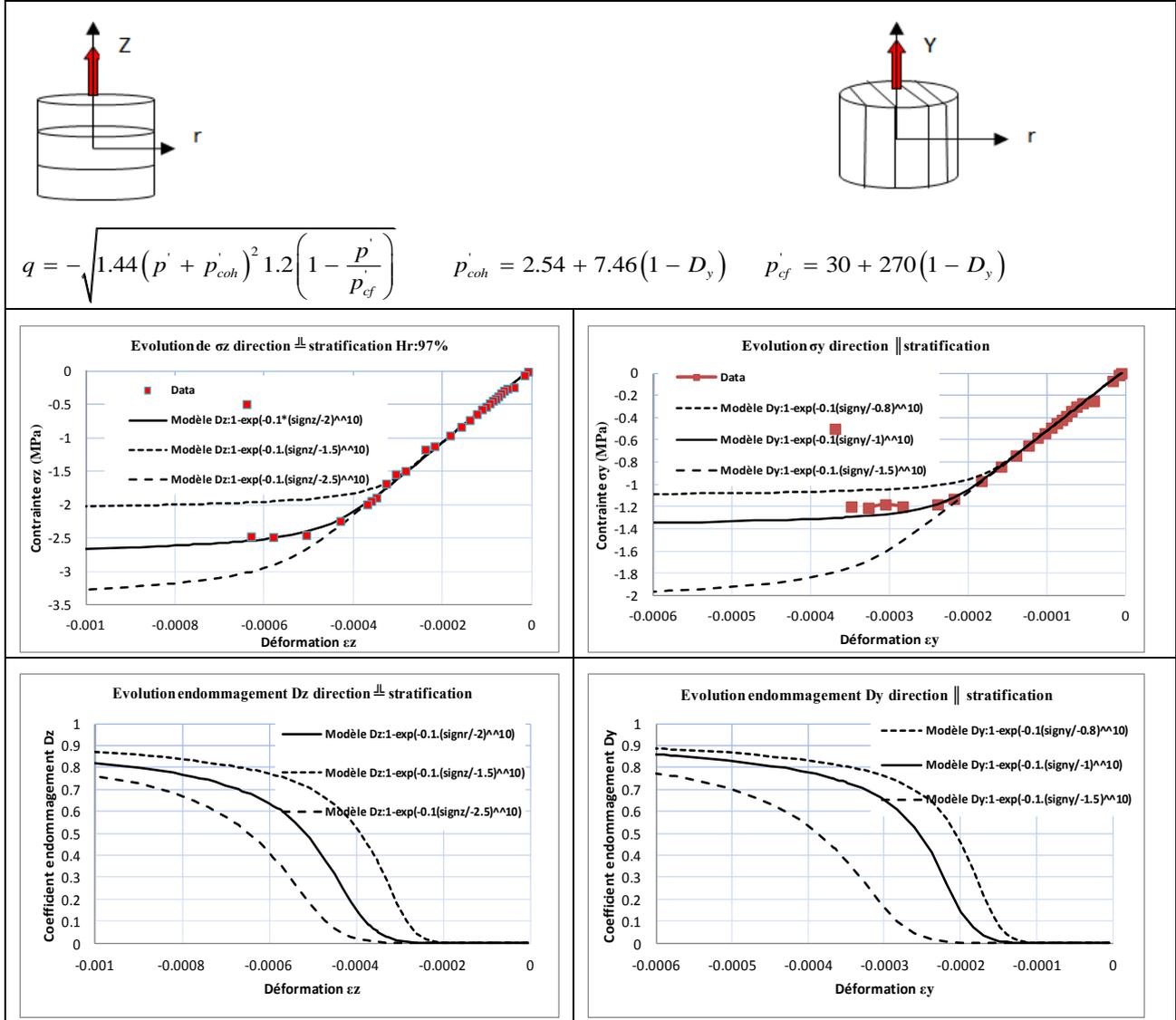


Figure II-4 : Simulations paramétriques de l'essai de traction directe dans les directions perpendiculaire et parallèle à la stratification (Data source EGC-CEA LG géomécanique).

Cette étude paramétrique montre que les contraintes de  $\sigma_u = -2\text{MPa}$  dans la direction Z et  $\sigma_u = -0.75\text{MPa}$  dans la direction Y permettent de simuler les comportements contrainte - déformation dans les directions Z et Y. En revanche, cette approche ne permet d'atteindre la rupture obtenue dans les essais de traction puisque les coefficients d'endommagement sont respectivement pour les contraintes maximales de traction de  $D_z = 0.7$  pour la direction Z- $\sigma_v$  et de  $D_y = 0.75$  pour la direction Y- $\sigma_h$ .

**b) Nouvelle formulation - Modèle de Mazars**

La loi de Weibull adaptée aux matériaux cimentaires (exprimée en contrainte) ne permet pas de reproduire les ruptures en extension observées sur l'argilite du COX. En effet, les déformations en extension sont de faibles amplitudes inférieures à 0.1% et la formulation en contrainte ne permet pas d'avoir une précision suffisante pour capter les déformations à la rupture. On doit trouver une autre méthode pour évoluer les coefficients de l'endommagement.

Mazars (1986) a proposé que l'endommagement soit piloté par la déformation et ses coefficients sont exprimés sous la forme exponentielle.

$$D_i = 1 - \exp \left[ -\frac{1}{10} \cdot \left( \frac{\varepsilon_i^-}{\varepsilon_{i\text{lim}}^-} \right)^{10} \right] \quad (\text{II-17})$$

En appliquant cette formule, on peut déterminer les coefficients d'endommagement de l'argilite Callovo-Oxfordien sous la forme:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i \geq 0 &\rightarrow D_i = 0 \\ \varepsilon_i < 0 &\rightarrow D_i = 1 - \exp \left[ -\frac{1}{10} \cdot \left( \frac{\varepsilon_i^-}{\varepsilon_{i\text{lim}}^-} \right)^{10} \right] \end{aligned} \quad (\text{II-18})$$

Avec  $\varepsilon_{i\text{lim}}^-$  les trois valeurs des déformations liées aux directions d'anisotropie du vecteur de déformation. Ces trois valeurs permettent de spécifier les ruptures en extension. Ainsi, la quantification des trois valeurs de l'endommagement dans les directions principales nécessite les déterminations des trois valeurs des déformations limites notée  $\varepsilon_{i\text{lim}}^-$ .

**II.2.3.3 Evaluations des valeurs des déformations limites en extension  $\varepsilon_{i\text{lim}}^-$  à partir des essais en extension sur échantillons carottés**

L'évaluation des déformations limites a été réalisée à partir des essais du CEA et EGC en laboratoire jour sur des échantillons prélevés à 517m de profondeur resaturées et réparées par une reconsolidation sous 60MPa.

Les simulations numériques des déformations axiales en fonction du déviateur de contrainte pour différentes valeurs des déformations limites comparées aux résultats des essais nous a permis de déterminer les trois déformations limites dans les trois directions des contraintes principales in situ.

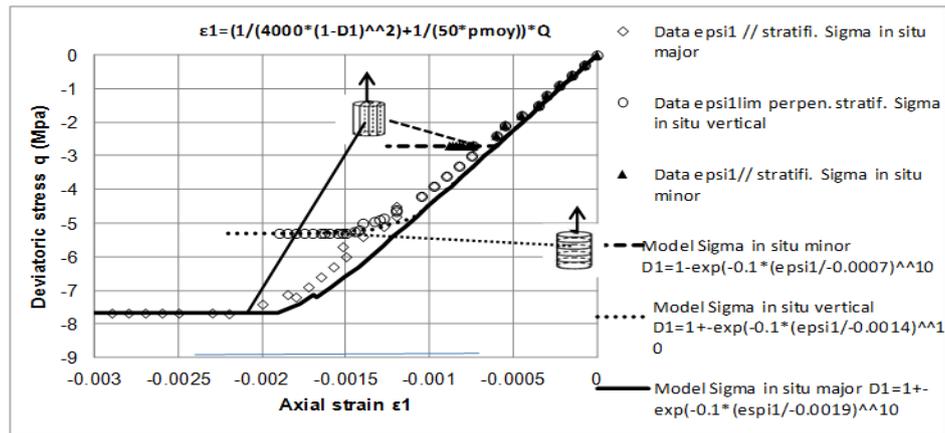


Figure II-5 : Simulation paramétrisée de l'essai de traction directe (Data source EGC-CEA)

On a obtenu 3 valeurs de déformation limites suivant 3 directions X,Y,Z: et Je les utilise dans le modèle pour observer les zones endommagés

Direction de sollicitation	Etat de contrainte	m	$\epsilon_{lim}$
	$\sigma'_h = 12.4 - 0.6 \times 4.7 = 9.58 MPa$ $\sigma'_v = 12.7 - 0.6 \times 4.7 = 9.88 MPa$ $\sigma'_H = 16.1 - 0.6 \times 4.7 = 13.3 MPa$	10	-0.0014
	$\sigma'_h = 12.4 - 0.6 \times 4.7 = 9.58 MPa$ $\sigma'_v = 12.7 - 0.6 \times 4.7 = 9.88 MPa$ $\sigma'_H = 16.1 - 0.6 \times 4.7 = 13.3 MPa$	10	-0.0007
	$\sigma'_h = 12.4 - 0.6 \times 4.7 = 9.58 MPa$ $\sigma'_v = 12.7 - 0.6 \times 4.7 = 9.88 MPa$ $\sigma'_H = 16.1 - 0.6 \times 4.7 = 13.3 MPa$	10	-0.0019

Tableau II-4 : Valeur des déformations limites par rapport aux directions des contraintes in situ

### II.2.4 Caractérisation des surfaces de discontinuités

La création des discontinuités en extension est associée aux valeurs des coefficients d'endommagement unitaire et leurs orientations sont des plans perpendiculaires à la direction des contraintes principales ou correspondent au plan de distorsion maximale cf Figure II-6 et Figure II-7

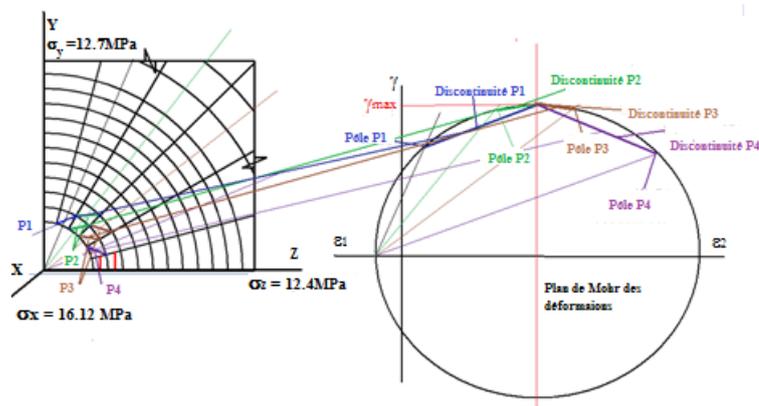


Figure II-6 : Les premières surfaces de discontinuité pendant le phase d'excavation (16 jours) pour une galerie orientée dans la direction  $\sigma_H$

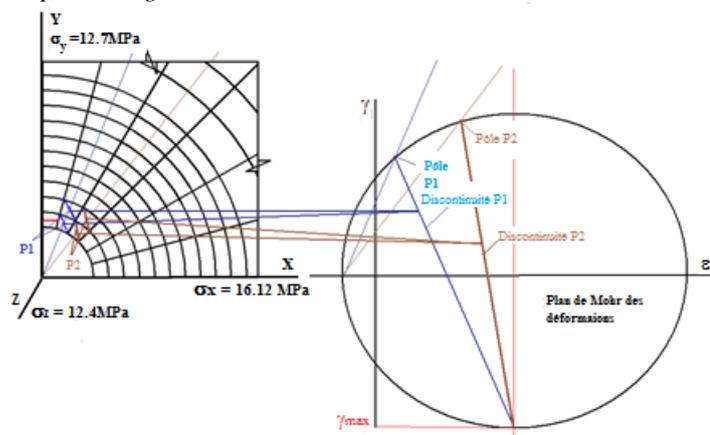


Figure II-7 : Les premières surfaces de discontinuité pendant le phase d'excavation (16 jours) pour une galerie orientée dans la direction  $\sigma_h$

### II.2.5 Caractérisation de la viscosité

Les déformations visqueuses sont calculés par une formule expérience proposée par EGC

$$\varepsilon_{ij}^{vis} = A \cdot \frac{D_{ij}}{1 + \frac{D_{ij}}{0.5}} \cdot \frac{S_{ij} - S_0}{P_{moy}} \cdot \ln(1 + t) = V_{ij} dt$$

A partir des comparaisons entre la modélisation et l'essai, on peut prendre la valeur  $A = 0.05$  pour déterminer les déformations visqueuses de l'argilite à l'état partiellement saturé  $H_r = 90\%$  cf. Tableau II-5 et Figure II-8.

%/Qpic (35Mpa)	Q (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_2$ (Mpa)	Pmoy (MPa)	S1 (MPa)	S2 (Mpa)	A
90%	31.5	43.5	12	22.5	21	-10.5	0.05
75%	26.5	38.5	12	20.8	17.67	-8.83	0.05

Tableau II-5: Valeurs des paramètres utilisés pour la simulation des déformations visqueuses

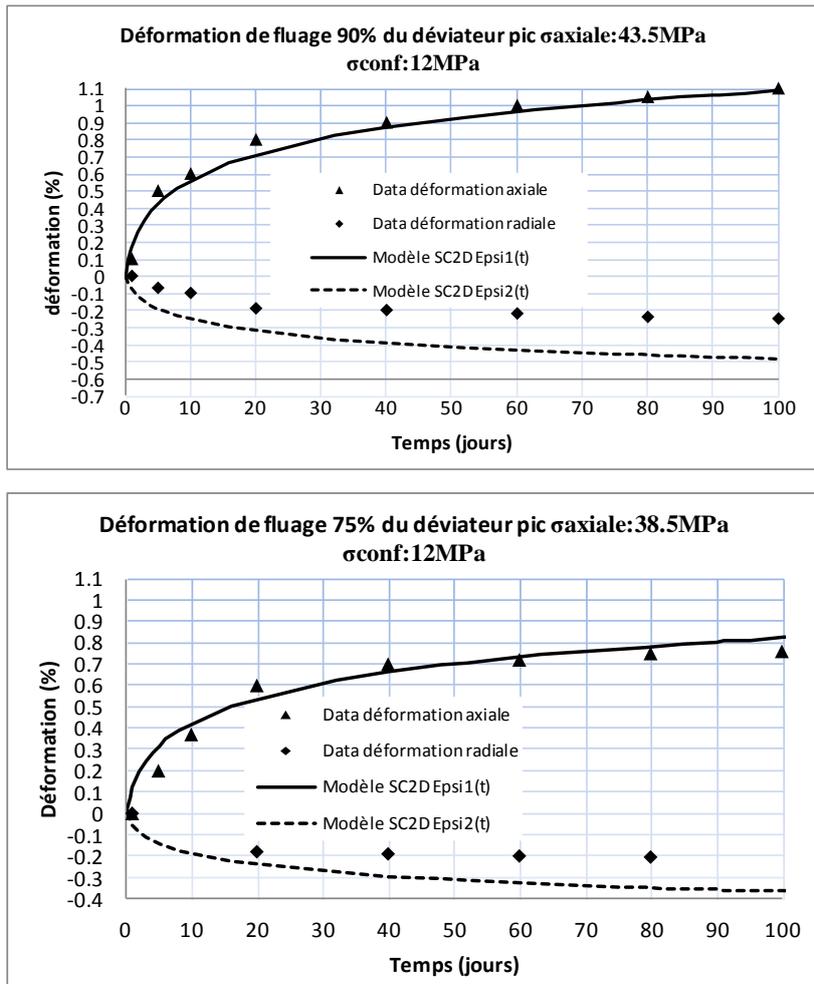


Figure II-8: Comparaison entre le modèle SC2D et les essais du LAEGO sur des chemins de chargement triaxiaux pour  $H_r$  : 90% et 75% du déviateur de pic

### II.3 RAPPEL SUCCINCT DES HYPOTHESES DU MODELE SC2D POUR L'ARGILITE DE CALLOVO-OXFORDIEN

- **H1** Le comportement résultant sera une compétition entre un comportement ductile dans la direction des déformations de tassement et un comportement semi fragile dans la direction des déformations d'extension
- **H2** Le comportement ductile est caractérisé par un large domaine à écrouissage négatif

$$d\varepsilon_{ij}^e = (S_{ijkl}(\underline{D}) + S_{ijkl}(p')) \cdot d\sigma_{kl}^c \quad \text{avec} \quad \underline{S} = \underline{C}^{-1} \quad (\text{II-19})$$

Les surfaces de charges :

$$\begin{aligned} \tilde{F}_D = \tilde{G}_D = (p', q, \theta) &= q^2 - 0.5L^2(p' + \tilde{p}'_{cohe})^2 a \left(1 - \frac{p'}{\tilde{p}'_{cf}}\right) = 0 \\ \tilde{F}_p(p', q, \theta) &= q^2 - L^2 \times (p' + \tilde{p}'_{cohe})^2 a \times \left(1 - \frac{p'}{\tilde{p}'_{cf}}\right) = 0 \\ \tilde{G}_p(p', q, \theta) &= q^2 - (p')^2 \times \left[ \left( \frac{p'_g}{p'} \right)^{1/2r} - 1 \right]^{2r} = 0 \end{aligned} \quad (\text{II-20})$$

Les déformations plastiques associées sont définies par une loi d'écoulement non associative

$$\tilde{G}_p(p', q, \theta) = q^2 - (p')^2 \times \left( \left( \frac{p_g}{p'} \right)^{1/2r} - 1 \right)^{2r} = 0 \quad (\text{II-21})$$

$$d\varepsilon_{ij}^p = dh \cdot \frac{\partial G}{\partial \sigma_{ij}} \quad \text{soit :} \quad d\varepsilon_p^p = dh \frac{\partial G}{\partial p'}$$

- **H3** Le comportement élastique  $d\varepsilon_{ij}^e = (S_{ijkl}(D) + S_{ijkl}(p')) d\sigma_{kl}^e$  est la contribution d'un comportement élastique avec endommagement anisotrope caractérisant le renforcement de l'argilite par la calcite  $S_{ijkl}(D)$  et d'un comportement hypo-élastique de la phase argileuse  $S_{ijkl}(p')$  avec  $E(p') = E_{op} \cdot (p^n)$  ( $E_{op}=50$  et  $n=1$ )
- **H4** Le comportement semi fragile élastique est associé à un endommagement anisotrope avec des coefficients d'endommagement dépendant des déformations en extension et des directions des contraintes principales in situ ( direction  $\sigma_v$  et du plan  $\sigma_h - \sigma_H$  )
- **H5** La relation de couplage fluide-squelette solide utilise le concept des contraintes effectives étendu sous la forme :

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \sigma_{ij}' + b(D) \cdot p_w^{equ} \cdot \delta_{ij} \\ b &= 0.4 \max D_i + 0,6 \end{aligned} \quad (\text{II-22})$$

- **H6** Les coefficients d'endommagement s'expriment par une extension de la relation de Mazars qui dépendent des directions d'extension par rapport aux directions des contraintes principales in situ

$$\begin{aligned} \varepsilon_i \geq 0 &\rightarrow D_i = 0 \\ \varepsilon_i < 0 &\rightarrow D_i = 1 - \exp \left[ -\frac{1}{10} \cdot \left( \frac{\varepsilon_i^-}{\varepsilon_{i\text{lim}}^-} \right)^{10} \right] \end{aligned} \quad (\text{II-23})$$

- **H7** Le comportement différé est ici constitué seulement de la partie viscosité induite par le dé-confinement de la phase argileuse :

$$\varepsilon_{ij}^{vis} = A \cdot \frac{D_{ij}}{1 + \frac{D_{ij}}{0.5}} \cdot \frac{s_{ij} - s_0}{p_{moy}} \cdot \text{Ln}(1+t) \quad (\text{II-24})$$

Avec :

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{\text{Tr}(\sigma_{ij})}{3} \delta_{ij}; \quad s_{ij0} = \sigma_{ij/r \rightarrow \infty} - p_{moy}$$

- **H8** Les déformations visqueuses et de gonflement n'impactent pas les valeurs des coefficients d'endommagement. En d'autre terme les valeurs des coefficients d'endommagement dépendent seulement des déformations d'extension liées à la décharge mécanique.

La Figure II-9 présente la réponse à un chemin triaxial avec le modèle SC2D de l'argilite non perturbée par la décharge hydromécanique

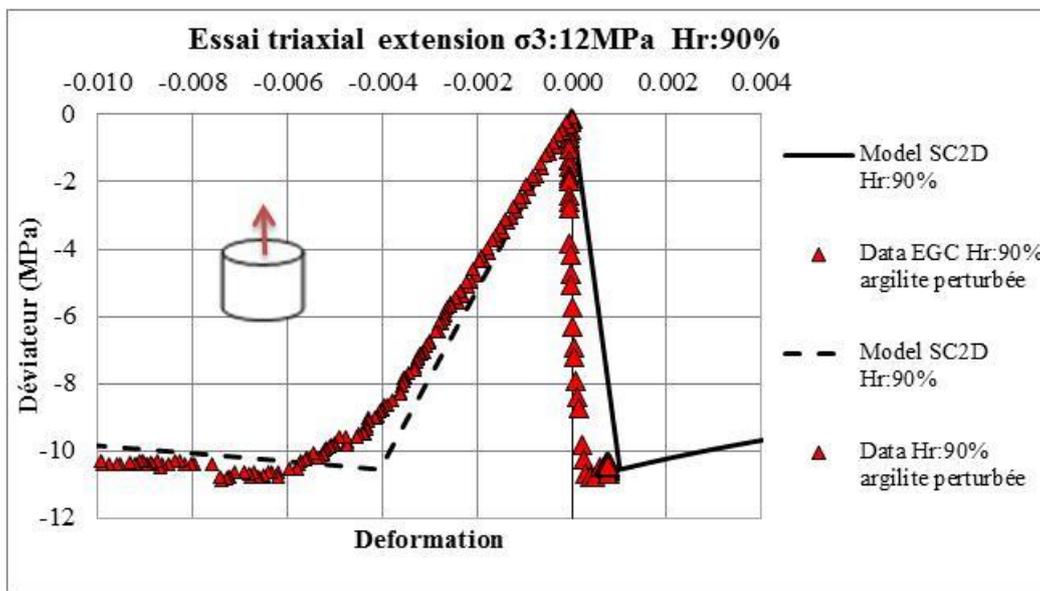
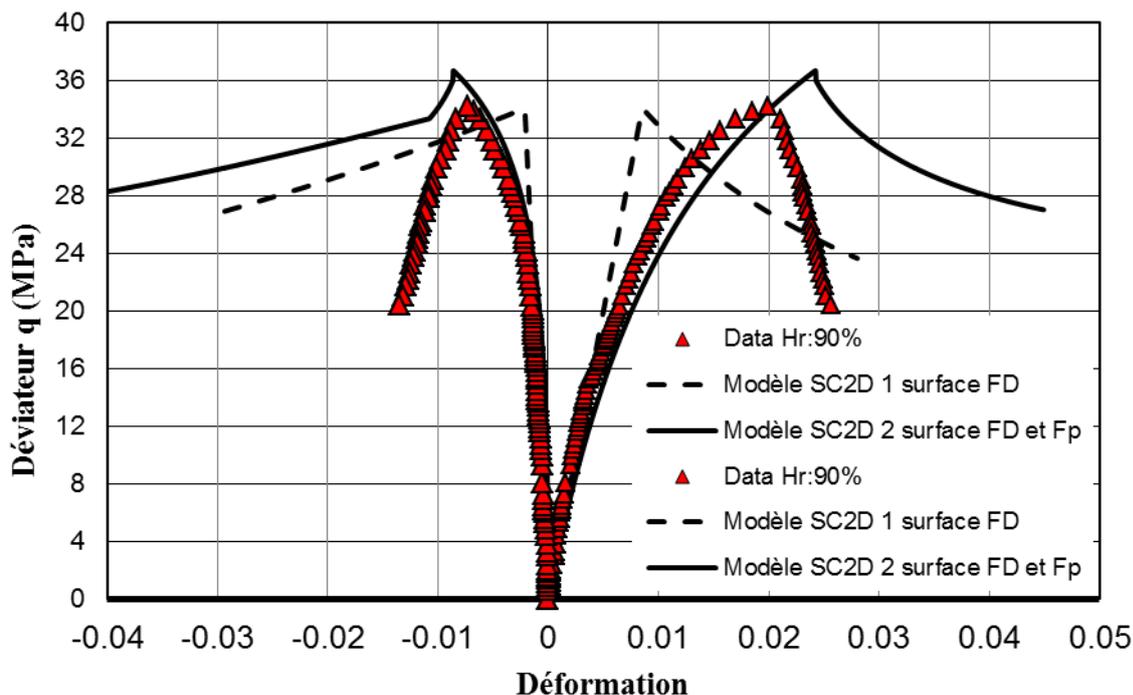


Figure II-9 : Réponse à une sollicitation triaxiale du modèle SC2D de l'argilite pour essais de compression et d'extension

## II.4 APPLICATION DU MODELE SC2D POUR LE CAS DE DEFORMATIONS PLANES

La matrice d'endommagement devient :

$$\tilde{S} \begin{pmatrix} D \\ \underline{\underline{D}} \end{pmatrix} = \frac{1}{E_0} \begin{bmatrix} \frac{1}{(1 - D_{11})^2} & \frac{1 + \nu_0}{(D_{12})^2} + \frac{-\nu_0}{(1 - D_{11}) \cdot (1 - D_{22})} & \frac{2 \cdot (1 + \nu_0)}{D_{12} \cdot (1 - D_{11})} \\ \frac{1 + \nu_0}{(D_{12})^2} + \frac{-\nu_0}{(1 - D_{11}) \cdot (1 - D_{22})} & \frac{1}{(1 - D_{22})^2} & \frac{2 \cdot (1 + \nu_0)}{D_{12} \cdot (1 - D_{22})} \\ \frac{2 \cdot (1 + \nu_0)}{D_{12} \cdot (1 - D_{11})} & \frac{2 \cdot (1 + \nu_0)}{D_{12} \cdot (1 - D_{22})} & \frac{2 \cdot (1 + \nu_0)}{(D_{12})^2} + \frac{2 \cdot (1 + \nu_0)}{(1 - D_{11}) \cdot (1 - D_{22})} \end{bmatrix} \quad (II-25)$$

### II.4.1 Modèle SC2D endommagement piloté par les déformations en extension sans prise en compte de la rotation des contraintes principales

L'état des contraintes à 517 m de profondeur est anisotrope cf. Figure II-10.

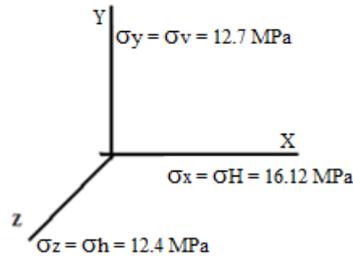


Figure II-10 : Référentiel confondu avec les directions des contraintes principales in situ

Les tenseurs  $\underline{\underline{\varepsilon}}, \underline{\underline{D}}$  prennent la forme suivante :

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{12} & \varepsilon_{22} \end{bmatrix} \quad \underline{\underline{D}} = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 \\ 0 & D_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{II-26})$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \frac{1}{E_0} \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-D_{11})^2} & \frac{-\nu_0}{(1-D_{11})(1-D_{22})} & 0 \\ \frac{-\nu_0}{(1-D_{11})(1-D_{22})} & \frac{1}{(1-D_{22})^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_0)}{(1-D_{11})(1-D_{22})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (\text{II-27})$$

En reprenant une expression sous forme exponentielle de Mazars, les valeurs des coefficients d'endommagement s'expriment sous la forme :

$$\varepsilon_i \geq 0 \rightarrow D_i = 0$$

$$\varepsilon_i < 0 \rightarrow D_i = 1 - \exp\left[-\frac{1}{10} \cdot \left(\frac{\varepsilon_i^-}{\varepsilon_{i\text{lim}}^-}\right)^{10}\right]$$

La création des discontinuités sont associées aux valeurs des coefficients d'endommagement unitaire et leurs orientations sont des plans perpendiculaires aux axes du référentiel X-Y-Z cf. Figure II-11

Direction de la stratification	Déformation limite $\varepsilon_{i\text{lim}}^-$
X ( $\sigma_H$ )	-0.0019
Z ( $\sigma_h$ )	-0.0014
Y ( $\sigma_v$ )	-0.0007

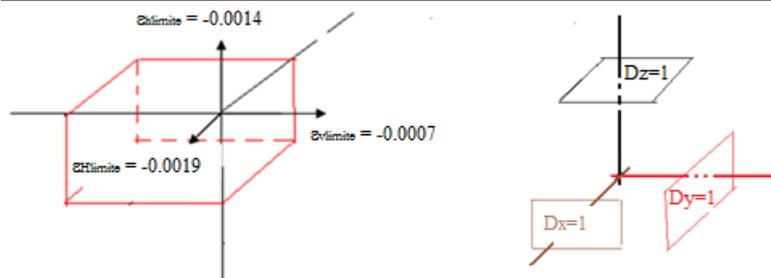


Figure II-11 : Schématisation des déformations limites et plans de discontinuités correspondants aux valeurs unitaires des coefficients d'endommagement

## II.4.2 Modèle SC2D endommagement anisotrope avec prise en compte de la rotation des contraintes principales

Les tenseurs  $\underline{\underline{\varepsilon}}, \underline{\underline{D}}$  prennent ici la forme suivante :

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{12} & \varepsilon_{22} \end{bmatrix} \quad \underline{\underline{D}} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{12} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{II-28})$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \frac{1}{E_0} \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-D_{11})^2} & \frac{1+\nu_0}{(D_{12})^2} + \frac{-\nu_0}{(1-D_{11})(1-D_{22})} & \frac{2(1+\nu_0)}{D_{12}(1-D_{11})} \\ \frac{1+\nu_0}{(D_{12})^2} + \frac{-\nu_0}{(1-D_{11})(1-D_{22})} & \frac{1}{(1-D_{22})^2} & \frac{2(1+\nu_0)}{D_{12}(1-D_{22})} \\ \frac{2(1+\nu_0)}{D_{12}(1-D_{11})} & \frac{2(1+\nu_0)}{D_{12}(1-D_{22})} & \frac{2(1+\nu_0)}{(D_{12})^2} + \frac{2(1+\nu_0)}{(1-D_{11})(1-D_{22})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (\text{II-29})$$

Les seules données sur des essais de cisaillement en torsion sur cylindre creux sont ceux de Lee réalisés sur une argilite (Lee & al 2002) cf. Figure II-12 : Essai de torsion sur cylindre creux Figure II-12.

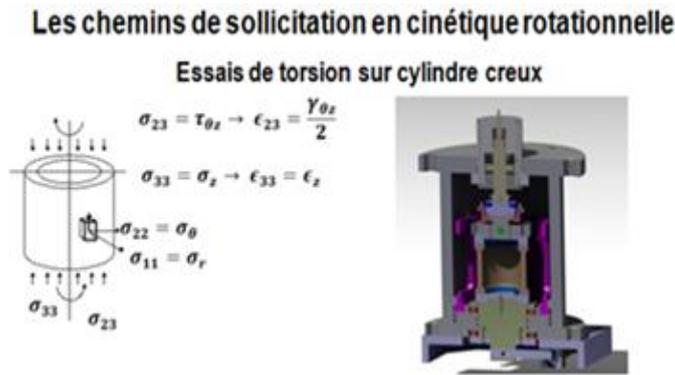


Figure II-12 : Essai de torsion sur cylindre creux

L'absence de données expérimentales sur le comportement de l'argilite sur des chemins de sollicitation rotationnelle nécessite certaines hypothèses :

- Les coefficients d'endommagement en cisaillement  $D_{12}$  conservent l'expression sous forme exponentielle des coefficients d'endommagement en extension
- La valeur limite de la déformation en distorsion est prise à 0.001

$$D_{12} = 1 - \exp \left[ -0.1 \times \left( \frac{\varepsilon_{12}}{0.001} \right)^{10} \right]$$

On a 3 valeurs de déformation limites de cisaillement suivant 3 directions XY, YZ, XZ et je les utilise dans le modèle pour observer les zones endommagées cf. Tableau II-6.

Coeff d'endommagement	Relation
--------------------------	----------

$D_{xy}$	$D_{xy} = 1 - \exp \left[ -0.1 \times \left( \frac{\varepsilon_{xy}}{0.001} \right)^{10} \right]$
$D_{xz}$	$D_{xz} = 1 - \exp \left[ -0.1 \times \left( \frac{\varepsilon_{xz}}{0.001} \right)^{10} \right]$
$D_{yz}$	$D_{yz} = 1 - \exp \left[ -0.1 \times \left( \frac{\varepsilon_{yz}}{0.001} \right)^{10} \right]$

Tableau II-6 : Relation des coefficients d'endommagement de cisaillement utilisés dans le calcul

### II.4.3 Méthode de régularisation

Comme on a discuté avant, l'argilite de Callovo-Oxfordien est un matériau multiphasique, il existe toujours une phase argileuse qui a un comportement hypo-élastique. Donc, la méthode de régularisation n'est pas nécessaire dans le modèle SC2D.

Lors de la fissure, le matériau est modélisé par un matériau homogène équivalent dans lequel l'ouverture de fissure est assimilée à une distribution de la déformation hypo-élastique. C'est-à-dire :

Avant la fissure ( $D \neq 1$ ) :  $d\varepsilon_{ij}^e = (S_{ijkl}(\underline{D}) + S_{ijkl}(p')) \cdot d\sigma_{kl}^{c'}$  avec  $\underline{S} = \underline{C}^{-1}$

Quand D vaut 1 :  $d\varepsilon_{ij}^e = S_{ijkl}(p') \cdot d\sigma_{kl}^{c'}$

$$\text{Avec } \underline{\tilde{S}}(p') = \frac{1}{E(p')} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.(1+\nu) \end{bmatrix} \quad (\text{II-30})$$

$$E(p') = E_{0p} \cdot (p^n)$$

## II.5 CONCLUSION

Le modèle rhéologique proposé pour l'argilite de Callovo-oxfordien a été enrichi par une meilleure prise en compte des mécanismes de base à l'échelle microscopique responsables des déformations macroscopiques à savoir:

- \* Le modèle conceptuel suggéré est de type élasto-plastique associé à un dommage anisotrope induit par l'existence des déformations en extension et s'exprime sous la forme :

$$d\sigma_{ij}^e = \underline{\tilde{C}}(D) : d\varepsilon_{kl}^e \text{ avec } \underline{\tilde{C}}(D) \text{ matrice de rigidité du matériau endommagé}$$

$$\underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon}^e + \underline{\varepsilon}^P + \underline{\varepsilon}^{vis}$$

- \* L'endommagement anisotrope est supposé se développer dans les directions principales du tenseur des déformations en extension. Les coefficients d'endommagement s'expriment sous la forme exponentielle de Mazars :

$$\varepsilon_i \geq 0 \rightarrow D_i = 0$$

$$\varepsilon_i < 0 \rightarrow D_i = 1 - \exp\left[-\frac{1}{10} \cdot \left(\frac{\varepsilon_i^-}{\varepsilon_{i\text{lim}}^-}\right)^{10}\right]$$

- \* La distribution des contraintes est une extension de la théorie de Biot des états saturés aux états partiellement saturés en faisant appel à une pression interstitielle équivalente:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^c + b(\underline{D}).p_w^{equ}.\delta_{ij}$$

$$\text{Avec } p_w^{eq} = -\frac{p_{cap}}{1 + p_{cap}/35}$$

- \* Le couplage entre l'endommagement défini par  $D_i$  et les propriétés hydromécaniques est considéré au travers du coefficient de Biot

$$b = a \max_{i \in \{I, II, III\}} D_i + b_0 \text{ (Picandet et al.) } a=0.4 \text{ et } b_0=0.6$$

- \* Les déformations plastiques sont caractérisées à travers la surface de charge de prélèvement (FP) par la relation d'écoulement plastique et un potentiel d'écoulement plastique (GP).

$$\tilde{F}_D = \tilde{G}_D = (p', q, \theta) = q^2 - 0.5L^2(p' + \tilde{p}'_{cohe})^2 a \left(1 - \frac{p'}{\tilde{p}'_{cf}}\right) = 0$$

$$\tilde{F}_p(p', q, \theta) = q^2 - L^2 \times (p' + \tilde{p}'_{cohe})^2 a \times \left(1 - \frac{p'}{\tilde{p}'_{cf}}\right) = 0$$

$$\tilde{G}_p(p', q, \theta) = q^2 - (p')^2 \times \left(\left(\frac{p_g}{p'}\right)^{1/2r} - 1\right)^{2r} = 0$$

L'absence de données expérimentales contrôlées (état hydrique, fluide de resaturation, niveau d'endommagement etc.) pour décrire le comportement à long terme des argilites nous a contraint de proposer un modèle plus simplifié que celui du comportement à court terme. Ce modèle phénoménologique propose que la déformation totale soit la contribution d'une partie élastique et d'une partie visqueuse:  $d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + V_{ij}.dt$

### **CHAPITRE III. APPLICATION DU MODELE SC2D A LA SIMULATION DES CHEMINS DE SOLLICITATION SIMPLE**

*Dans le cadre du programme de simulation de groupe des laboratoires de recherche, l'ANDRA a proposé une action transverse pour permettre :*

- \* De mieux comprendre la signification physique des mécanismes et des hypothèses de bases utilisés dans le modèle.*
- \* D'évaluer les réponses hydromécaniques obtenues par le modèle.*

*L'objectif de ce chapitre est de simuler des chemins de sollicitation proche de ceux suivis par les ouvrages de stockage installés dans l'argilite du Callovo Oxfordien. Pour cela trois types de chemins sont proposés :*

- \* Chemins de contrainte à proximité de la paroi d'un ouvrage*
- \* Chemins avec rotation ou permutation des axes principaux*
- \* Chemins faisant intervenir des couplages hydromécaniques*

### III.1 PARAMETRES UTILISES

Les paramètres retenus pour ces simulations sont représentés dans Tableau III-1

E0 (MPa)	E(p')	v	m	$\varepsilon_{i\lim}^-$ ( $Q_0 = 0MPa$ )	$\varepsilon_{i\lim}^-$ ( $Q_0 \neq 0MPa$ )	A	b coef de Biot
4000	50.p'	0.2	10	-0.0014	-0.0019	0.05	0.6

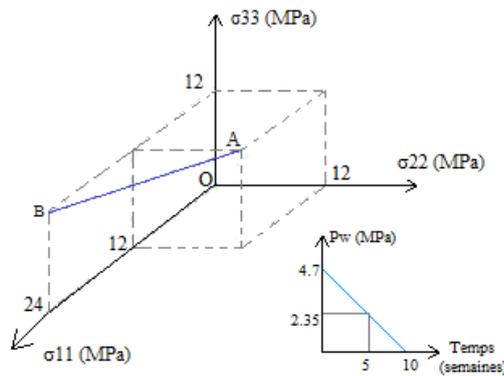
Tableau III-1 : Valeurs des paramètres du modèle SCD utilisées pour les simulations des chemins simples

### III.2 SIMULATION DES CHEMINS DE CONTRAINTES A PROXIMITE DE LA PAROI D'UNE GALERIE (TACHE 1)

#### III.2.1 Cas test n°11 (état de contrainte initial isotrope)

##### III.2.1.1 Chemin de sollicitation

Le chemin de sollicitation en contrainte totale est schématisé sur Figure III-1.



$$\sigma_A \begin{bmatrix} 12 & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 0 \\ 0 & 0 & 12 \end{bmatrix} \xrightarrow[\substack{P_w = 4.7 \rightarrow 0 \\ 10 \text{ semaines}}]{\substack{\Delta\sigma_{11} = -\Delta\sigma_{22} \\ \Delta\sigma_{33} = 0}} \sigma_B \begin{bmatrix} 24 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12 \end{bmatrix} \xrightarrow[6 \text{ mois}]{\text{Fluage}}$$

Figure III-1 : Chemin de sollicitation en contraintes totales du cas n°11

Le chemin de sollicitation est constitué de deux phases :

**AB** : Augmentation de la contrainte totale  $\sigma_{11}$ , et diminution de la contrainte totale  $\sigma_{22}$  associée à une diminution de la pression interstitielle constante de 4.7MPa à 0MPa pendant 10 semaines

**B** : Fluage pendant 6 mois a pression interstitielle nulle 0MPa

**Phase 1** Le chemin AB en contraintes effectives

$$\sigma' = \begin{bmatrix} 12 - b(D) \times 4.7 & 0 & 0 \\ 0 & 12 - b(D) \times 4.7 & 0 \\ 0 & 0 & 12 - b(D) \times 4.7 \end{bmatrix} \xrightarrow[10 \text{ semaines}]{AB}$$

Cas b=cst=0.6

$$\sigma' = \begin{bmatrix} 9.18 & 0 & 0 \\ 0 & 9.18 & 0 \\ 0 & 0 & 9.18 \end{bmatrix} \xrightarrow[10\text{semaines}]{AB} \begin{bmatrix} \sigma'_{11} = 24 & 0 & 0 \\ & \sigma'_{22} = 0 & 0 \\ & & \sigma'_{33} = 12 \end{bmatrix}$$

Les coefficients d'endommagement sur le chemin AB activés sont dans la direction 2 :

$$D = \begin{bmatrix} D_1 = 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 = 0 \end{bmatrix}$$

**Phase 2 (Fluage)** Les contraintes déviatoriques restent constantes malgré la diminution de la pression interstitielle pendant 6 mois. Le comportement différé est constitué de la partie viscosité induite par le déconfinement de la phase argileuse avec des contraintes déviatoires  $s_{ij}$  et  $q$  qui évoluent sur le chemin AB cf. Tableau III-1:

$$\varepsilon_{ij}^{vis} = 0.05 \times \frac{D_{ij}}{1 + \frac{D_{ij}}{0.5}} \times \frac{s_{ij}}{p_{moy}} \times Ln(1 + t)$$

S1(MPa)	S2(MPa)	S3(MPa)	Q(MPa)	Pmoy(MPa)	Q0(MPa)
12	-12	0	20.8	12	0

Tableau III-2 : Valeurs utilisées par la simulation de la viscosité du test 11

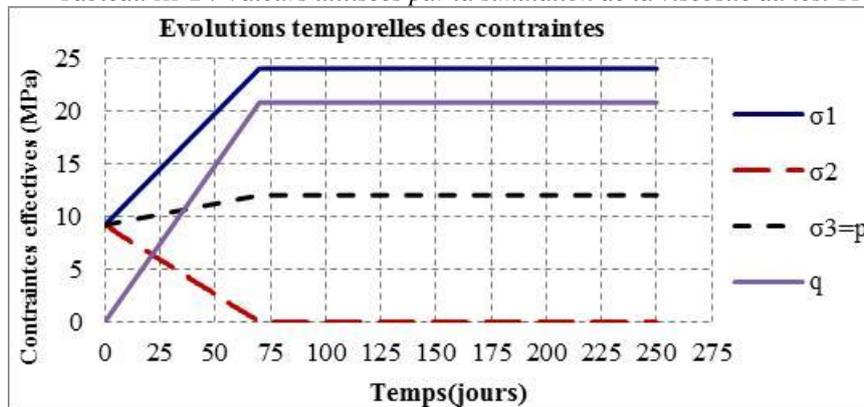


Figure III-2 : Chemin AB en contraintes effectives, déviateur et pression moyenne du test 11

### III.2.1.2 Résultats des simulations du test 11

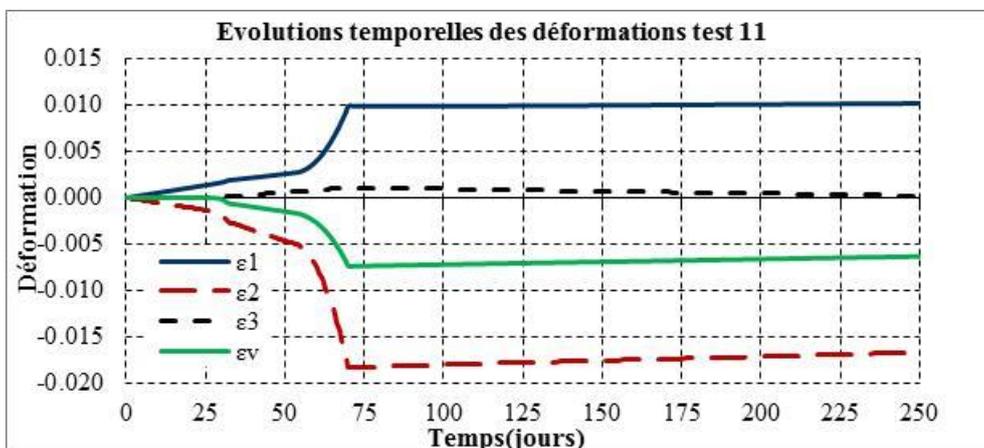


Figure III-3 : Evolutions temporelles des déformations du test n°11

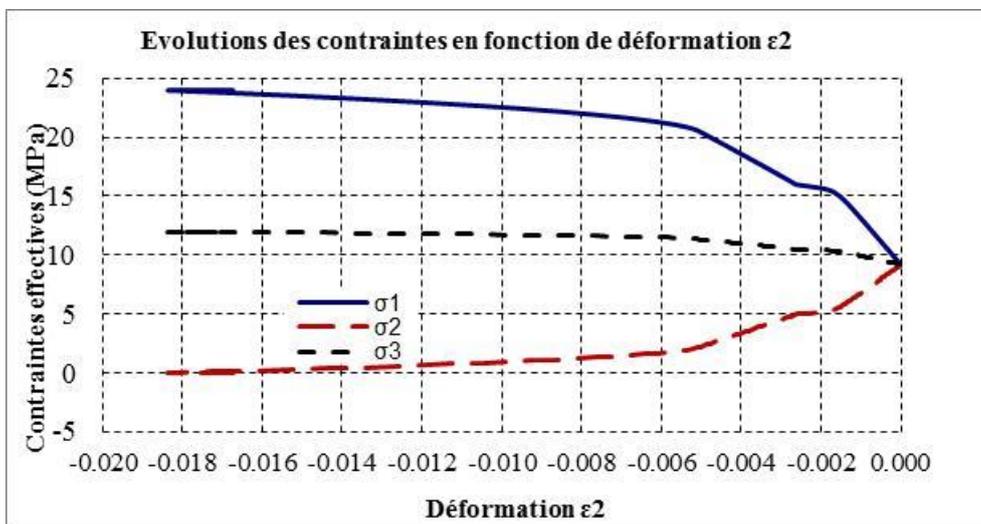
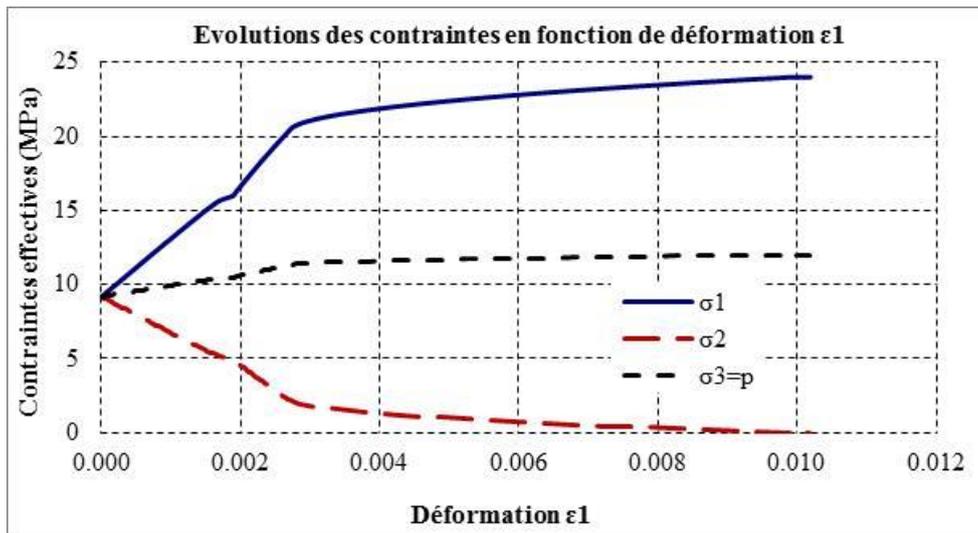


Figure III-4 : Evolutions des contraintes en fonction de déformation du test n°11

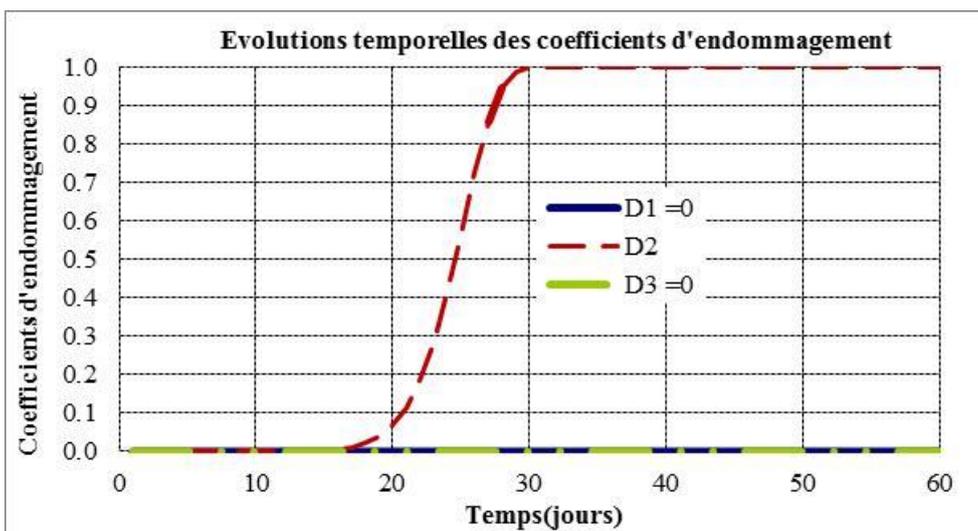


Figure III-5 : Evolutions temporelles des coefficients d'endommagement du test n°11

Comme la décharge est réalisée dans la direction de la contrainte  $\sigma_2$ , quand le coefficient d'endommagement atteint l'unité, une surface de discontinuité est produite associée à la direction perpendiculaire à  $\sigma_2$  correspondant à l'état de contrainte suivant

$$\underline{\underline{\sigma'_{\text{effective}} \text{ discontinuité } \perp \sigma_2}} : \left[ \begin{array}{l} \sigma'_1 = 15.55 \text{ MPa} \\ \sigma'_2 = 5.23 \text{ MPa} \\ \sigma'_3 = 10.39 \text{ MPa} \end{array} \right]$$

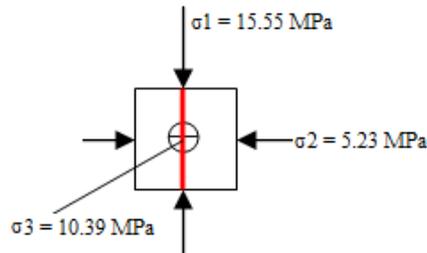
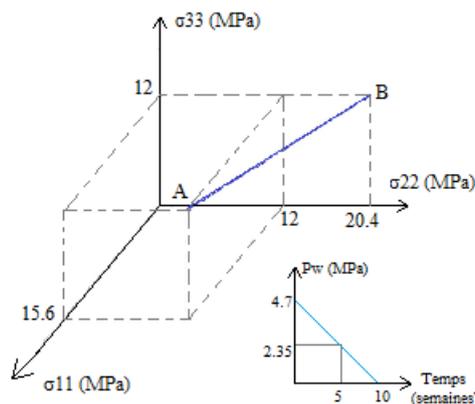


Figure III-6 : Plan de discontinuité cas test 11

### III.2.2 Cas test n°12 (état de contrainte initial anisotrope)

#### III.2.2.1 Chemin de sollicitation

Le chemin de sollicitation en contrainte totale est schématisé sur Figure III-7.



$$\sigma_A \begin{bmatrix} 15.6 & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 0 \\ 0 & 0 & 12 \end{bmatrix} \xrightarrow[\substack{\Delta\sigma_{33} = 0 \\ P_w = 4.7 \rightarrow 0 \\ 10 \text{ semaines}}]{\sigma_B \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 20.4 & 0 \\ 0 & 0 & 12 \end{bmatrix}} \begin{array}{l} \text{Fluage} \\ 6 \text{ mois} \end{array}$$

Figure III-7 :Chemin de sollicitation en contraintes totales du cas n°12

Le chemin de sollicitation est constitué de deux parties :

**AB** diminution de la contrainte totale  $\sigma_{11}$  et augmentation de la contrainte totale  $\sigma_{22}$  pendant 10 semaines avec une pression interstitielle variant de 4.7MPa à 0 nulle

**B** l'état de contrainte est maintenu constant pendant 6 mois

**Phase 1** Le chemin AB en contraintes effectives prend la forme

$$\sigma' = \begin{bmatrix} 15.6 - b(D) \times 4.7 & 0 & 0 \\ 0 & 12 - b(D) \times 4.7 & 0 \\ 0 & 0 & 12 - b(D) \times 4.7 \end{bmatrix} \xrightarrow[\substack{AB \\ 10 \text{ semaines}}]{}$$

Cas  $b = \text{cst} = 0.6$

$$\sigma' = \begin{bmatrix} 12.78 & 0 & 0 \\ 0 & 9.18 & 0 \\ 0 & 0 & 9.18 \end{bmatrix} \xrightarrow[10 \text{ semaines}]{AB} \begin{bmatrix} \sigma'_{11} = 0 & 0 & 0 \\ & \sigma'_{22} = 20.4 & 0 \\ & & \sigma'_{33} = 12 \end{bmatrix}$$

Les coefficients d'endommagement sur le chemin AB activés sont dans la direction 2 :

$$\underline{\underline{D}} = \begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 = 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 = 0 \end{bmatrix}$$

**Phase 2 (Fluage)** Les contraintes déviatoriques restent constantes malgré la diminution de la pression interstitielle pendant 6 mois. Le comportement différé est constitué de la partie viscosité induite par le dé-confinement de la phase argileuse avec des contraintes déviatoires  $s_{ij}$  et  $q$  qui évoluent sur le chemin AB cf. Tableau III-3:

$$\varepsilon_{ij}^{vis} = 0.05 \times \frac{D_{ij}}{1 + \frac{D_{ij}}{0.5}} \times \frac{s_{ij}}{p_{moy}} \times Ln(1 + t)$$

S1(MPa)	S2(MPa)	S3(MPa)	Q(MPa)	Pmoy(MPa)	Q0(MPa)
-10.8	9.6	1.2	17.75	10.8	3.57

Tableau III-3 : Valeurs utilisées par la simulation de la viscosité du test 12

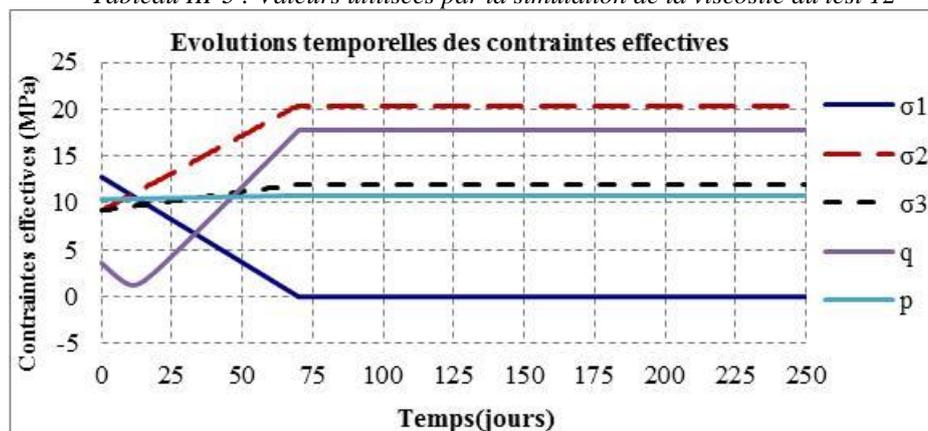


Figure III-8 : Chemin AB en contraintes effectives, déviateur et pression moyenne du test 12

### III.2.2.2 Résultats des simulations du test 12

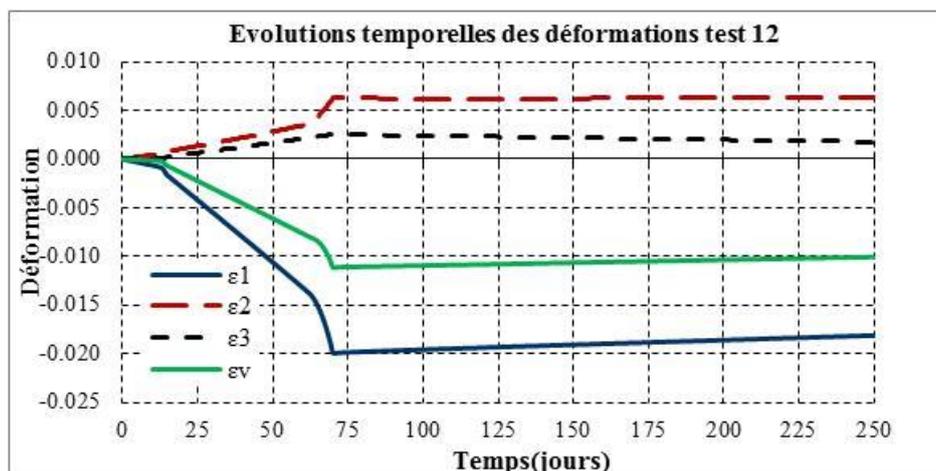


Figure III-9 : Evolutions temporelles des déformations du test n°12

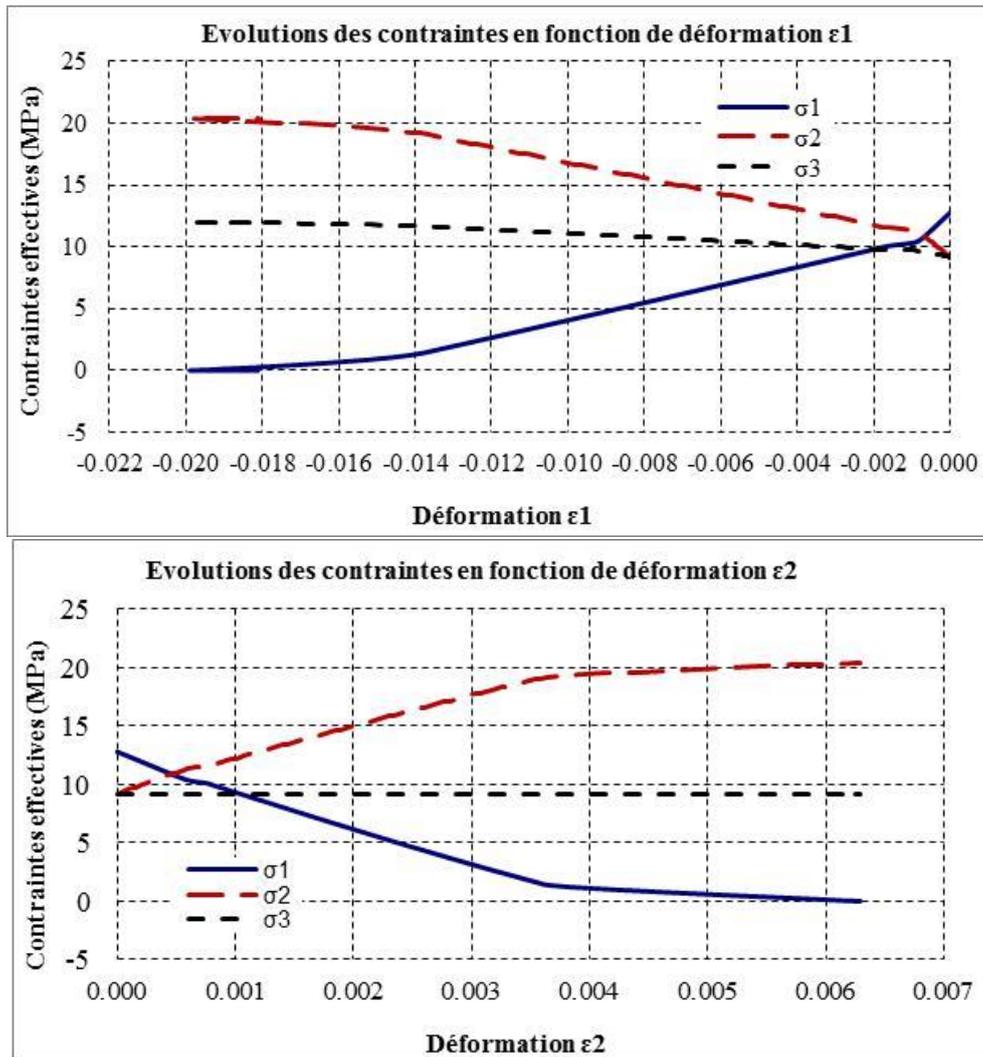


Figure III-10 : Evolutions des contraintes en fonction de déformation du test n°12

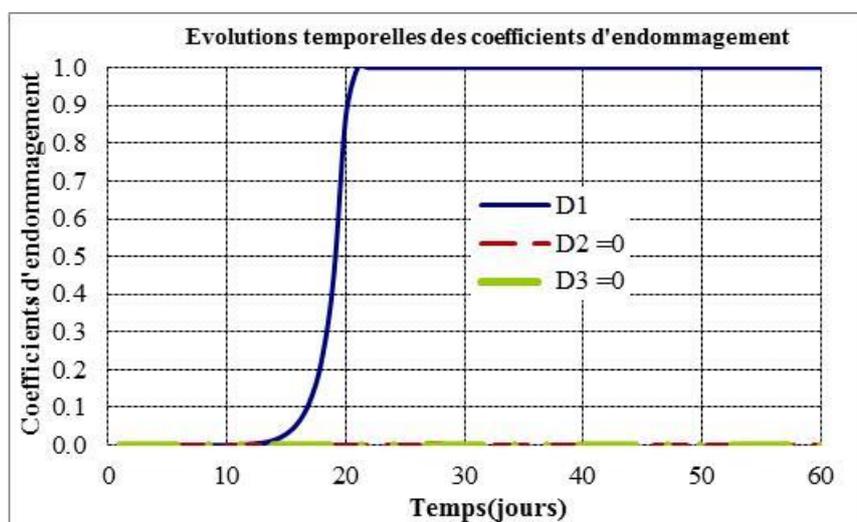


Figure III-11 : Evolutions temporelles des coefficients d'endommagement du test n°12

Dans ce test, la décharge est réalisée dans la direction de la contrainte  $\sigma_1$  avec un coefficient d'endommagement atteignant l'unité associé à une discontinuité perpendiculaire à  $\sigma_1$  et à l'état de contrainte suivant

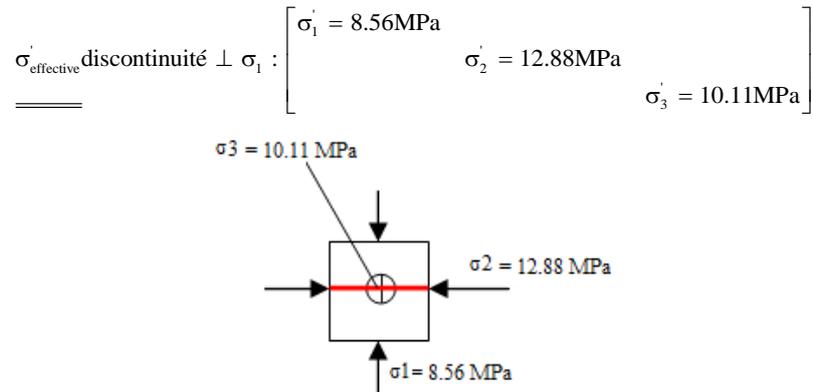
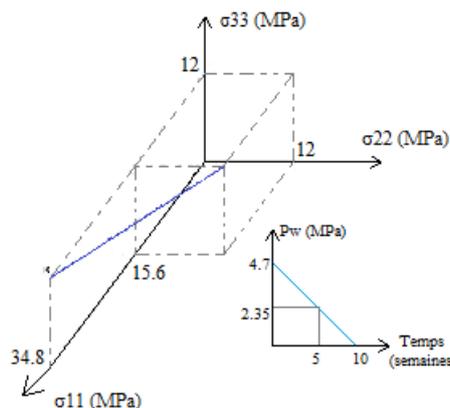


Figure III-12 : Plan de discontinuité cas test 12

### III.2.3 Cas test n°13 (état de contrainte initial anisotrope)

#### III.2.3.1 Chemin de sollicitation

Le chemin de sollicitation en contrainte totale est schématisé sur Figure III-13



$$\sigma_A \begin{bmatrix} 15.6 & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 0 \\ 0 & 0 & 12 \end{bmatrix} \xrightarrow[10 \text{ semaines}]{\begin{array}{l} \Delta \sigma_{33} = 0 \\ P_w = 4.7 \rightarrow 0 \end{array}} \sigma_B \begin{bmatrix} 34.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{Fluage} \\ \text{6 mois} \end{array}$$

Figure III-13 : Chemin de sollicitation en contraintes totales du cas n°13

Le chemin de sollicitation est constitué de deux parties :

**AB** augmentation de la contrainte totale  $\sigma_{11}$ , et diminution de la contrainte totale  $\sigma_{22}$  pendant 10 semaines associé à une diminution de la pression interstitielle de 4.7MPa à 0.

**B** l'état de contrainte est maintenu constant pendant 6 mois.

**Phase I** Le chemin AB en contraintes effectives prend la forme

$$\sigma' = \begin{bmatrix} 15.6 - b(D) \times 4.7 & 0 & 0 \\ 0 & 12 - b(D) \times 4.7 & 0 \\ 0 & 0 & 12 - b(D) \times 4.7 \end{bmatrix} \xrightarrow[10 \text{ semaines}]{AB}$$

Cas  $b = \text{cst} = 0.6$

$$\sigma' = \begin{bmatrix} 12.78 & 0 & 0 \\ 0 & 9.18 & 0 \\ 0 & 0 & 9.18 \end{bmatrix} \xrightarrow[10\text{semaines}]{AB} \begin{bmatrix} \sigma'_{11} = 34.8 & 0 & 0 \\ & \sigma'_{22} = 0 & 0 \\ & & \sigma'_{33} = 12 \end{bmatrix}$$

Les coefficients d'endommagement sur le chemin AB activés sont dans la direction 2 :

$$\underline{\underline{D}} = \begin{bmatrix} D_1 = 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 = 0 \end{bmatrix}$$

**Phase 2 (Fluage)** Les contraintes déviatoriques restent constantes malgré la diminution de la pression interstitielle pendant 6 mois. Le comportement différé est constitué de la partie viscosité induite par le dé-confinement de la phase argileuse avec des contraintes déviatoires  $s_{ij}$  et  $q$  qui évoluent sur le chemin AB cf. Tableau III-4:

$$\varepsilon_{ij}^{vis} = 0.05 \times \frac{D_{ij}}{1 + \frac{D_{ij}}{0.5}} \times \frac{s_{ij}}{p_{moy}} \times Ln(1 + t)$$

S1(MPa)	S2(MPa)	S3(MPa)	Q(MPa)	Pmoy(MPa)	Q0(MPa)
19.19	-15.59	-3.59	30.61	15.59	3.63

Tableau III-4 : Valeurs utilisées par la simulation de la viscosité du test 13

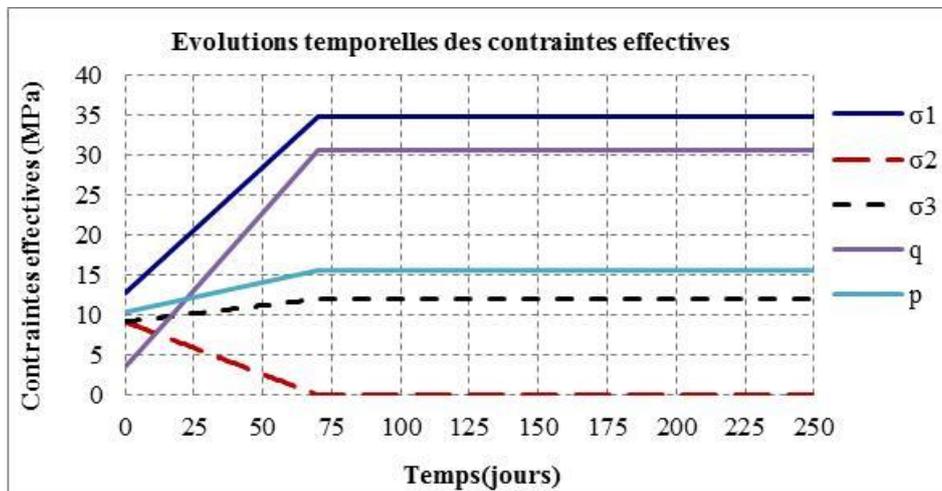


Figure III-14 : Chemin AB en contraintes effectives, déviateur et pression moyenne du test 13

### III.2.3.2 Résultats des simulations du test 13

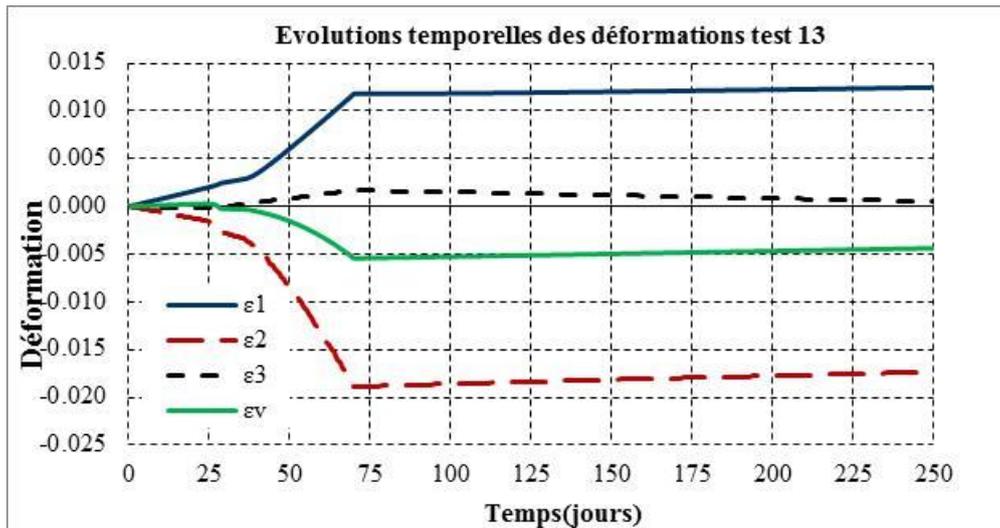


Figure III-15 : Evolutions temporelles des déformations du test n°13

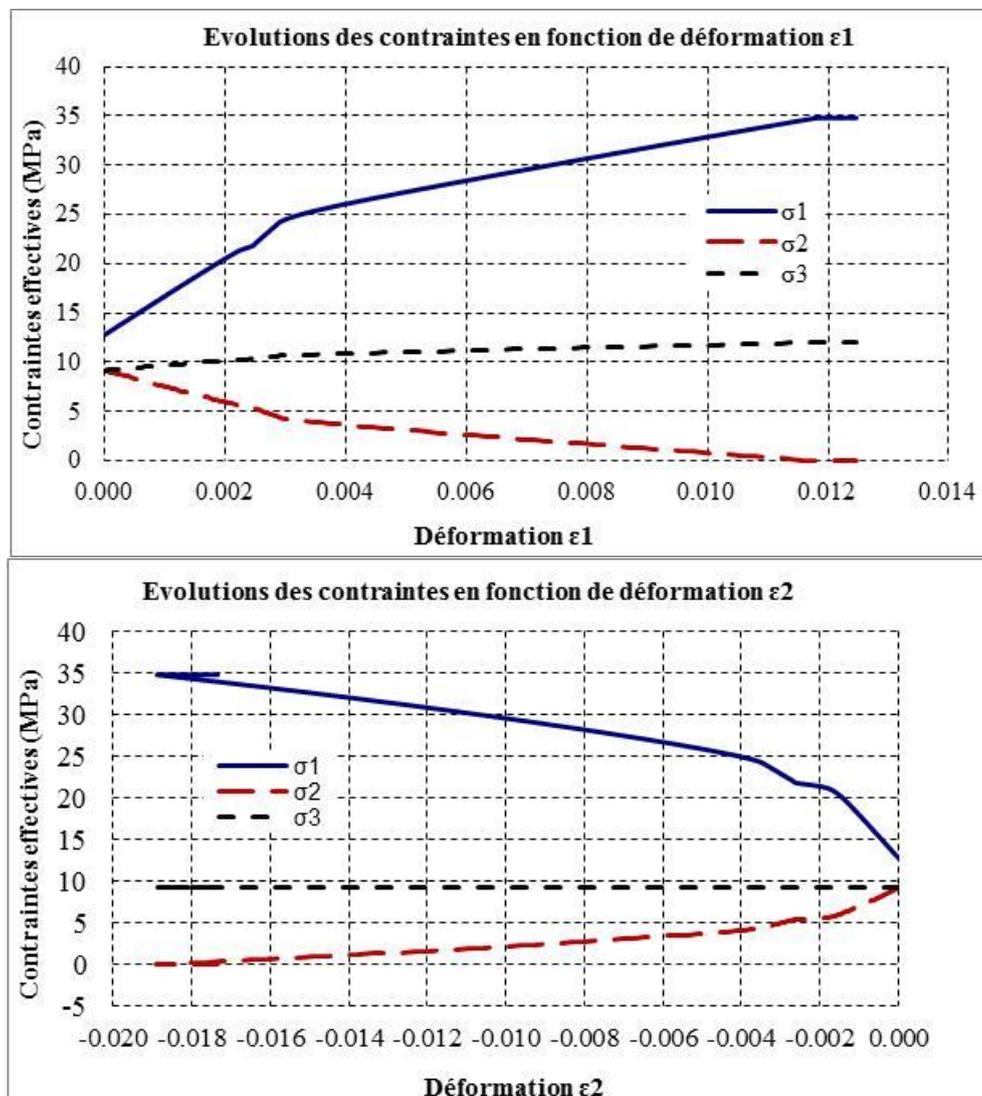


Figure III-16 : Evolutions des contraintes en fonction de déformation du test n°13

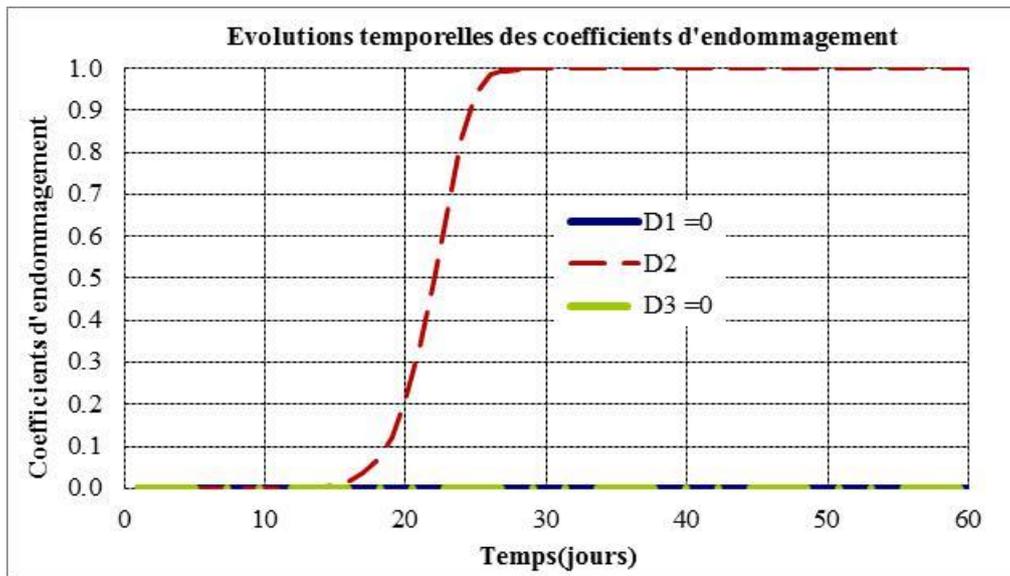


Figure III-17 : Evolutions temporelles des coefficients d'endommagement du test n°13

Comme la décharge est réalisée dans la direction de la contrainte  $\sigma_2$ , quand le coefficient d'endommagement atteint l'unité, une surface de discontinuité est produite associée à la direction perpendiculaire à  $\sigma_2$  correspondant à l'état de contrainte suivant

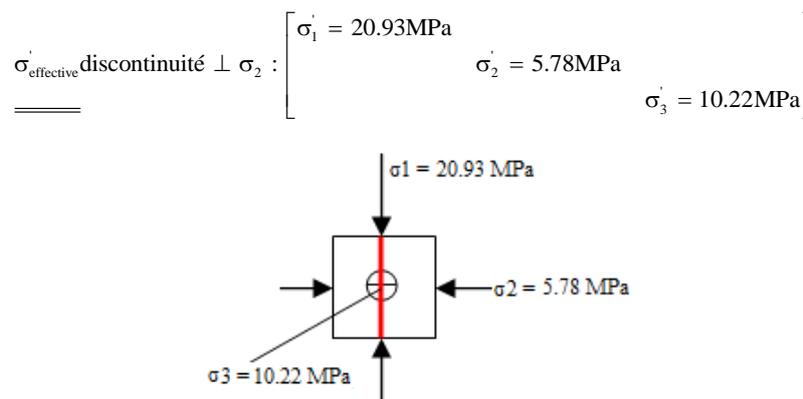


Figure III-18 : Plan de discontinuité cas test 13

### III.3 SIMULATION DES CHEMINS DE CONTRAINTES AVEC ROTATION DES AXES PRINCIPAUX DE CONTRAINTE (TACHE 2)

#### III.3.1 Cas test n°21 (état de contrainte initial isotrope)

##### III.3.1.1 Chemin de sollicitation

Le chemin de sollicitation avec rotation des axes principaux en contraintes totales sans variation de la pression interstitielle et pour un état de contrainte initial isotrope, constitué de deux phases de 8 semaines et un temps de torsion correspondant à la rupture est présenté sur Figure III-19.

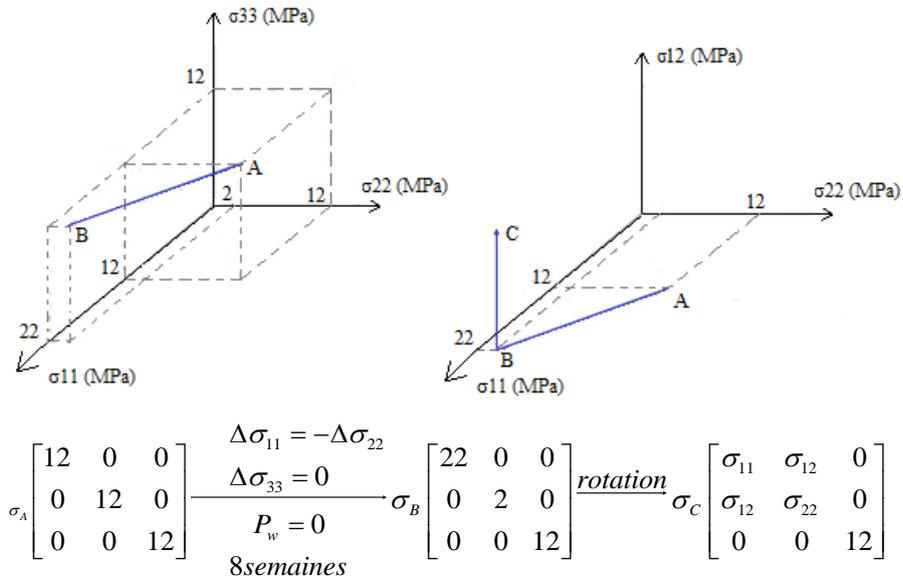


Figure III-19 : Chemin de sollicitation en contraintes totales du cas n°21

Le chemin de sollicitation est constitué de deux phases :

**AB** augmentation de la contrainte totale  $\sigma_{11}$ , et diminution de la contrainte totale  $\sigma_{22}$  associé à pression interstitielle nulle pendant 8 semaines

**BC** augmentation des valeurs de  $\theta$  à pression interstitielle constante jusqu'à la rupture

**Phase 1** Le chemin AB en contraintes effectives prend la forme

$$\sigma' = \begin{bmatrix} 12 & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 0 \\ 0 & 0 & 12 \end{bmatrix} \xrightarrow[\text{Semaines}]{AB} \begin{bmatrix} 22 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 12 \end{bmatrix}$$

Les coefficients d'endommagement sur le chemin AB activés sont dans la direction 2 :

$$D = \begin{bmatrix} D_1 = 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 = 0 \end{bmatrix}$$

**Phase 2** Le chemin BC avec rotation des axes principaux de contrainte est défini par une vitesse de torsion correspondant à partir du 56 ème jour jusqu'au 175 ème jour un angle de torsion  $\theta$  de  $45^\circ$

$$\theta = 0.378 \times t - 21,17$$

$$\sigma_{12} = 10 \times \sin(2\theta)$$

$$\sigma_{11} = p_{moy0} + 10 \times \cos[2\theta] = \left(\frac{22+2}{2}\right) + 10 \times \cos(2\theta) = 12 + 10 \times \cos(2\theta)$$

$$\sigma_{22} = p_{moy0} - 10 \times \cos(2\theta) = \left(\frac{22+2}{2}\right) - 10 \times \cos(2\theta) = 12 - 10 \times \cos(2\theta)$$

Le chemin en contraintes s'exprime par

$$\sigma' = \begin{bmatrix} 12 & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 0 \\ 0 & 0 & 12 \end{bmatrix} \xrightarrow[\text{rotation } \theta]{BC} \begin{bmatrix} 12 + 10\cos(2\theta) & 10\sin(2\theta) & 0 \\ 10\sin(2\theta) & 12 - 10\cos(2\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 12 \end{bmatrix}$$

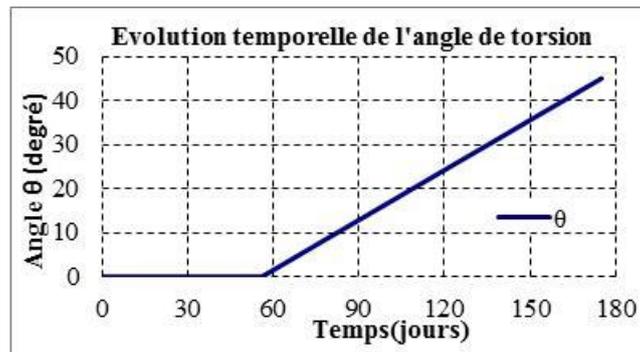


Figure III-20 : Evolution temporelle de l'angle de torsion

Les coefficients d'endommagement sur le chemin BC sont réactivés dans la direction 2 de diagenèse ( $\epsilon_{22} / \sigma_{2\text{initiale}}$ ) correspondante à la direction de la contrainte principale initiale  $\sigma_{2A}$

$$D = \begin{bmatrix} D_1 = 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 = 0 \end{bmatrix}$$

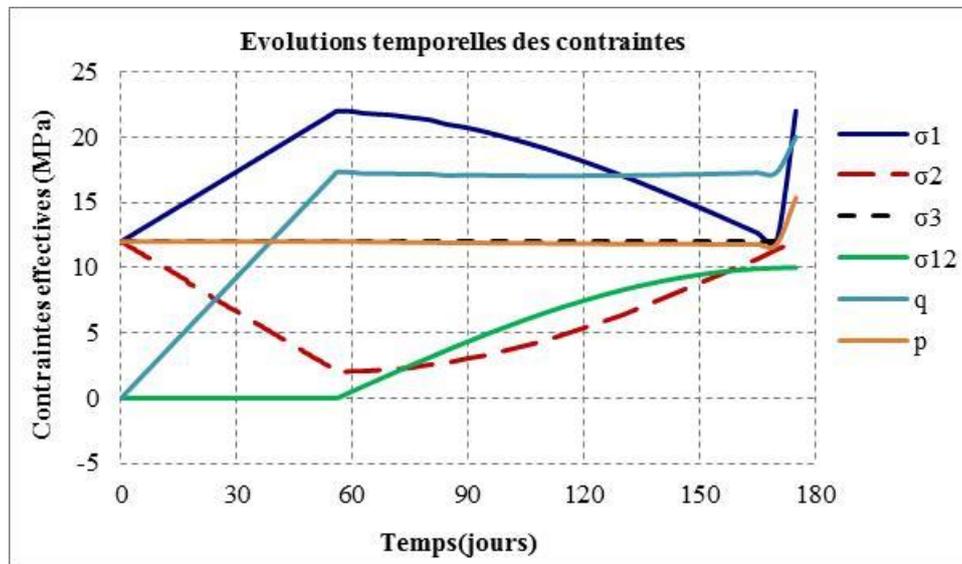


Figure III-21 : Chemin AB en contraintes effectives, déviateur et pression moyenne du test 21

### III.3.1.2 Résultats des simulations du test 21

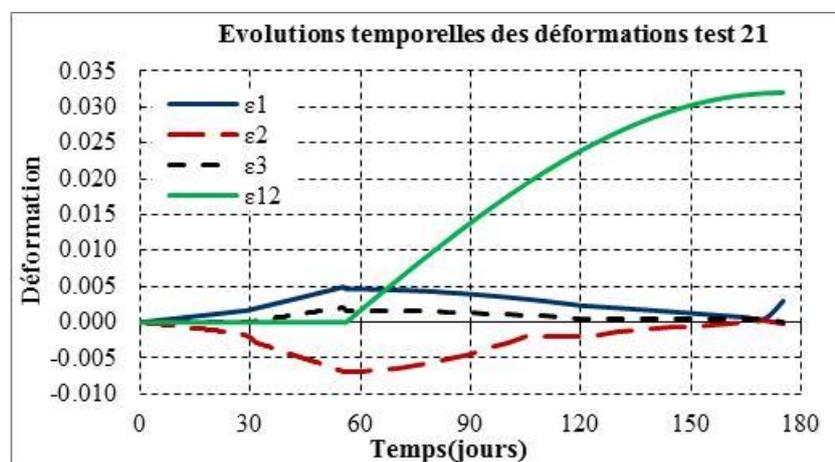


Figure III-22 : Evolutions temporelles des déformations du test n°21

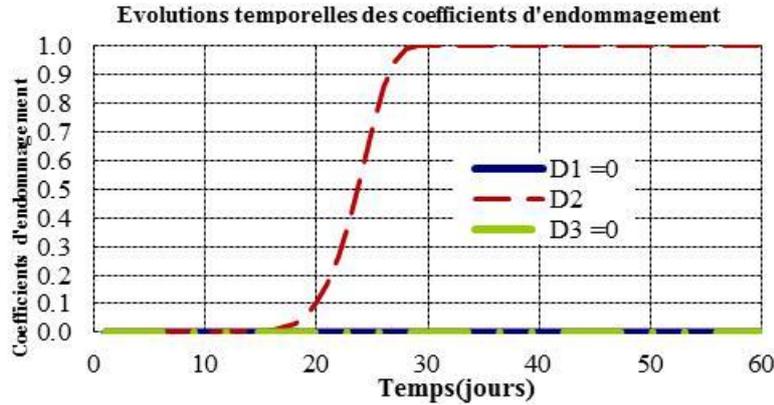


Figure III-23 : Evolutions temporelles des coefficients d'endommagement du test n°21

La décharge principale dans la direction de  $\sigma_2$  produit une augmentation du coefficient d'endommagement D2 pour atteindre l'unité à l'état de contrainte :

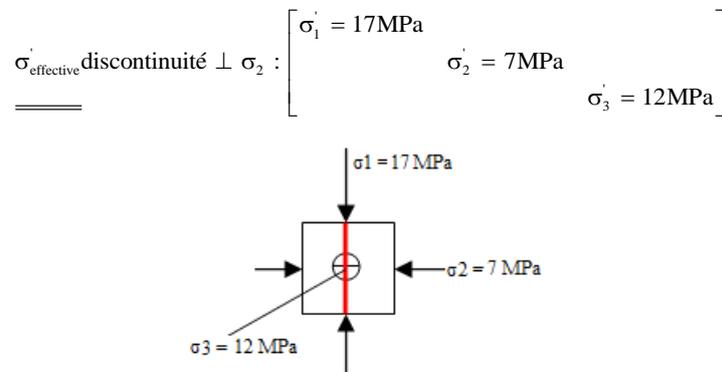


Figure III-24 : Plan de discontinuité cas test 21

### III.3.2 Cas test n°22 (état de contrainte initial anisotrope)

#### III.3.2.1 Chemin de sollicitation

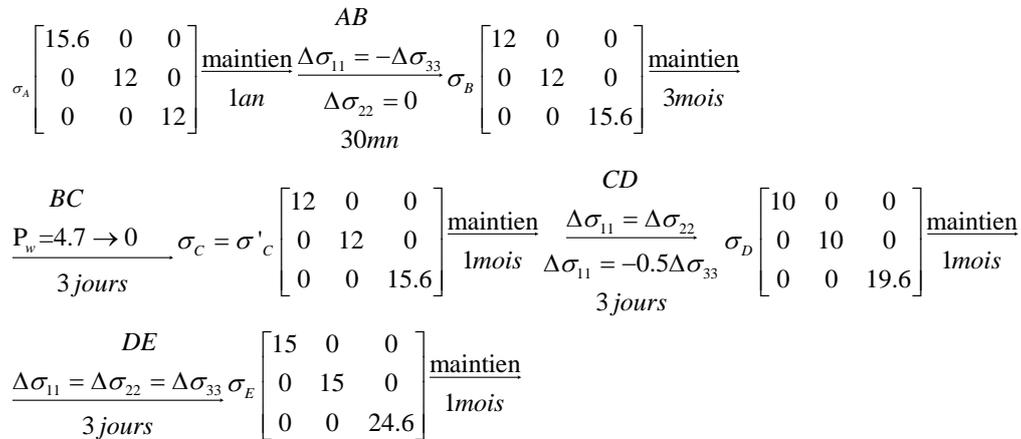


Figure III-25 : Chemin de sollicitation en contraintes totales du cas n°22

Le chemin de sollicitation est constitué de neuf phases :

**A** Maintien de l'état initial pendant 1 an

**AB** Permutation des contraintes  $\sigma_{11}$  et  $\sigma_{33}$  et maintien de  $\sigma_{22}$  associé à pression interstitielle constante de 4.7MPa pendant 30minutes

**B** Maintien de l'état de contrainte en B pendant 3mois

**BC** Diminution instantanée de la pression interstitielle de 4.7MPa à 0 pendant 3jours

**C** Maintien de l'état de contrainte en C pendant 1mois

**CD** Variation du déviateur de contrainte à pression moyenne constante pendant 3 jours

**D** Maintien de l'état de contrainte en D pendant 1mois

**DE** Variation de la contrainte moyenne à déviateur constant pendant 3 jours

**E** Maintien de l'état de contrainte en E pendant 3mois

**Phase 1** A Maintien de l'état de contrainte effectif anisotrope avec  $b=0.6$  pendant 1 an

**Phase 2** Permutation des contraintes principales pendant 30 minutes. Le chemin AB permettant la permutation des contraintes principales totales s'exprime sous la forme

$$\underline{\underline{\sigma}}_A = \begin{bmatrix} 15.6 & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 0 \\ 0 & 0 & 12 \end{bmatrix} \xrightarrow[30\text{min}]{AB} \begin{bmatrix} 12 & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 0 \\ 0 & 0 & 15.6 \end{bmatrix}$$

$$\underline{\underline{\sigma}}'_A = \begin{bmatrix} 12.78 & 0 & 0 \\ 0 & 9.18 & 0 \\ 0 & 0 & 9.18 \end{bmatrix} \xrightarrow[30\text{min}]{AB} \begin{bmatrix} \sigma'_{11} = 9.18 & 0 & 0 \\ & \sigma'_{22} = 9.18 & 0 \\ & & \sigma'_{33} = 12.78 \end{bmatrix}$$

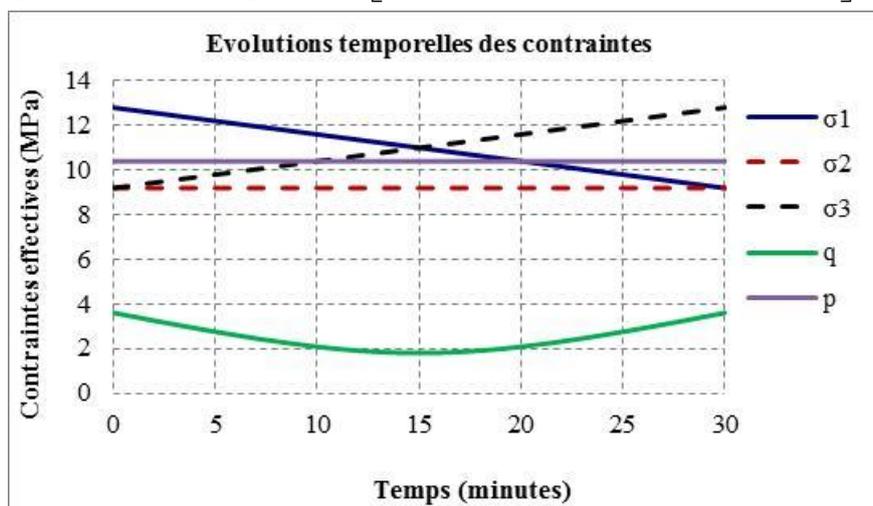


Figure III-26 : Chemin AB en contraintes effectives et pression moyenne du test 22

Les coefficients d'endommagement sur le chemin AB activés sont dans la direction 2 :

$$\underline{\underline{D}} = \begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 = 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 = 0 \end{bmatrix}$$

**Phase 3** Fluage sous état de contrainte B pendant 3 mois.

Les déformations de fluage s'expriment sous la forme

$$\varepsilon_{ij}^{vis} = 0.05 \times \frac{D_{ij}}{1 + \frac{D_{ij}}{0.5}} \times \frac{S_{ij}}{p_{moy}} \times \ln(1 + t)$$

S1(MPa)	S2(MPa)	S3(MPa)	Q(MPa)	Pmoy(MPa)	Q0(MPa)
-1.2	-1.2	4.3	3.6	10.38	3.6

Tableau III-5 : Valeurs utilisées par la simulation de la viscosité en B du test 22

**Phase 4** Chemin BC, diminution instantanée de la pression interstitielle (3jours)

$$\sigma'_B = \begin{bmatrix} 9.18 & 0 & 0 \\ 0 & 9.18 & 0 \\ 0 & 0 & 12.78 \end{bmatrix} \xrightarrow[3 \text{ jours}]{BC} \begin{bmatrix} \sigma'_{11} = 12 & 0 & 0 \\ & \sigma'_{22} = 12 & 0 \\ & & \sigma'_{33} = 15.6 \end{bmatrix}$$

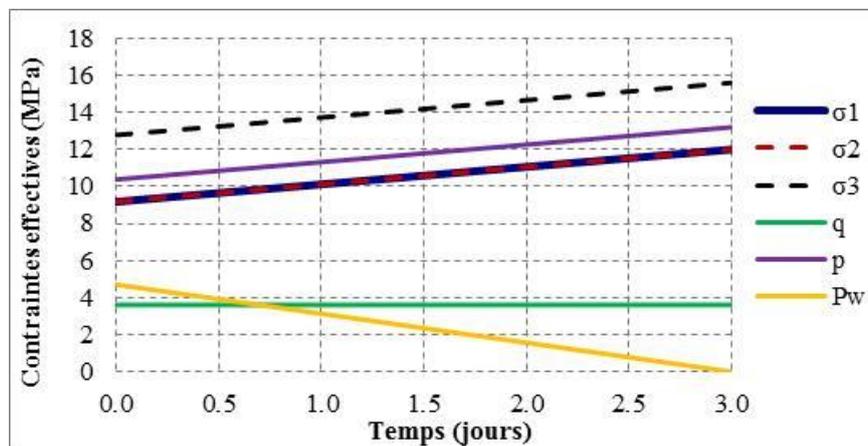


Figure III-27 : Chemin BC en contraintes effectives, pression moyenne, déviateur et pression d'eau du test 22

**Phase 5** Fluage sous état de contrainte constante pendant 1 mois

Les déformations de fluage s'expriment sous la forme

$$\varepsilon_{ij}^{vis} = 0.05 \times \frac{D_{ij}}{1 + \frac{D_{ij}}{0.5}} \times \frac{S_{ij}}{p_{moy}} \times \ln(1 + t)$$

S1(MPa)	S2(MPa)	S3(MPa)	Q(MPa)	Pmoy(MPa)	Q0(MPa)
-1.2	-1.2	2.4	3.6	13.2	3.6

Tableau III-6 : Valeurs utilisées par la simulation de la viscosité en C du test 22

**Phase 6** Chemin CD diminution de  $\sigma_{11}$  et  $\sigma_{22}$  et augmentation de  $\sigma_{33}$  pendant 3 jours

$$\sigma'_C = \begin{bmatrix} 12 & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 0 \\ 0 & 0 & 15.6 \end{bmatrix} \xrightarrow[3 \text{ jours}]{CD} \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 19.6 \end{bmatrix}$$

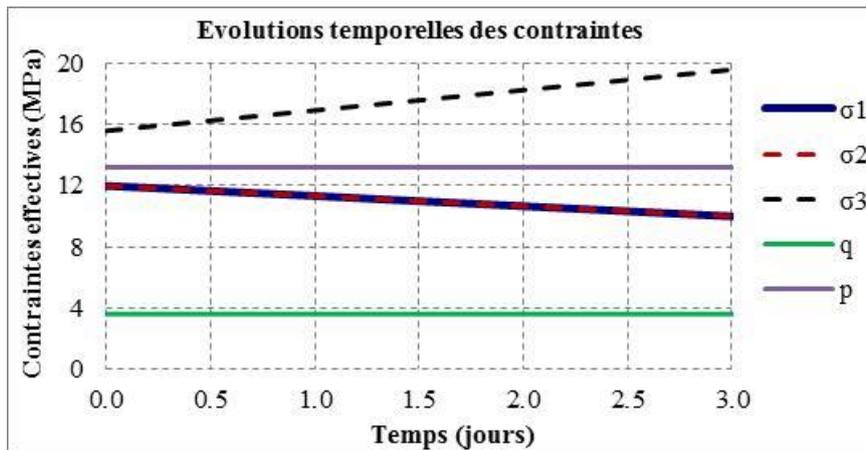


Figure III-28 : Chemin CD en contraintes effectives et pression moyenne du test 22

Les coefficients d'endommagement sur le chemin CD sont activés dans les directions principales 1 et 2:

$$D = \begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 = 0 \end{bmatrix}$$

**Phase 7** Fluage sous état de contrainte constante pendant 1 mois

Les déformations de fluage s'expriment sous la forme

$$\epsilon_{ij}^{vis} = 0.05 \times \frac{D_{ij}}{1 + \frac{D_{ij}}{0.5}} \times \frac{S_{ij}}{P_{moy}} \times \ln(1 + t)$$

S1(MPa)	S2(MPa)	S3(MPa)	Q(MPa)	Pmoy(MPa)	Q0(MPa)
-3.2	-3.2	6.4	9.6	13.2	3.6

Tableau III-7 : Valeurs utilisées par la simulation de la viscosité en D du test 22

**Phase 8** Chemin DE Variation de la pression moyenne à déviateur constant pendant 3 jours

Le chemin DE en contrainte effective s'exprime sous la forme

$$\sigma'_D = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 19.6 \end{bmatrix} \xrightarrow[3 \text{ jours}]{CD} \begin{bmatrix} 15 & 0 & 0 \\ 0 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & 24.6 \end{bmatrix}$$

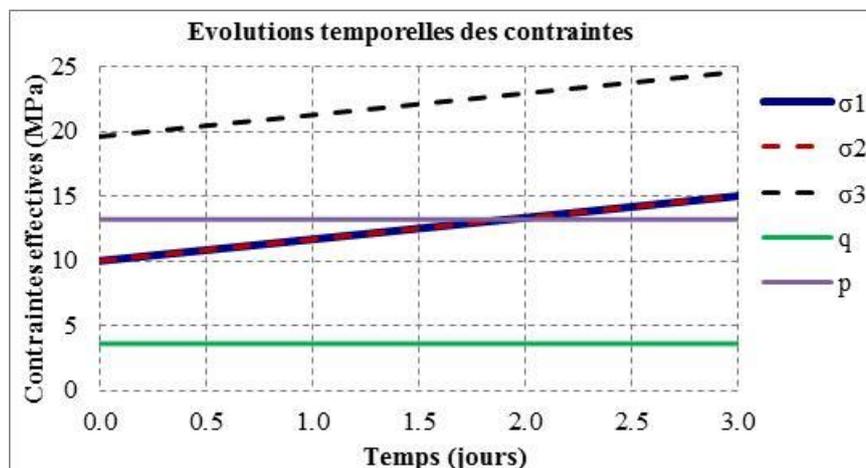


Figure III-29 : Chemin DE en contraintes effectives et pression moyenne du test 22

**Phase 9** Fluage sous état de contrainte constante pendant 3mois

Les déformations de fluage s'expriment sous la forme

$$\varepsilon_{ij}^{vis} = 0.035 \times \frac{D_{ij}}{1 + \frac{D_{ij}}{0.5}} \times \frac{s_{ij}}{p_{moy}} \times \ln(1 + t)$$

S1(MPa)	S2(MPa)	S3(MPa)	Q(MPa)	Pmoy(MPa)	Q0(MPa)
-3.2	-3.2	6.4	9.6	18.2	3.6

Tableau III-8 : Valeurs utilisées par la simulation de la viscosité en E du test 22

**III.3.2.2 Résultats des simulations du test 22**

Les résultats des simulations du test 22 sont présentés dans Figure III-30, Figure III-31, Figure III-32

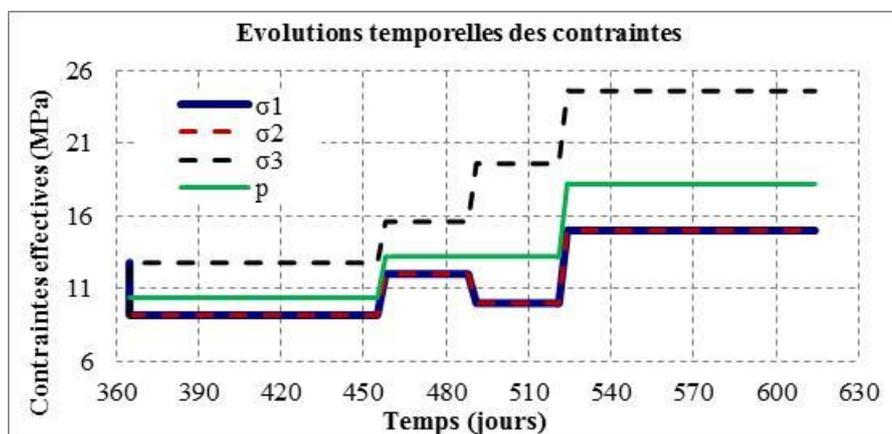


Figure III-30 : Chemin AB-B-BC-C-CD-D-DE-E en contraintes effectives et pression moyenne du test 22

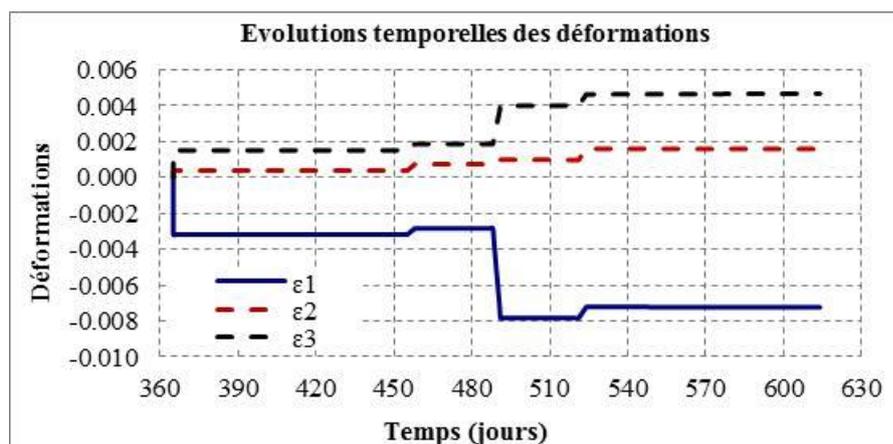


Figure III-31 : Evolutions temporelles des déformations du test n°22

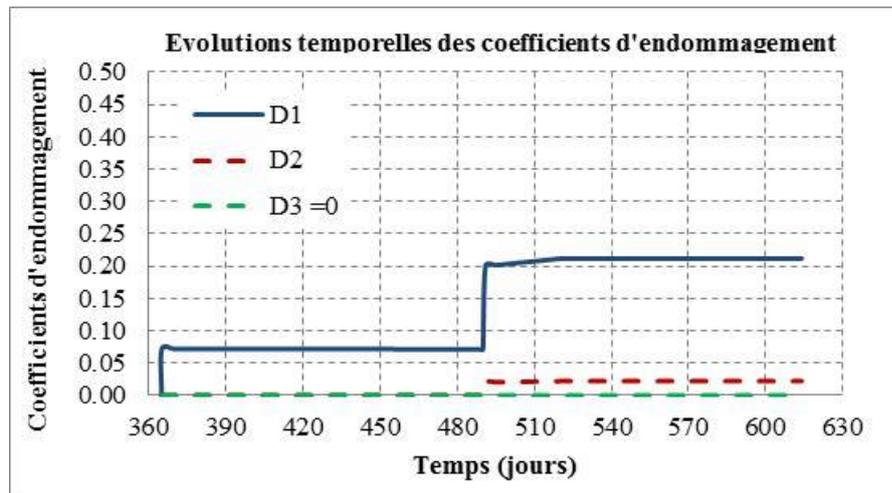
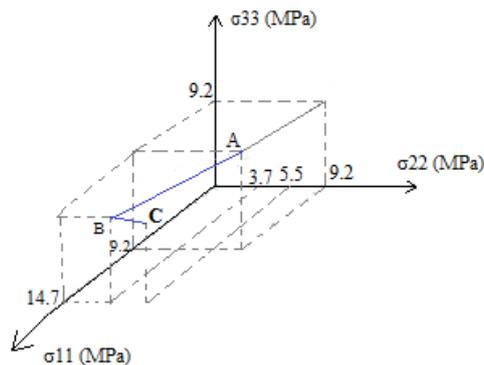


Figure III-32 : Evolutions temporelles des coefficients d'endommagement du test n°22

### III.4 SIMULATION DES CHEMINS EN CONTRAINTES EFFECTIVES AVEC COUPLAGE HM (TACHE 3)

#### III.4.1 Cas tests n°31 (état de contrainte initial isotrope)

##### III.4.1.1 Chemin de sollicitation



$$\sigma'_A \begin{bmatrix} 9.2 & 0 & 0 \\ 0 & 9.2 & 0 \\ 0 & 0 & 9.2 \end{bmatrix} \xrightarrow[1 \text{ jour}]{\begin{matrix} \Delta\sigma'_{11} = -\Delta\sigma'_{22} \\ \Delta\sigma'_{33} = 0 \end{matrix}} \sigma'_B \begin{bmatrix} 14.7 & 0 & 0 \\ 0 & 3.7 & 0 \\ 0 & 0 & 9.2 \end{bmatrix} \xrightarrow[6 \text{ mois}]{\begin{matrix} \Delta\sigma'_{33} = 0 \end{matrix}} \sigma'_C \begin{bmatrix} 14.9 & 0 & 0 \\ 0 & 5.5 & 0 \\ 0 & 0 & 9.2 \end{bmatrix}$$

Figure III-33 : Chemin de sollicitation en contraintes totales du cas n°31

Le chemin de sollicitation est constitué de deux phases :

**Phase I** Décharge de  $\sigma_2$  et chargement suivant  $\sigma_1$  telle que  $p_{moy}' = 9.2 \text{ MPa}$  pendant 1 jour

$$\sigma' = \begin{bmatrix} 9.2 & 0 & 0 \\ 0 & 9.2 & 0 \\ 0 & 0 & 9.2 \end{bmatrix} \xrightarrow[1 \text{ jour}]{\begin{matrix} AB \\ \Delta\sigma'_{11} = -\Delta\sigma'_{22} \\ \Delta\sigma'_{33} = 0 \end{matrix}} \begin{bmatrix} 14.7 & 0 & 0 \\ 0 & 3.7 & 0 \\ 0 & 0 & 9.2 \end{bmatrix}$$

Les coefficients d'endommagement sur le chemin AB activés sont dans la direction 2 :

$$\underline{\underline{D}} = \begin{bmatrix} D_1 = 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 = 0 \end{bmatrix}$$

**Phase 2** Chargement dans la direction 2 et 1 pendant 6 mois

Le chemin BC en contrainte effective s'exprime sous la forme

$$\sigma' = \begin{bmatrix} 14.7 & 0 & 0 \\ 0 & 3.7 & 0 \\ 0 & 0 & 9.2 \end{bmatrix} \xrightarrow[6\text{mois}]{BC} \begin{bmatrix} 14.9 & 0 & 0 \\ 0 & 5.5 & 0 \\ 0 & 0 & 9.2 \end{bmatrix}$$

$\Delta\sigma'_{33} = 0$

Les déformations visqueuses sur le chemin BC évoluent au cours du chargement et s'expriment sous la forme:

$$\varepsilon_{ij}^{vis} = 0.05 \times \frac{D_{ij}}{1 + \frac{D_{ij}}{0.5}} \times \frac{s_{ij}}{p_{moy}} \times \text{Ln}(1 + t)$$

S1(MPa)	S2(MPa)	S3(MPa)	Q(MPa)	Pmoy(MPa)	Q0(MPa)
5,5	-5,5	0	7,7	9,2	0

Tableau III-9 : Valeurs utilisées par la simulation de la viscosité du test 31

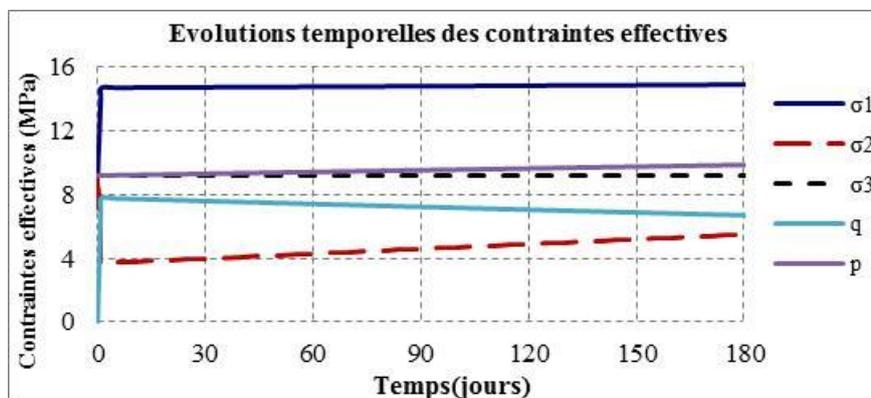


Figure III-34 : Chemin AB-BC en contraintes effectives, déviateur et pression moyenne du test 31

**III.4.1.2 Résultats des simulations du test 31**

Les simulations correspondant au test 31 sont présentées sur Figure III-35, Figure III-36, Figure III-37. La décharge dans la direction de  $\sigma_2$  produit sur le chemin AB et BC une augmentation du coefficient d'endommagement  $D_2$  qui n'atteint pas la valeur unité ( $D_2 = 0,18$ ). Il n'y a donc pas création d'une discontinuité.

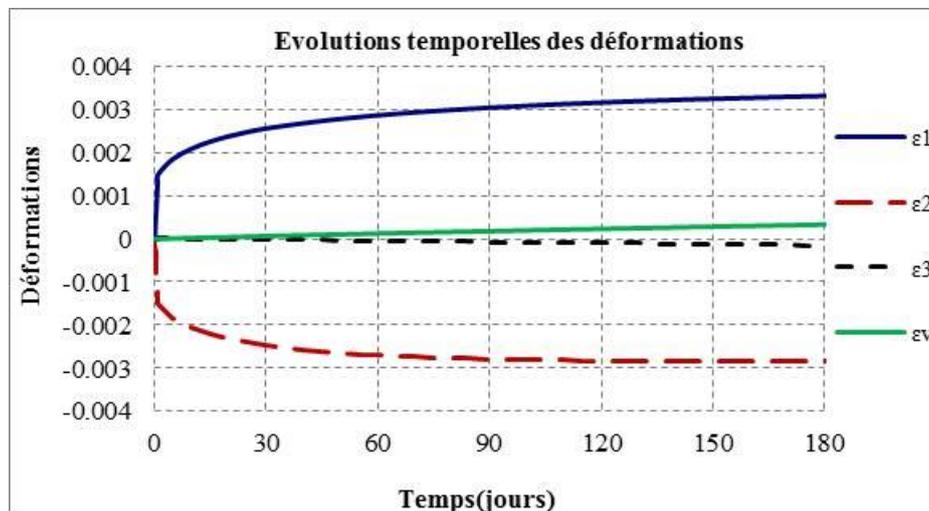


Figure III-35 : Evolutions temporelles des déformations du test n°31

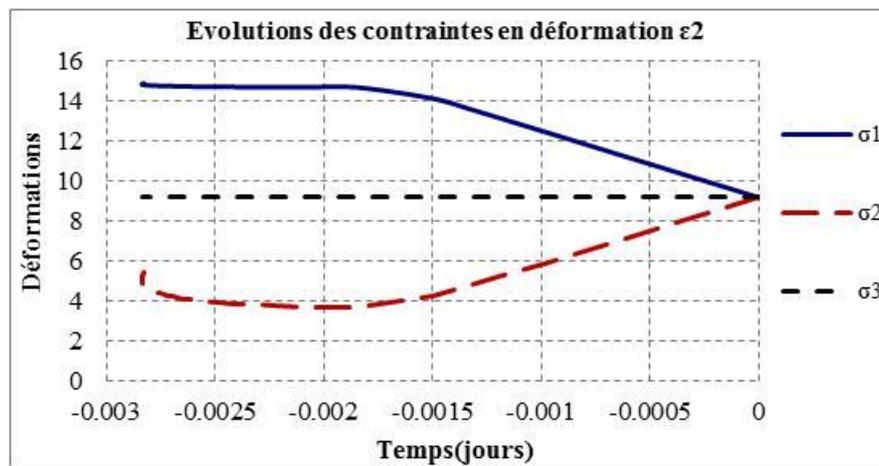
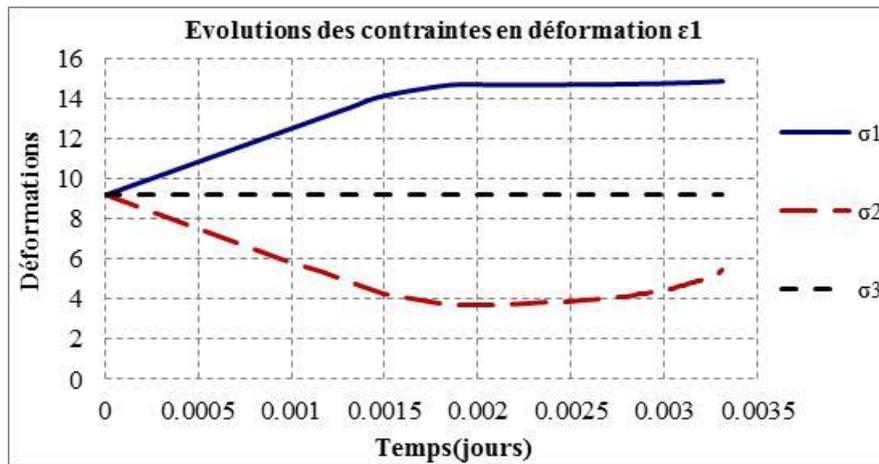


Figure III-36 : Evolution des contraintes en fonction de déformations du test n°31

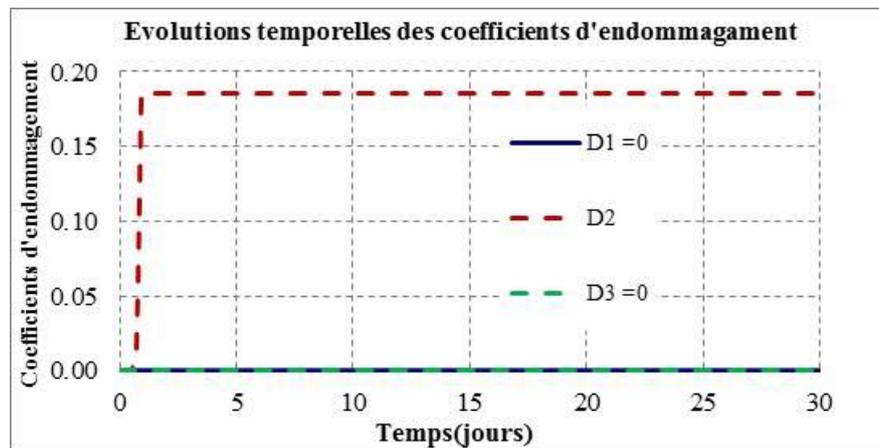
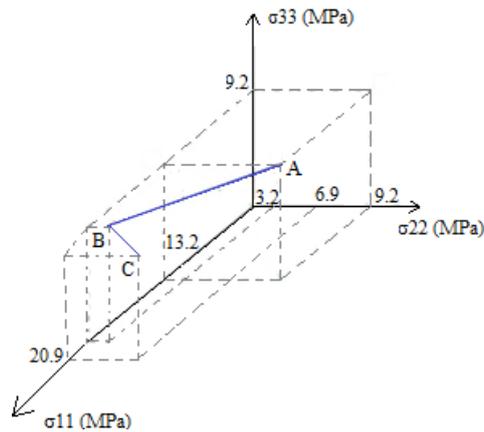


Figure III-37 : Evolutions temporelles des coefficients d'endommagement du test n°31

### III.4.2 Cas tests n°32 (état de contrainte initial anisotrope)

#### III.4.2.1 Chemin de sollicitation

Figure III-38 présente le chemin de sollicitation en contraintes effectives constitué de deux phases de 1 jour et 6 mois



$$\sigma'_{A} \begin{bmatrix} 13.2 & 0 & 0 \\ 0 & 9.2 & 0 \\ 0 & 0 & 9.2 \end{bmatrix} \xrightarrow[1 \text{ jour}]{\begin{matrix} \Delta\sigma'_{11} = -\Delta\sigma'_{22} \\ \Delta\sigma'_{33} = 0 \end{matrix}} \sigma'_{B} \begin{bmatrix} 19.2 & 0 & 0 \\ 0 & 3.2 & 0 \\ 0 & 0 & 9.2 \end{bmatrix} \xrightarrow[6 \text{ mois}]{\begin{matrix} \Delta\sigma'_{33} = 0 \end{matrix}} \sigma'_{C} \begin{bmatrix} 20.9 & 0 & 0 \\ 0 & 6.9 & 0 \\ 0 & 0 & 9.2 \end{bmatrix}$$

Figure III-38 : Chemin de sollicitation en contraintes totales du cas n°32

**Phase 1** Décharge de  $\sigma_2$  et chargement suivant  $\sigma_1$  telle que  $p_{moy} = 9.2 \text{ MPa}$  pendant 1 jour.

Le chemin AB en contraintes effectives prend la forme

$$\sigma' = \begin{bmatrix} 13.2 & 0 & 0 \\ 0 & 9.2 & 0 \\ 0 & 0 & 9.2 \end{bmatrix} \xrightarrow[1 \text{ jour}]{\begin{matrix} AB \\ \Delta\sigma'_{11} = -\Delta\sigma'_{22} \\ \Delta\sigma'_{33} = 0 \end{matrix}} \begin{bmatrix} 19.2 & 0 & 0 \\ 0 & 3.2 & 0 \\ 0 & 0 & 9.2 \end{bmatrix}$$

La décharge dans la direction 2 produit des déformations d'extension et la création d'un endommagement

$$D = \begin{bmatrix} D_1 = 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 = 0 \end{bmatrix}$$

**Phase 2** Chargement dans la direction 2 et 1 pendant 6 mois

Le chemin BC en contrainte effective s'exprime sous la forme

$$\sigma' = \begin{bmatrix} 16.2 & 0 & 0 \\ 0 & 6.2 & 0 \\ 0 & 0 & 9.2 \end{bmatrix} \xrightarrow[6 \text{ mois}]{\begin{matrix} BC \\ \Delta\sigma'_{33} = 0 \end{matrix}} \begin{bmatrix} 20.9 & 0 & 0 \\ 0 & 6.9 & 0 \\ 0 & 0 & 9.2 \end{bmatrix}$$

Les déformations visqueuses sur le chemin BC évoluent au cours du chargement et s'expriment sous la forme:

$$\varepsilon_{ij}^{vis} = 0.05 \times \frac{D_{ij}}{1 + \frac{D_{ij}}{0.5}} \times \frac{S_{ij}}{p_{moy}} \times \text{Ln}(1 + t)$$

S1(MPa)	S2(MPa)	S3(MPa)	Q(MPa)	Pmoy(MPa)	Q0(MPa)
8,66	-7,33	-1,33	11,4	10,5	4

Tableau III-10 : Valeurs utilisées par la simulation de la viscosité en B du test 32

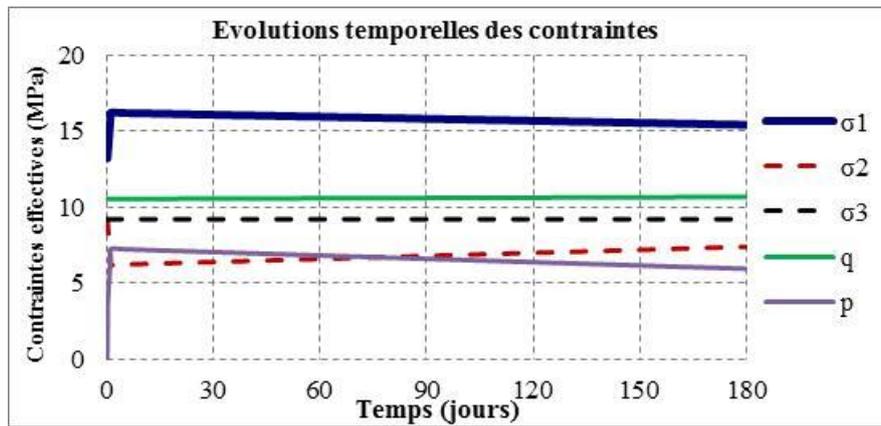


Figure III-39 : Chemin AB-BC en contraintes effectives, déviateur et pression moyenne du test 32

### III.4.2.2 Les résultats des simulations du test 32

Les simulations correspondant au test 32 sont présentées sur Figure III-40, Figure III-41, Figure III-42.

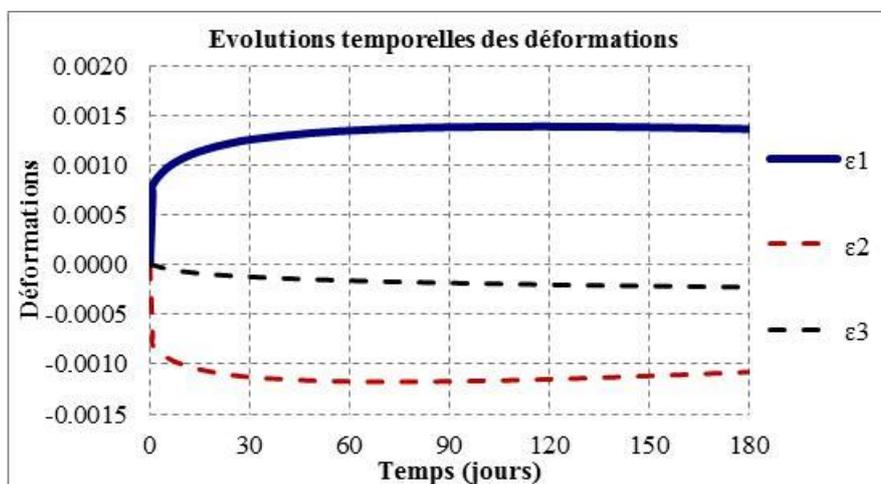
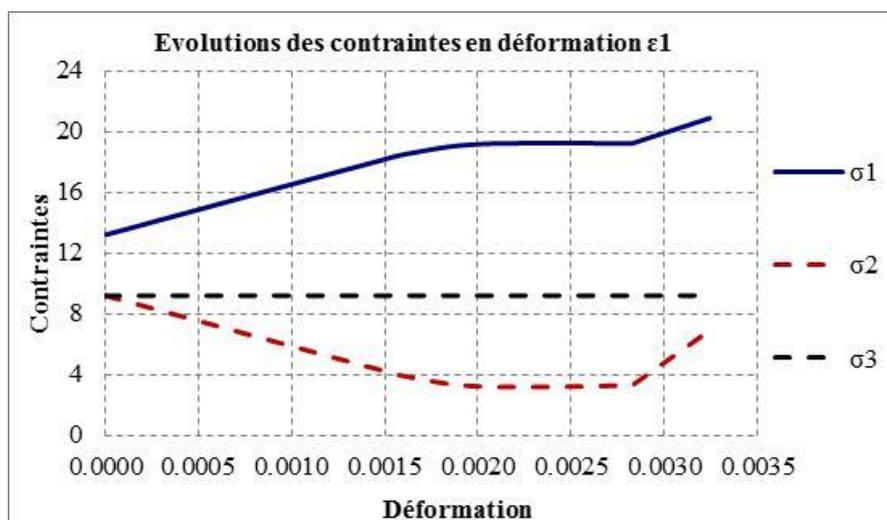


Figure III-40 : Evolutions temporelles des déformations du test n°32



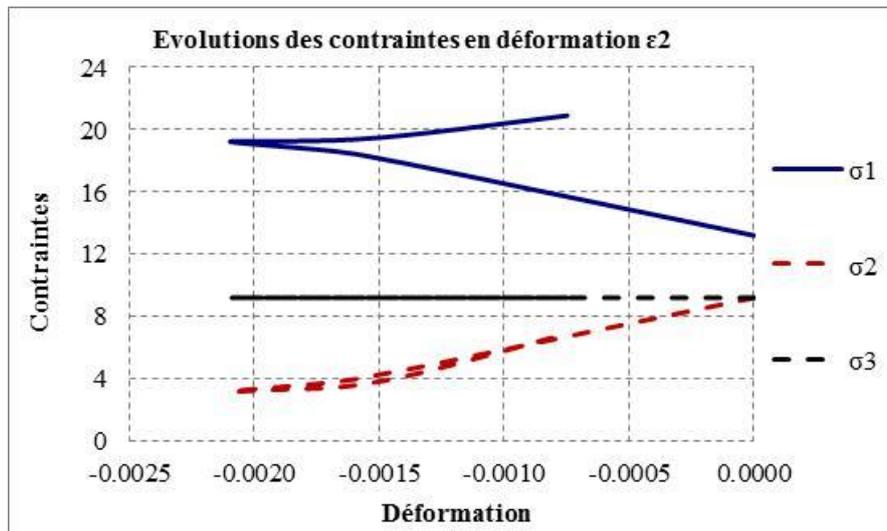


Figure III-41 : Evolution des contraintes en fonction de déformations du test n°32

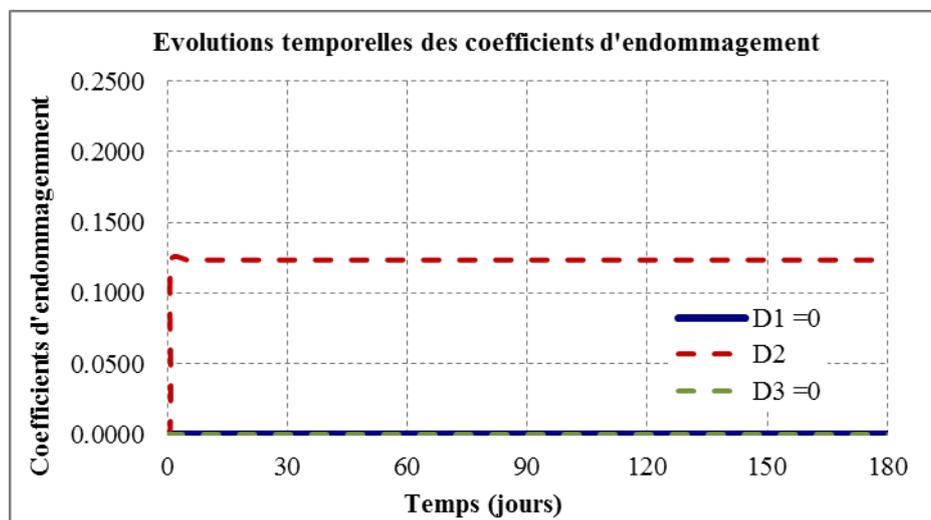


Figure III-42 : Evolutions temporelles des coefficients d'endommagement du test n°32

### III.5 CONCLUSION

Le modèle SC2D avec les deux mécanismes élasto-plastique de diagenèse et prélèvement est associé aux effets différés avec la vitesse de déformation, il a permis de simuler sans difficultés tous les chemins de sollicitation proposés dans le Benchmark de l' ANDRA et ses groupes de laboratoires.

Une comparaison avec des essais en laboratoire jour est en cour de réalisation.

On peut maintenant appliquer le modèle SC2D pour observer les zones endommagées fracturées autour des ouvrages excavés et les effets différés autour des ouvrages après l'excavation

## CHAPITRE IV. APPLICATION DU MODELE SC2D A LA CREATION DES ZONES ENDOMMAGEES FRACTUREES AUTOUR DES OUVRAGES EXCAVES

*Les observations dans le laboratoire Meuse Haute Marne montrent des zones fracturées anisotropes autour des galeries et des alvéoles HA constituées de discontinuités verticales et horizontales. Les faibles anisotropies des modules d'élasticité initiaux et des contraintes pour des galeries orientées suivant  $\sigma_H$  ( $\sigma_v \cong \sigma_h$ ) ne permettent pas de reproduire la forte anisotropie des zones fracturées dans le plan  $\sigma_v - \sigma_h$  par un modèle hypo-élastique avec anisotropie initiale de diagenèse. Pour modéliser ces discontinuités un modèle rhéologique a été développé par EGC nommé SC2D.*

*Les coefficients d'endommagement sont évalués à partir d'une extension de la relation de Mazars en considérant les déformations d'extension dans les directions des contraintes principales*

$$\begin{aligned} \varepsilon_i \geq 0 &\rightarrow D_i = 0 \\ \varepsilon_i < 0 &\rightarrow D_i = 1 - \exp\left[-\frac{1}{10} \cdot \left(\frac{\varepsilon_i^-}{\varepsilon_{i\text{lim}}^-}\right)^{10}\right] \end{aligned}$$

*Les zones fracturées autour des galeries sont caractérisées par les domaines où les coefficients d'endommagement sont unitaires. Par ailleurs, les discontinuités sont activées lorsqu'un coefficient d'endommagement atteint l'unité ; ces discontinuités sont perpendiculaires aux directions des contraintes principales en extension et correspondent au plan de distorsion maximale en cisaillement.*

## IV.1 POSITION DU PROBLEME

L'objet principal de cette partie amont est d'évaluer la capacité du modèle SC2D implémenté dans CLEO à décrire ces zones endommagées fracturées.

Deux cas de test sont proposés :

- Excavation d'un tunnel circulaire de rayon 2.6m orienté selon la contrainte horizontale mineure (direction petit h) ; on la note test1.
- Excavation d'un tunnel circulaire de rayon 2.6m orienté selon la contrainte horizontale majeure (direction grand H) ; on la note test2.

L'excavation est réalisée dans 25 jours en 15 phases avec la diminution des contraintes, des pressions d'eau cf. Figure IV-1.

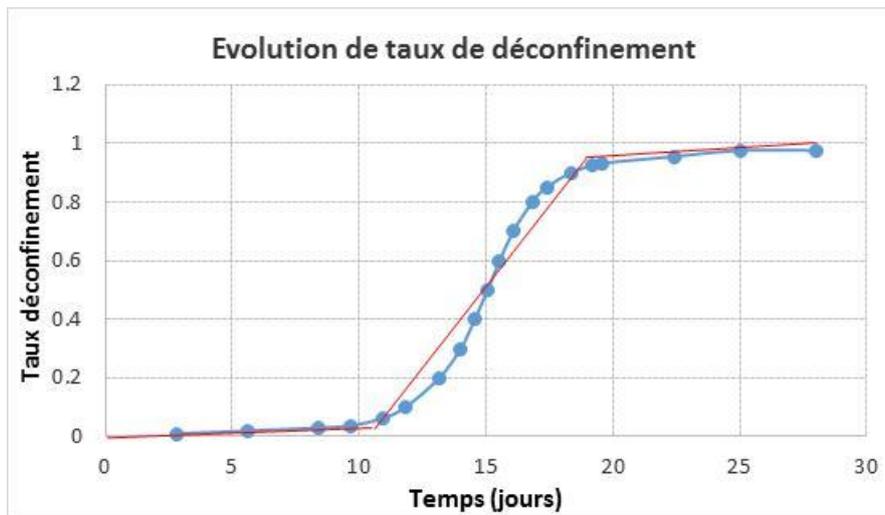
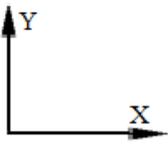
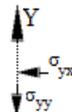
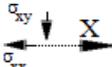
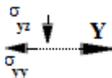


Figure IV-1 : Taux de dé-confinement pendant l'excavation(ANDRA,2013)

## IV.2 MODELE SC2D POUR L'ARGILITE NON PERTURBEE ET LES PARAMETRES UTILISES

Les calculs ont été réalisés en déformation plane suivant deux plans cf. Tableau IV-1

Plan d'étude	Contraintes	Déplacements	Déformations	Coef. endommagement
 Petit h	Suivant Y	Suivant Y	Suivant Y	Suivant Y
		v	$\epsilon_{yy}$	$D_{yy}$
	Suivant X	Suivant X	Suivant X	Suivant X
		u	$\epsilon_{xx}$	$D_{xx}$
	Suivant Y	Suivant Y	Suivant Y	Suivant Y
		u	$\epsilon_{yy}$	$D_{yy}$

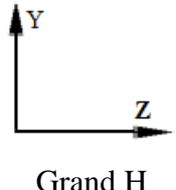
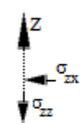
	Suivant Z	Suivant Z	Suivant Z	Suivant Z
		w	$\epsilon_{zz}$	$D_{zz}$

Tableau IV-1 : La modélisation des excavations des galeries en déformation plane suivant deux plans

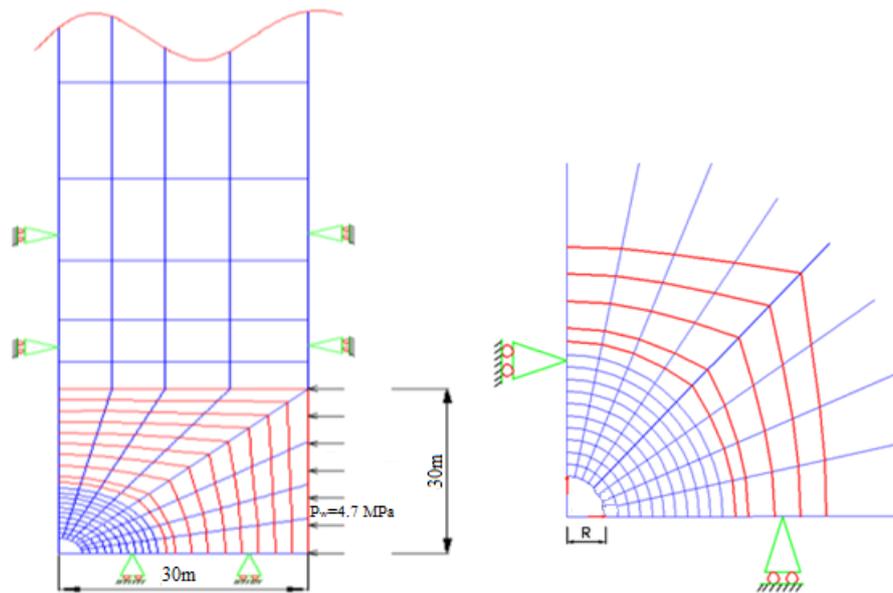


Figure IV-2 : Maillage utilisé pour les simulations des zones endommagées fracturées autour des galeries

Les contraintes totales pour cette profondeur sont consignées dans Tableau IV-2

Profondeur (m)	Contrainte horizontale majeure $\sigma_H$ (MPa)	Contrainte horizontale mineure $\sigma_h$ (MPa)	Contrainte verticale $\sigma_v$ (MPa)
517	16.12	12.4	12.7

Tableau IV-2 : Etat de contrainte à la profondeur 517m

Les déformations limites correspondantes aux directions d'anisotropie sont présentées dans Tableau IV-3

Direction de la stratification	Coefficient de gonflement (1/MPa)	Contrainte effective $\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - 0.6 \times 4.7$ (MPa)	Déformation limite $\epsilon_{i\text{lim}}^- = -k_i \cdot \Delta\sigma_i$
X ( $\sigma_H$ )	0.00014	13,3	-0.0019
Z ( $\sigma_h$ )	0.00014	9,58	-0.00014
Y ( $\sigma_v$ )	0.00007	9,88	-0.0007

Tableau IV-3 : Valeurs des déformations limites pour l'état de contrainte

Les paramètres utilisés dans le modèle sont dans Tableau IV-4

<i>Caractéristiques hydrodynamiques et hydromécaniques de l'argilite non perturbée</i>	<i>Relations utilisées dans le code CLEO</i>
Courbe de rétention $S_{rw} = S_{res} \frac{S_{max} - S_{res}}{\left(1 + \left(\frac{p_{capi}}{p_r}\right)^n\right)^m}$	$S_{rw} = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{p_{capi}}{16}\right)^{1,61}\right)^{0,378}}$
Perméabilité intrinsèque (m <sup>2</sup> )	2.75 x 10 <sup>-20</sup>
Distribution des contraintes	$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^c + p_w^{equ} \cdot \delta_{ij}$ $p_w^{equ} = -b \cdot p_w$ pour $p_w > 0$
Coefficient de Biot	$b = 0,6$
Coefficient convection de l'argilite	1.2 W/mK
Porosité du milieu de l'argilite	0.173
Coefficient dilatation de l'argilite	1d-5
Masse volumique de l'argilite	2.43 g/cm <sup>3</sup>
Coeff d'élasticité $E_0$ (MPa)	$E_0 = 4000MPa$
Coeff hypo-élasticité $E_p$ (MPa)	$E_p = 50 \times p_{moy}'$
Coeff de Poisson	$\nu = 0.2$
Surface de charge	$\tilde{F}_D = (p', q, \theta) = q^2 - 0.5L^2(p' + \tilde{p}'_{cohe})^2 a \left(1 - \frac{p'}{\tilde{p}'_{cf}}\right) = 0$ $\tilde{F}_p(p', q, \theta) = q^2 - L^2 \times (p' + \tilde{p}'_{cohe})^2 a \times \left(1 - \frac{p'}{\tilde{p}'_{cf}}\right) = 0$ $\tilde{G}_r(p', q, \theta) = q^2 - (p')^2 \times \left[\left(\frac{p_g}{p'}\right)^{1/2r} - 1\right]^{2r} = 0$
Incrément d'endommagement	$\varepsilon_i \geq 0 \rightarrow D_i = 0$ $\varepsilon_i < 0 \rightarrow D_i = 1 - \exp\left[-\frac{1}{10} \cdot \left(\frac{\varepsilon_i^-}{\varepsilon_{lim}^-}\right)^{10}\right]$

Tableau IV-4 : Paramètres utilisés pour les simulations des excavations des galeries dans l'argilite non perturbée à la profondeur 517 m

### IV.3 SIMULATION DE L'EXCAVATION D'UNE GALERIE ORIENTEE SUIVANT LA CONTRAINTE HORIZONTALE MINEURE PETIT H (TEST1)

#### IV.3.1 Les conditions limites du problème et le maillage utilisé

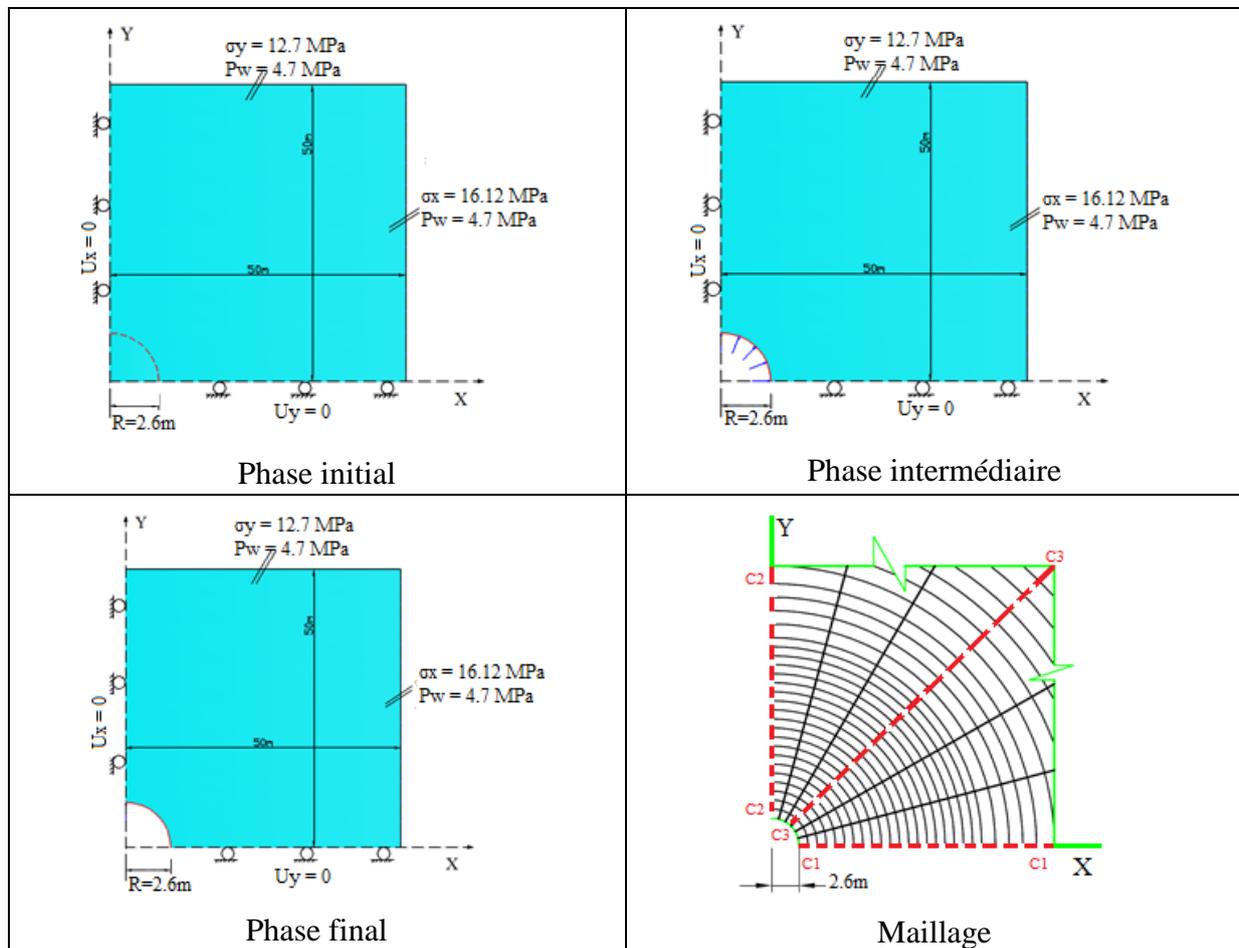


Figure IV-3 : Conditions aux limites et maillage utilisé

#### IV.3.2 Evolution des valeurs suivant l'axe X (coupe C1-C1)

##### IV.3.2.1 Contraintes

Figure IV-4 → Figure IV-11 présentent les évolutions des contraintes totales, contraintes effectives et pressions interstitielles suivant la coupe C1-C1.

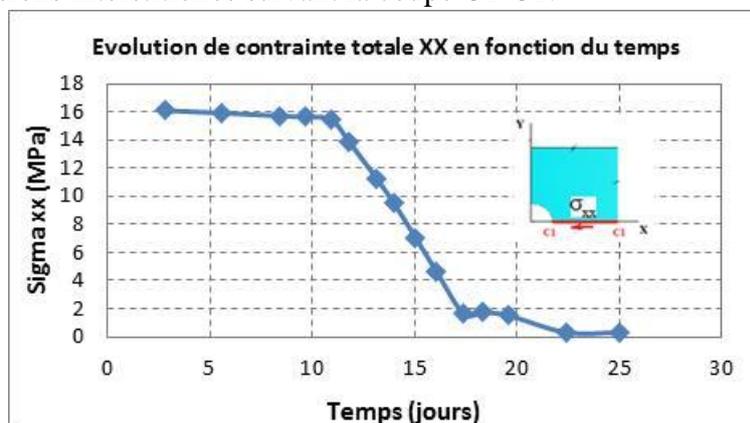


Figure IV-4 : Evolution de contrainte totale  $\sigma_{xx}$  en paroi de galerie orientée petit h au cours de l'excavation

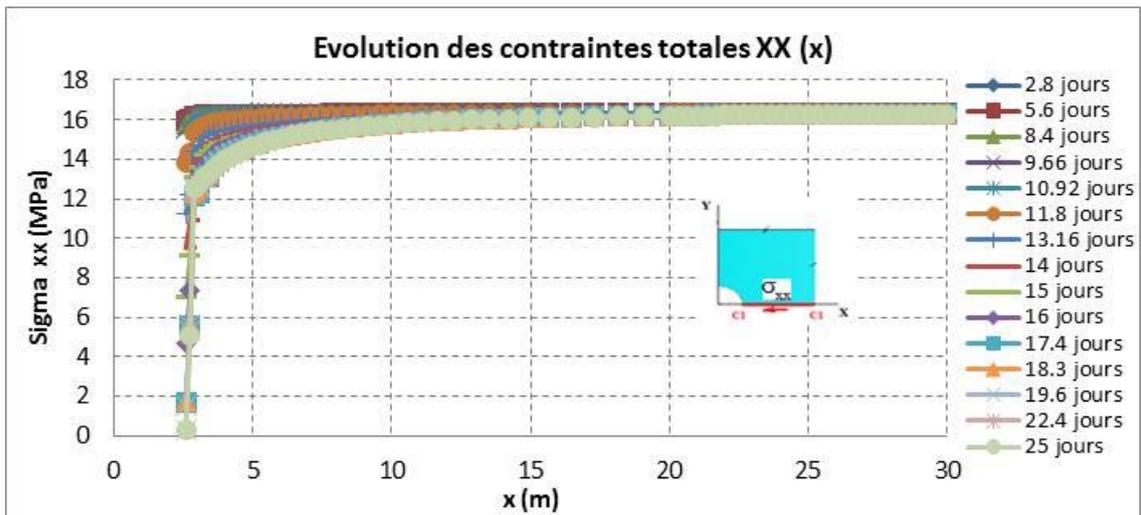


Figure IV-5 : Evolution des contraintes totales  $\sigma_{xx}$  suivant l'axe X (coupe C1) au cours de l'excavation du test 1

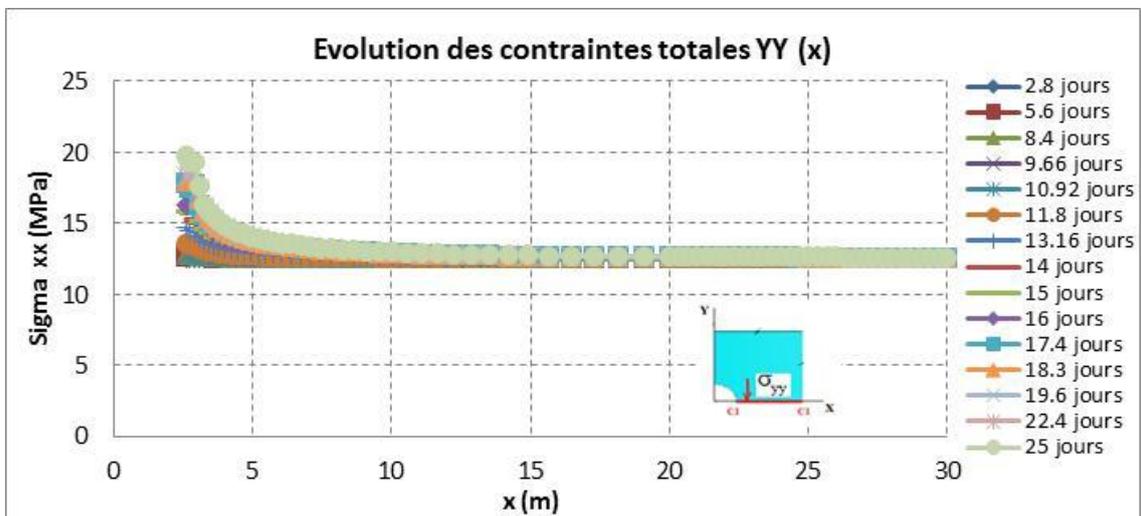


Figure IV-6 : Evolution des contraintes totales  $\sigma_{yy}$  suivant l'axe X (coupe C1) au cours de l'excavation du test 1

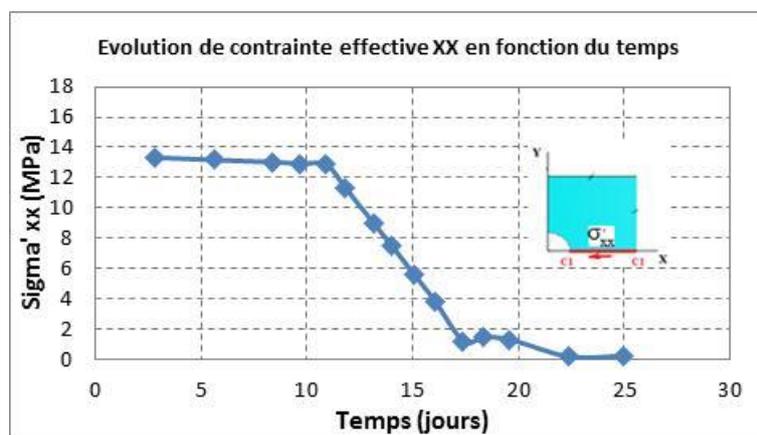


Figure IV-7 : Evolution de contrainte effective  $\sigma'_{xx}$  en paroi de galerie orientée petit h au cours de l'excavation

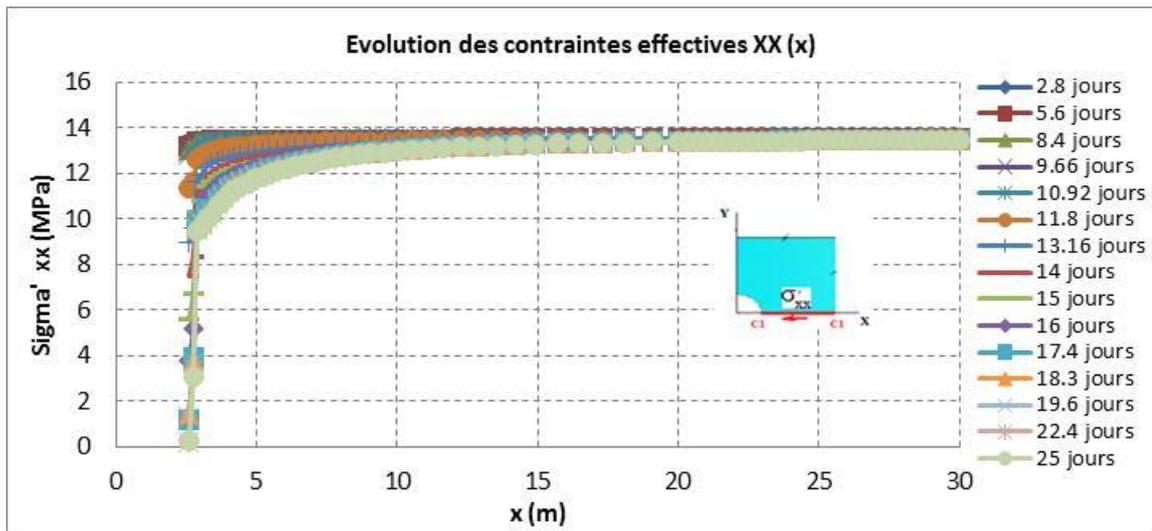


Figure IV-8 : Evolution des contraintes effectives  $\sigma'_{xx}$  suivant l'axe X (coupe C1) au cours de l'excavation du test I

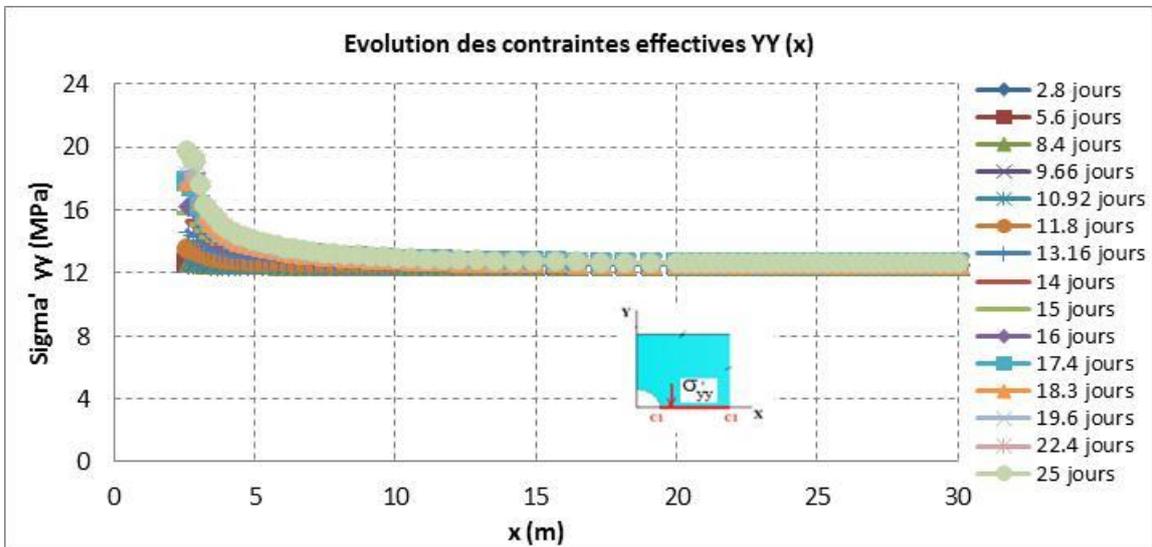


Figure IV-9 : Evolution des contraintes effectives  $\sigma'_{yy}$  suivant l'axe X (coupe C1) au cours de l'excavation du test I

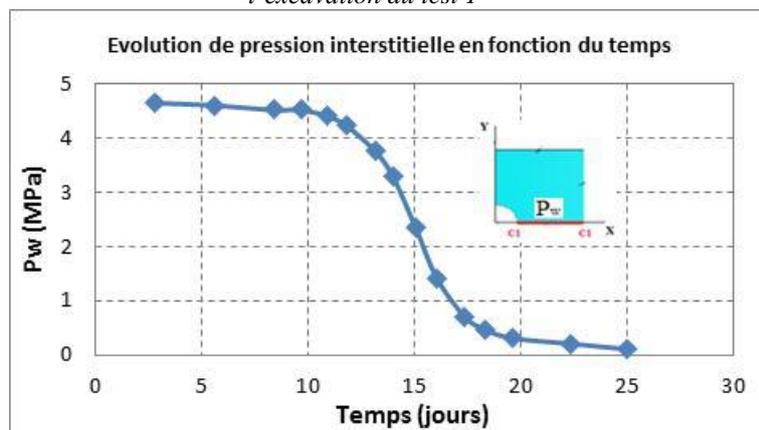


Figure IV-10 : Evolution de pression interstitielle  $P_w$  en paroi de galerie orientée petit h au cours de l'excavation

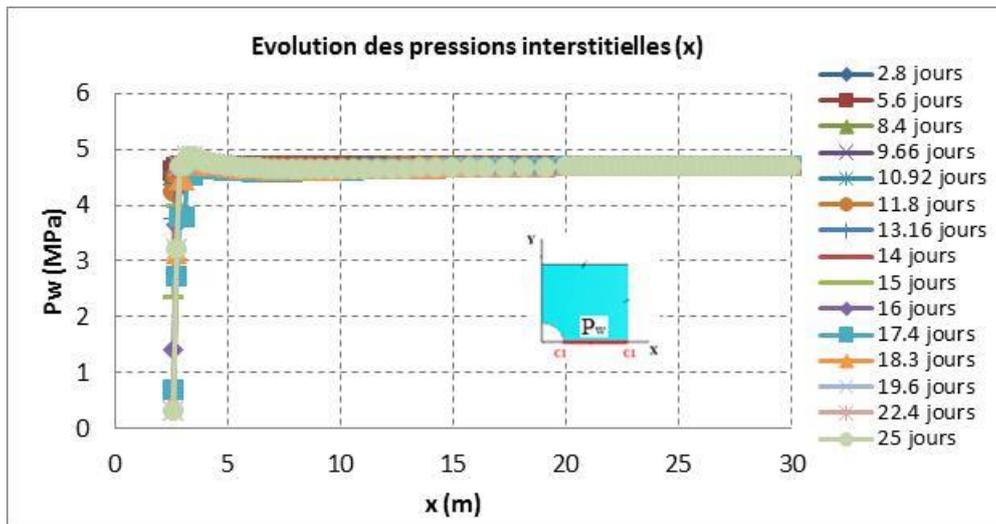


Figure IV-11 : Evolution des pressions interstitielles  $P_w$  suivant l'axe X (coupe C1) au cours de l'excavation du test I

### IV.3.2.2 Déplacements et déformations

Les évolutions des déplacements horizontaux et déformations  $\epsilon_{xx}$  suivant l'axe X sont présentées sur Figure IV-12 et Figure IV-13.

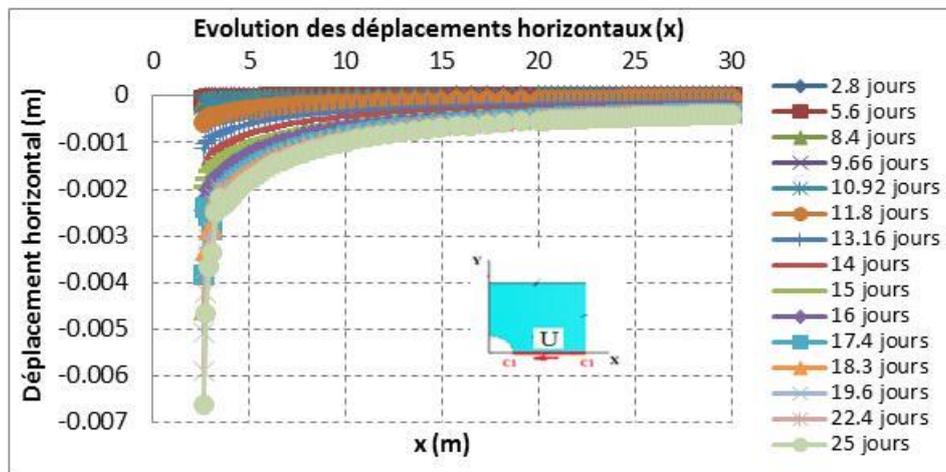


Figure IV-12 : Evolution des déplacements horizontaux  $u$  suivant l'axe X (coupe C1) au cours de l'excavation du test I

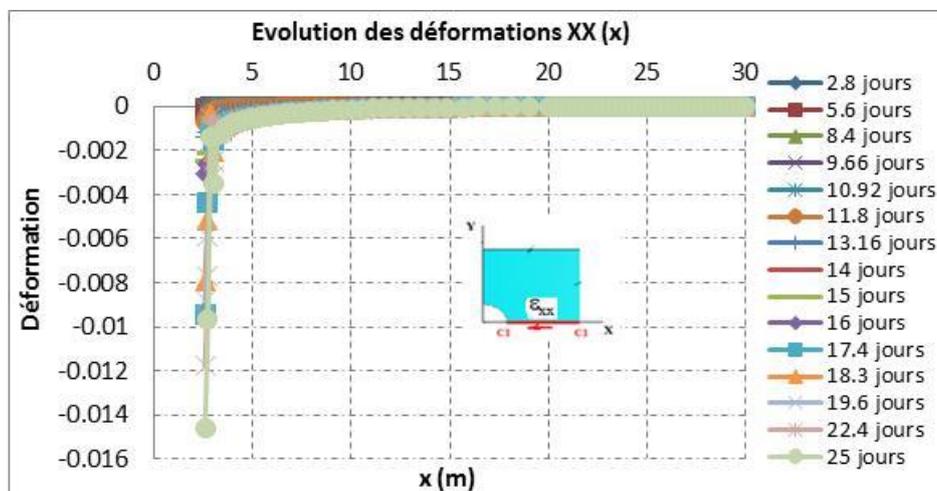


Figure IV-13 : Evolution des déformations  $\epsilon_{xx}$  suivant l'axe X (coupe C1) au cours de l'excavation du test I

### IV.3.3 Evolution des valeurs suivant l'axe Y (coupe C2-C2)

#### IV.3.3.1 Contraintes

Figure IV-14 → Figure IV-21 présentent les évolutions des contraintes totales, contraintes effectives et pressions interstitielles suivant la coupe C2-C2.

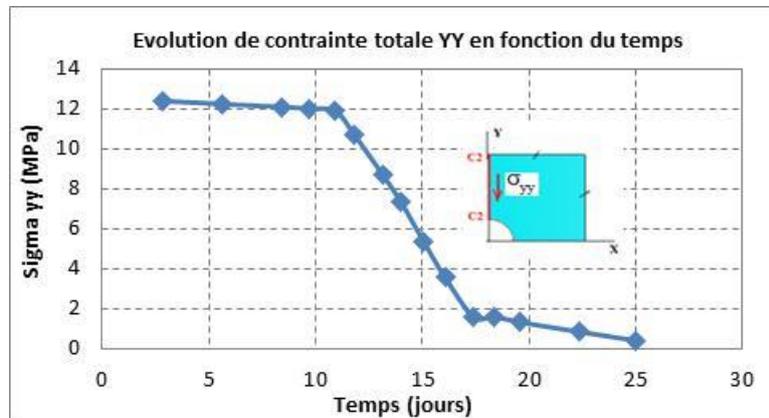


Figure IV-14 : Evolution de contrainte totale  $\sigma_{yy}$  en paroi de galerie orientée petit  $h$  au cours de l'excavation

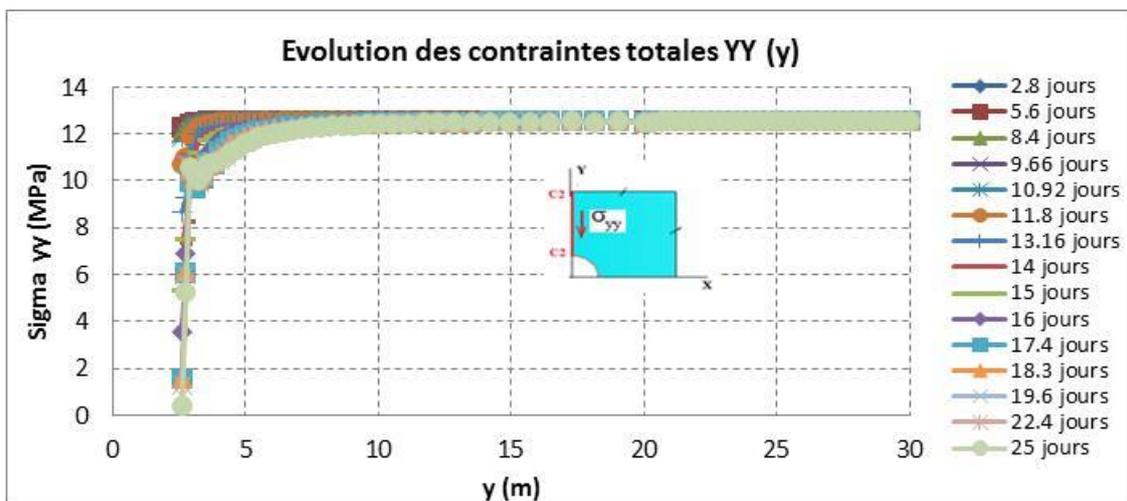


Figure IV-15 : Evolution des contraintes totales  $\sigma_{yy}$  suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test I

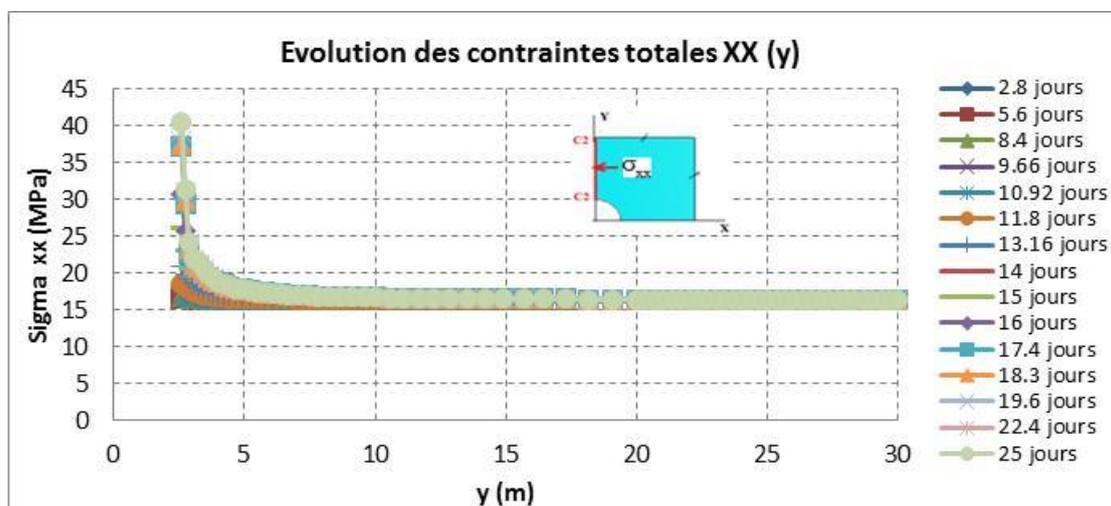


Figure IV-16 : Evolution des contraintes totales  $\sigma_{xx}$  suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test I

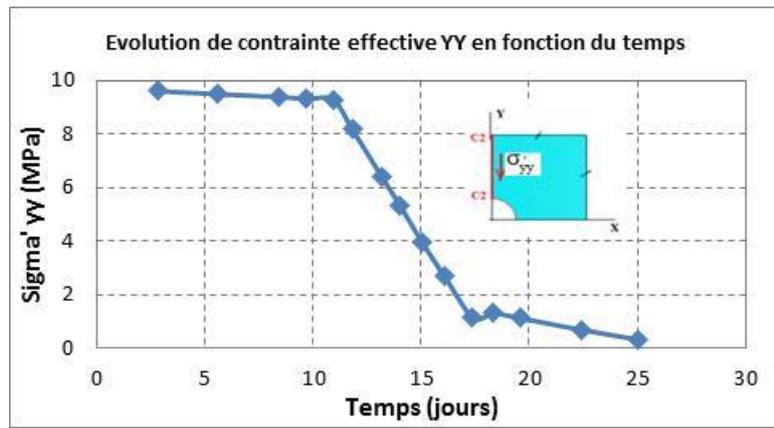


Figure IV-17 : Evolution de contrainte effective  $\sigma'_{yy}$  en paroi de galerie orientée petit h au cours de l'excavation

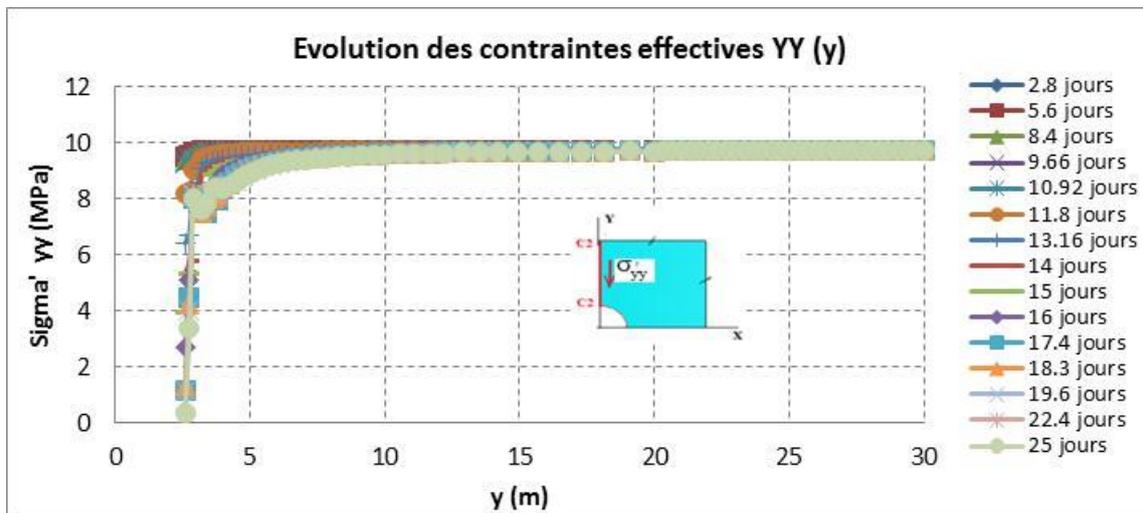


Figure IV-18 : Evolution des contraintes effectives  $\sigma'_{yy}$  suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 1

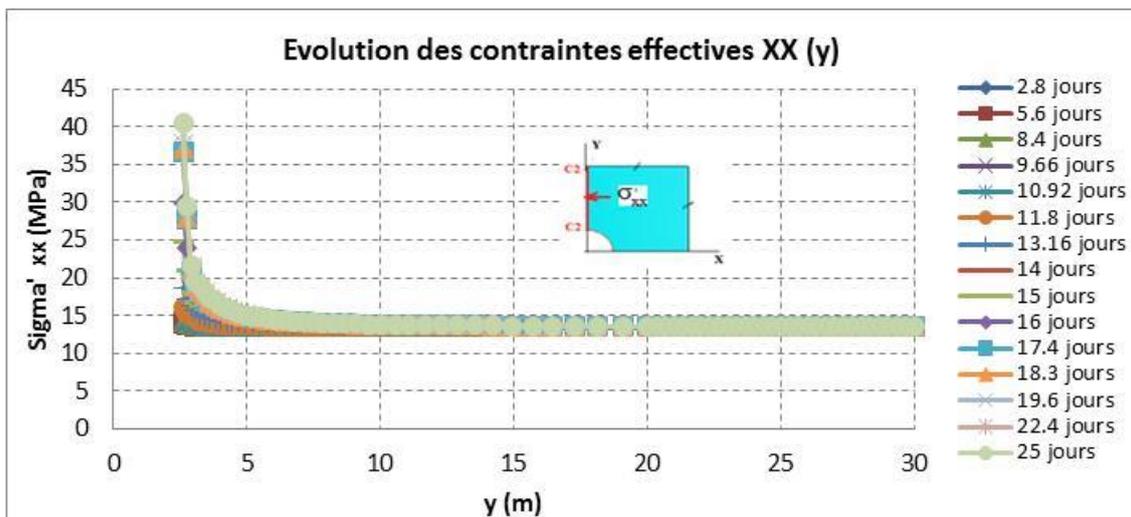


Figure IV-19 : Evolution des contraintes effectives  $\sigma'_{xx}$  suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 1

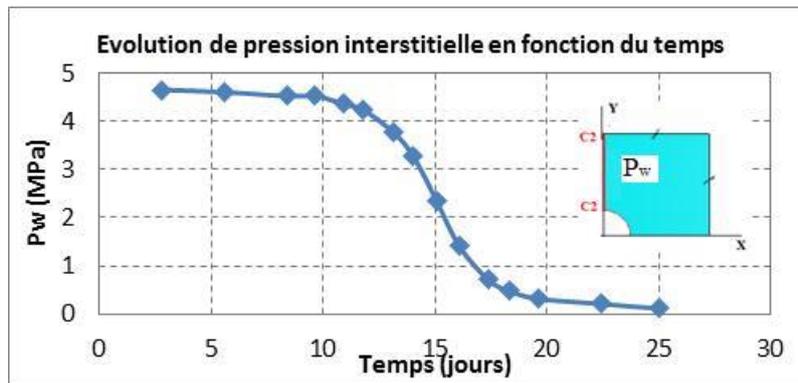


Figure IV-20 : Evolution de pression interstitielle  $P_w$  en paroi de galerie orientée petit  $h$  au cours de l'excavation

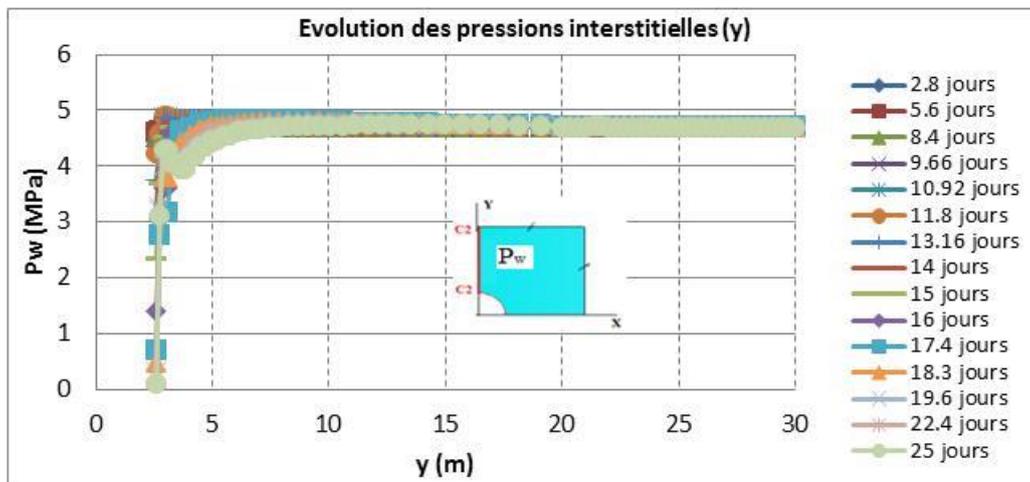


Figure IV-21 : Evolution des pressions interstitielles  $P_w$  suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 1

### IV.3.3.2 Déplacements et déformations

Les évolutions des déplacements verticaux et déformations  $\epsilon_{yy}$  suivant l'axe Y sont présentées sur Figure IV-22 et Figure IV-23.

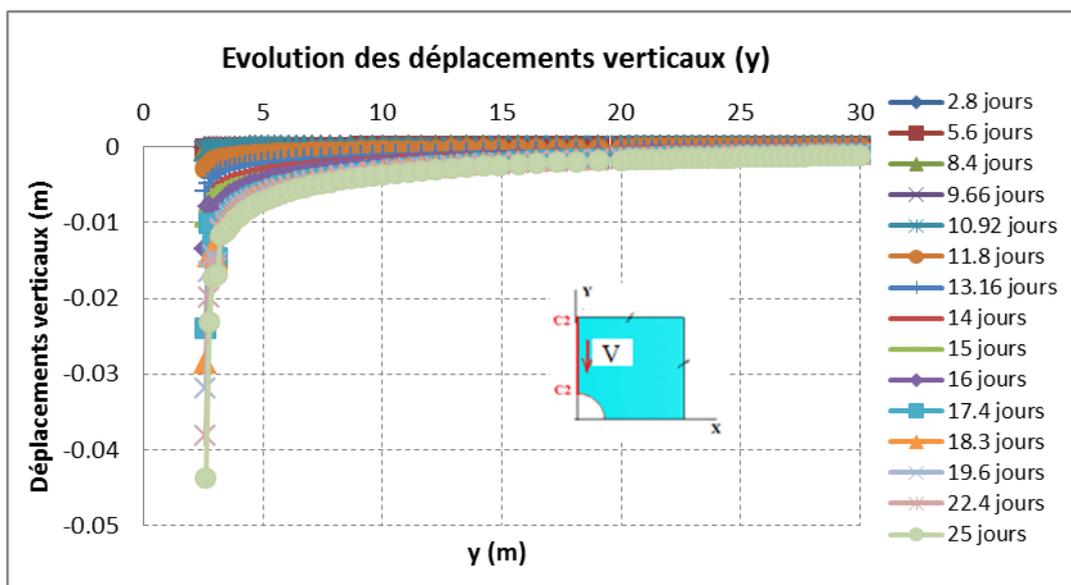


Figure IV-22 : Evolution des déplacements verticaux  $v$  suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 1

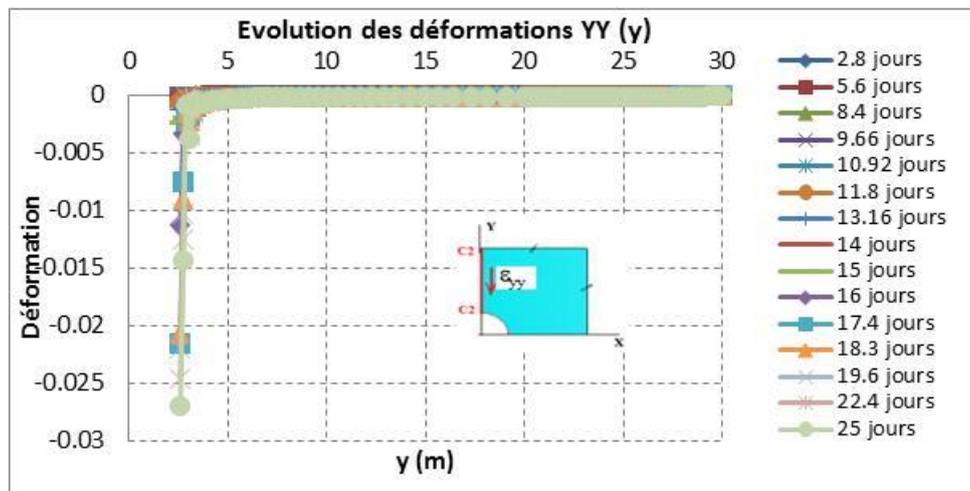


Figure IV-23 : Evolution des déformations  $\epsilon_{yy}$  suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test I

### IV.3.4 Evolution des valeurs suivant l'axe à 45° (coupe C3-C3)

#### IV.3.4.1 Contraintes

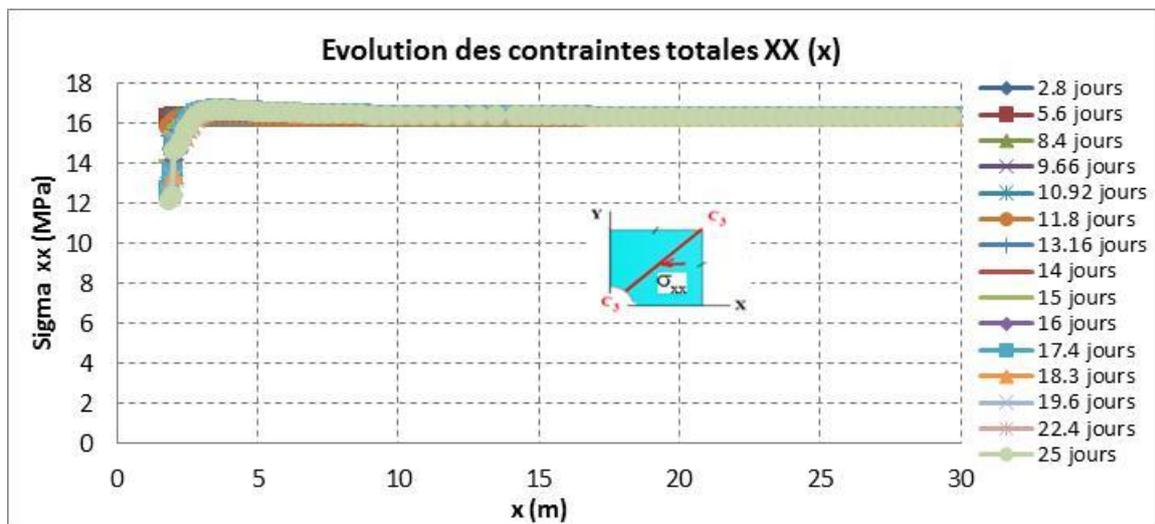


Figure IV-24 : Evolution des contraintes totales  $\sigma_{xx}$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test I

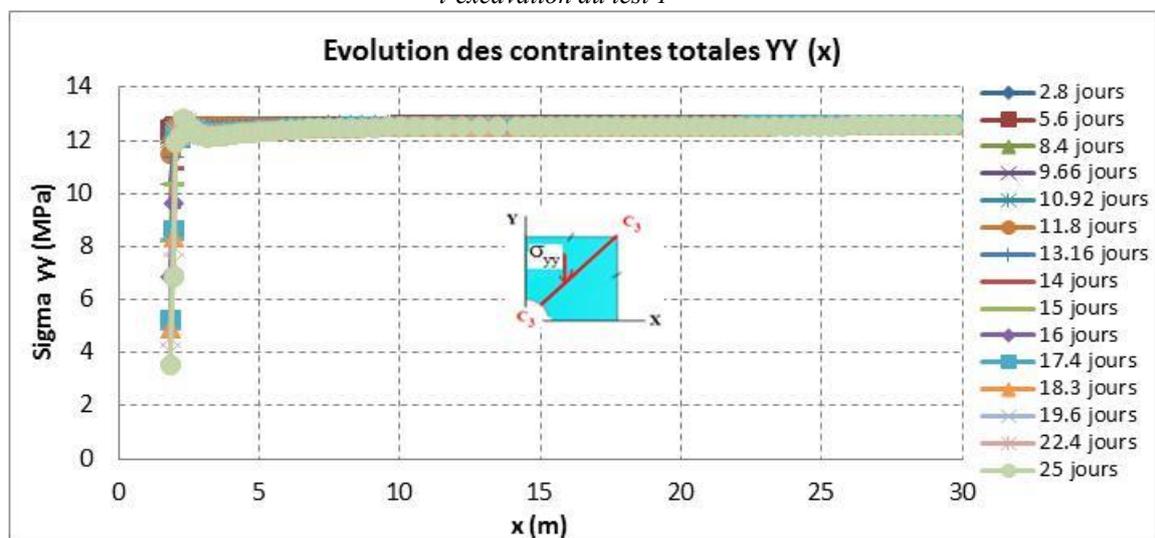


Figure IV-25 : Evolution des contraintes totales  $\sigma_{yy}$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test I

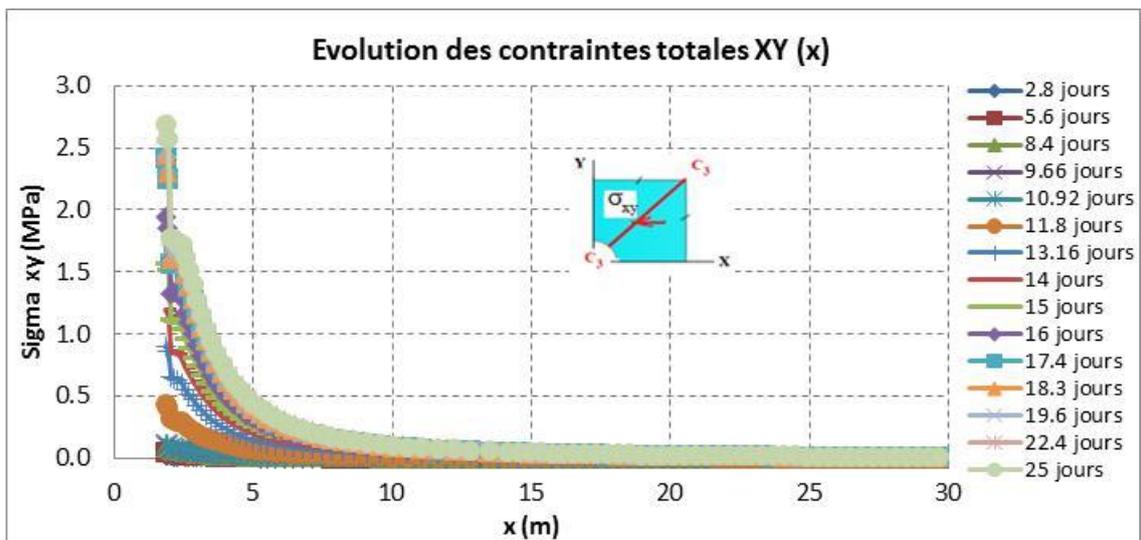


Figure IV-26 : Evolution des contraintes totales  $\sigma_{xy}$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test I

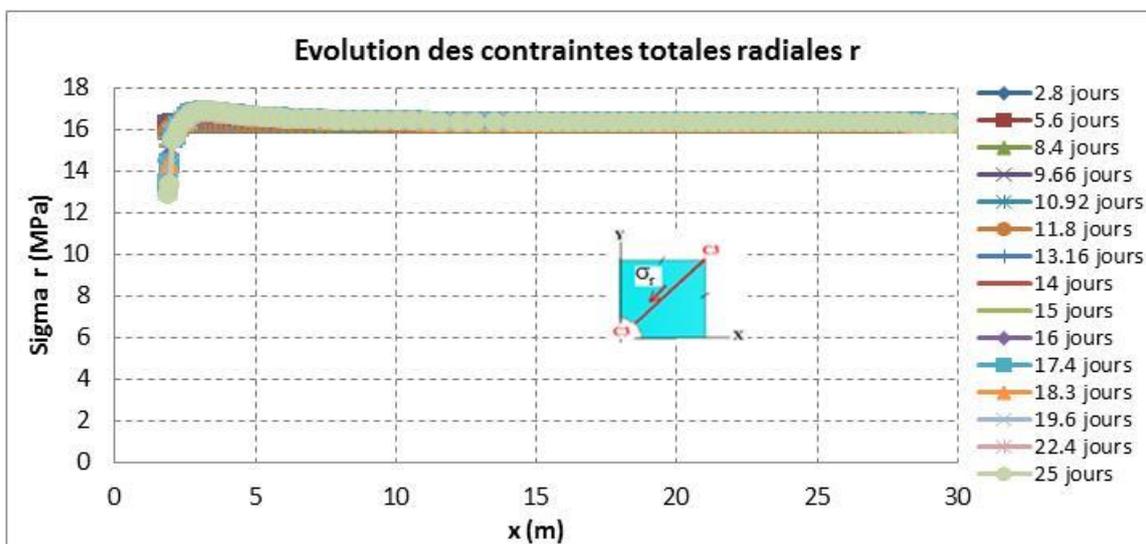


Figure IV-27 : Evolution des contraintes totales radiales  $\sigma_r$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test I

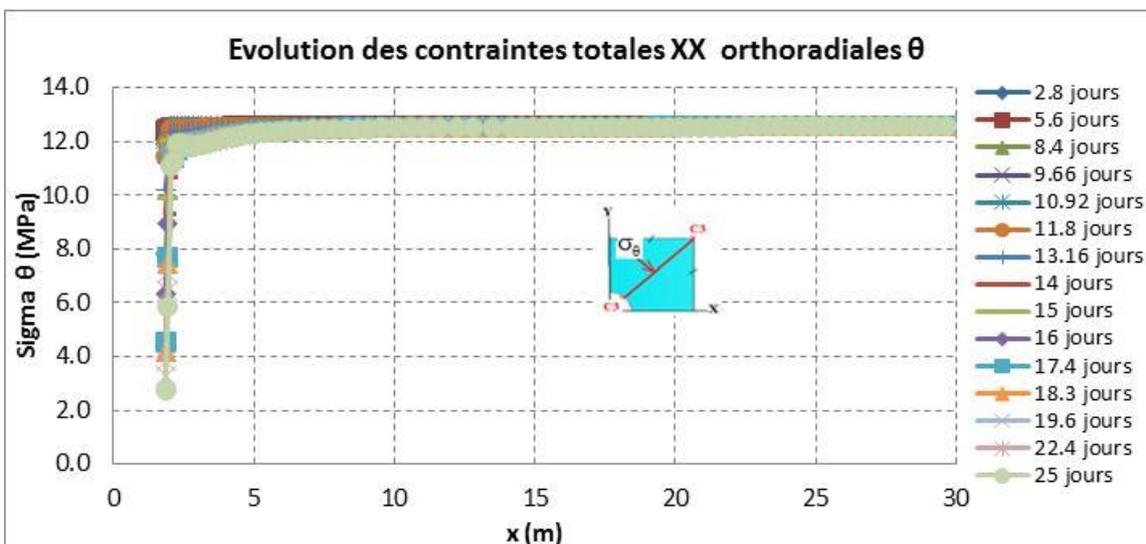


Figure IV-28 : Evolution des contraintes totales orthoradiales  $\sigma_{\theta}$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test I

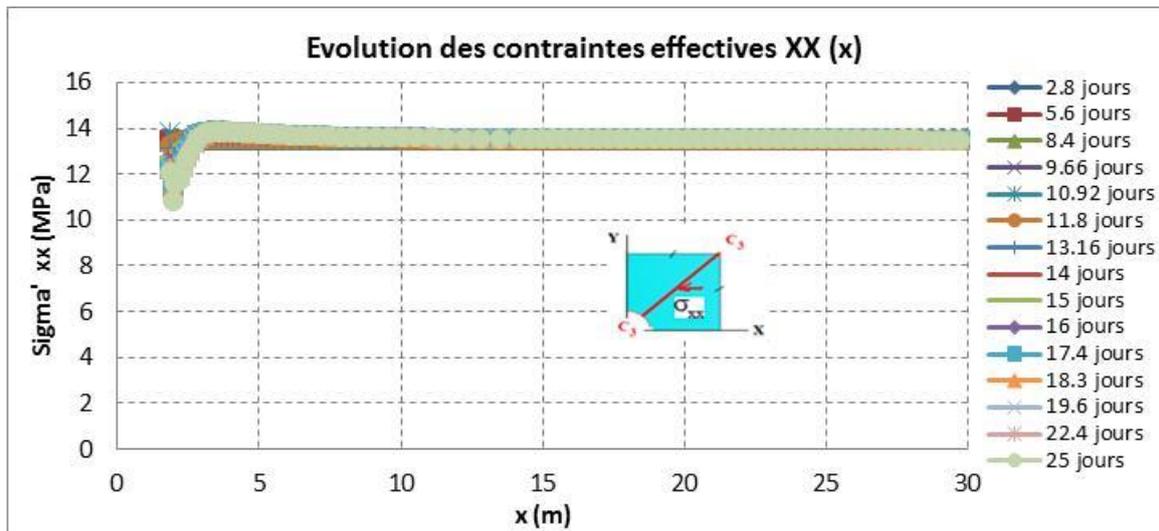


Figure IV-29 : Evolution des contraintes effectives  $\sigma'_{xx}$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test I

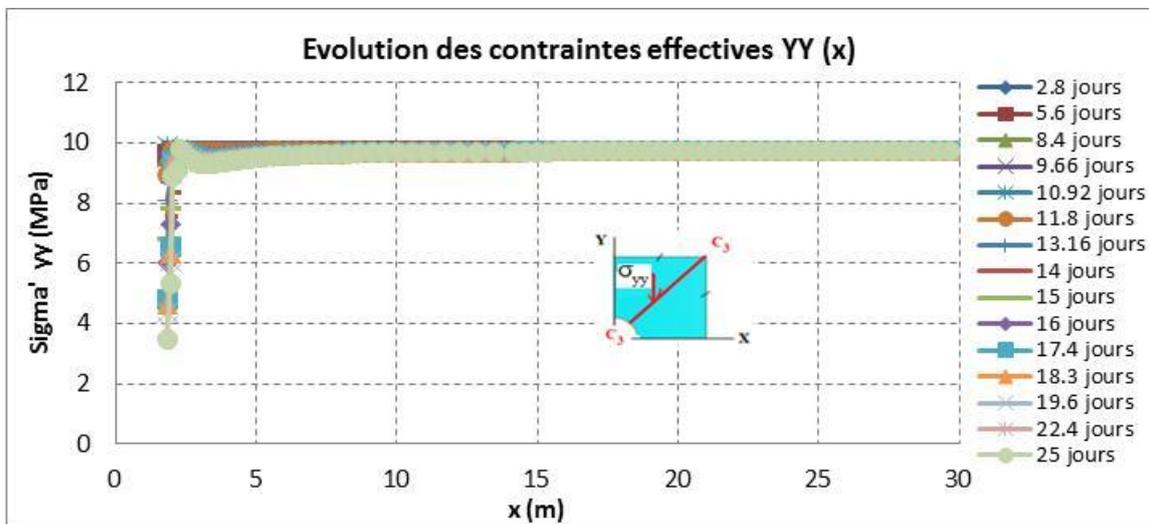


Figure IV-30 : Evolution des contraintes effectives  $\sigma'_{yy}$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test I

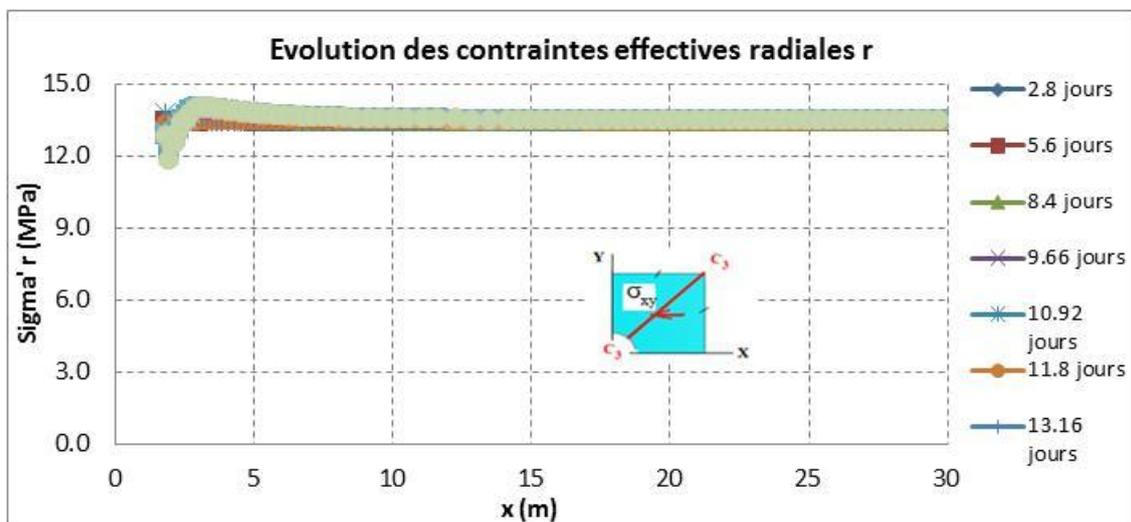


Figure IV-31 : Evolution des contraintes effectives radiales  $\sigma'_r$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test I

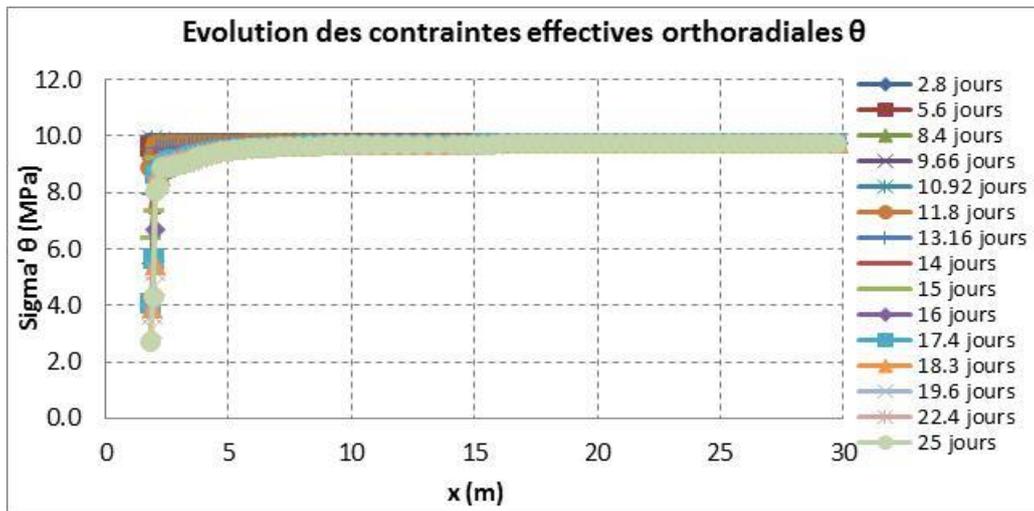


Figure IV-32 : Evolution des contraintes effectives orthoradiales  $\sigma'_{\theta}$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1

#### IV.3.4.2 Déplacements et déformations

Les évolutions des déplacements et déformations suivant la coupe C3-C3 sont présentées sur Figure IV-33 → Figure IV-38

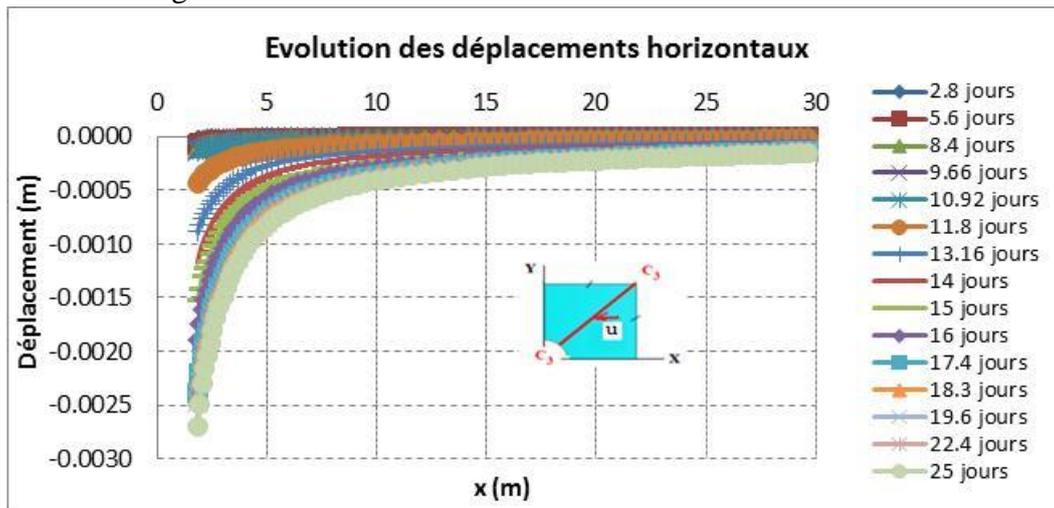


Figure IV-33 : Evolution des déplacements horizontaux  $u$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1

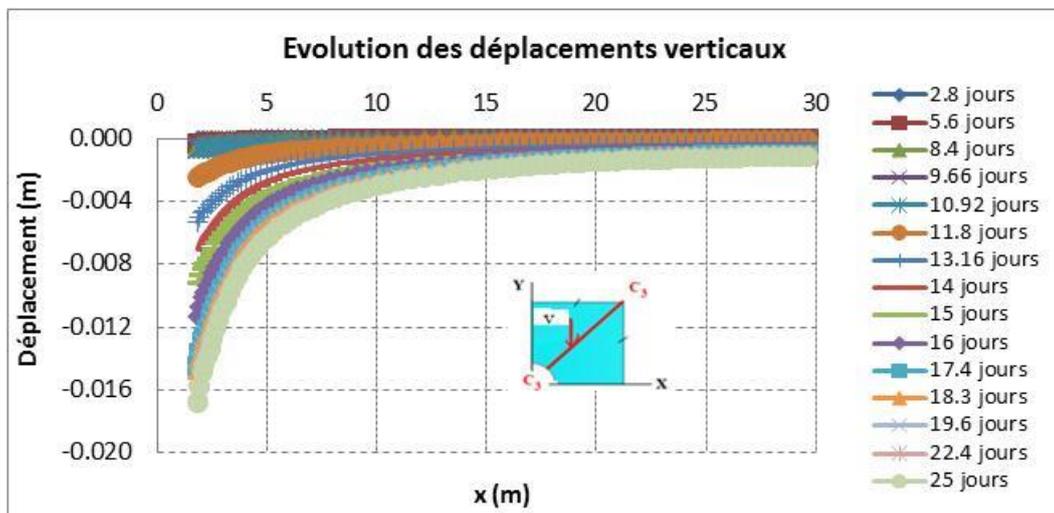


Figure IV-34 : Evolution des déplacements verticaux  $v$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1

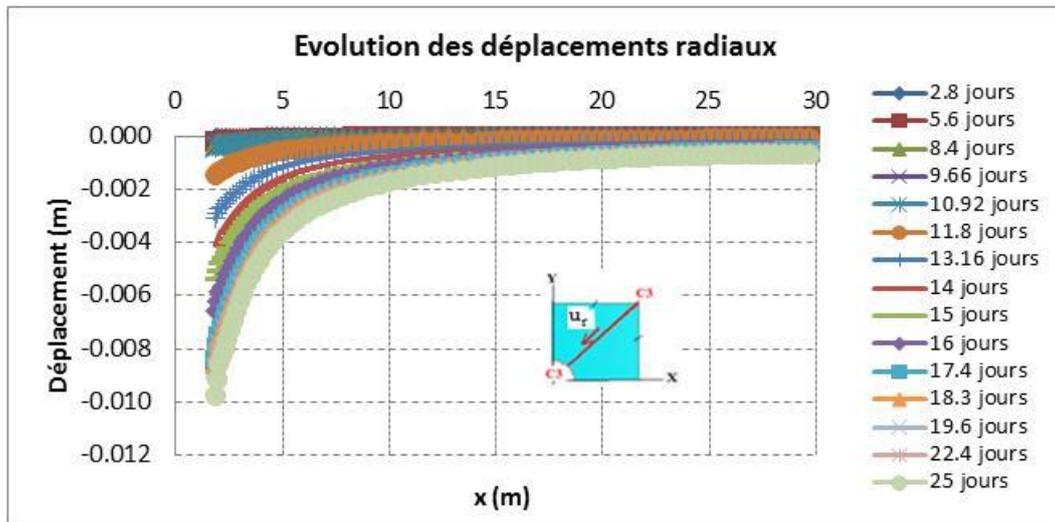


Figure IV-35 : Evolution des déplacements radiaux  $u_r$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1

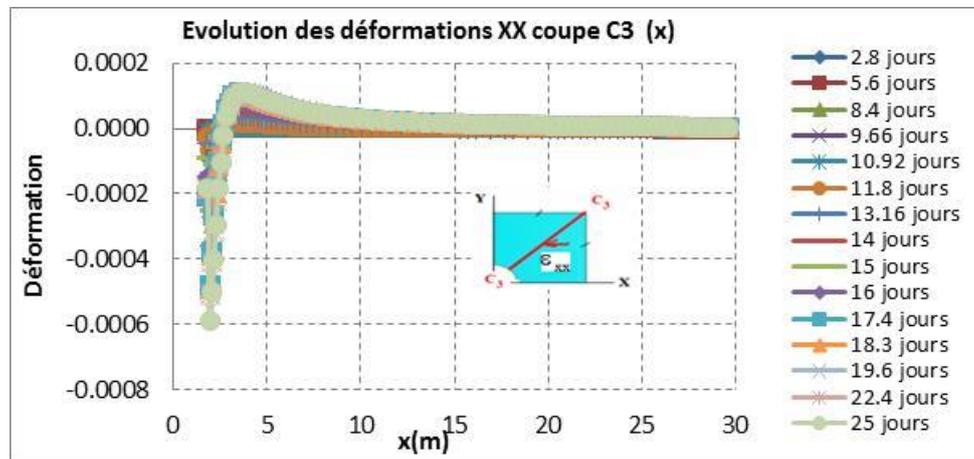


Figure IV-36 : Evolution des déformations  $\epsilon_{xx}$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1

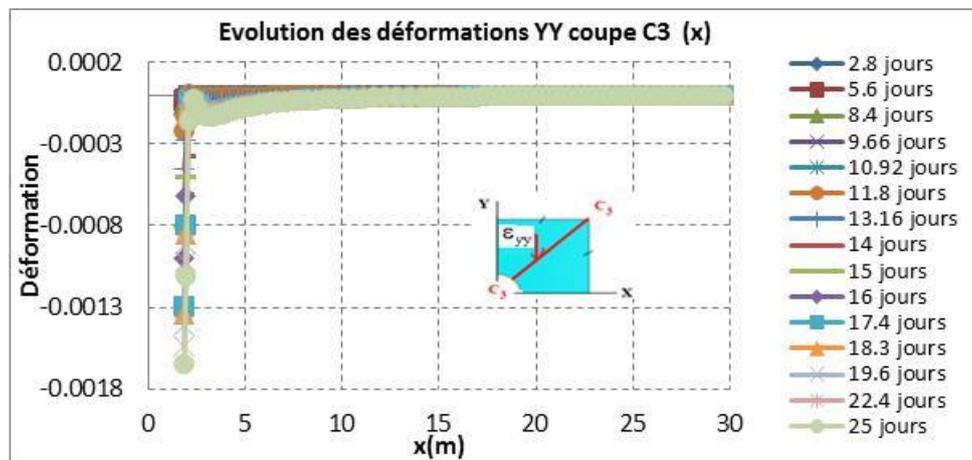


Figure IV-37 : Evolution des déformations  $\epsilon_{yy}$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1

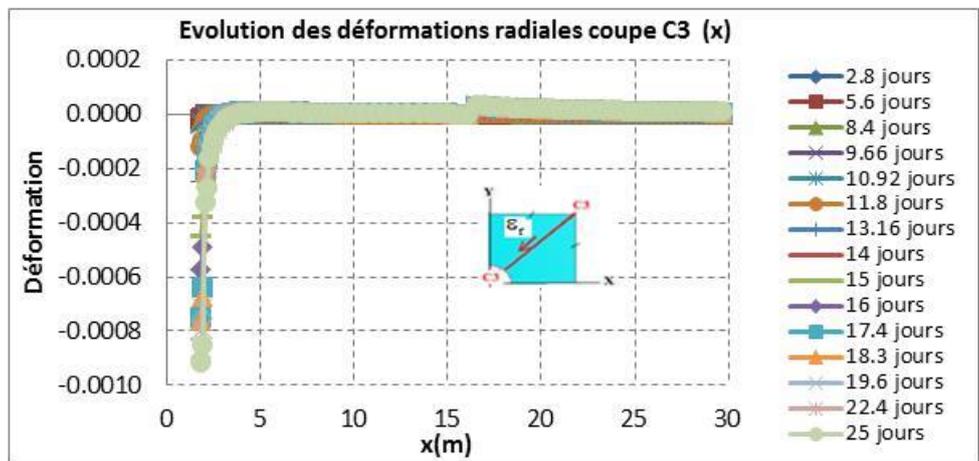


Figure IV-38 : Evolution des déformations radiales et suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1

### IV.3.5 Evolution des coefficients d'endommagements du test 1

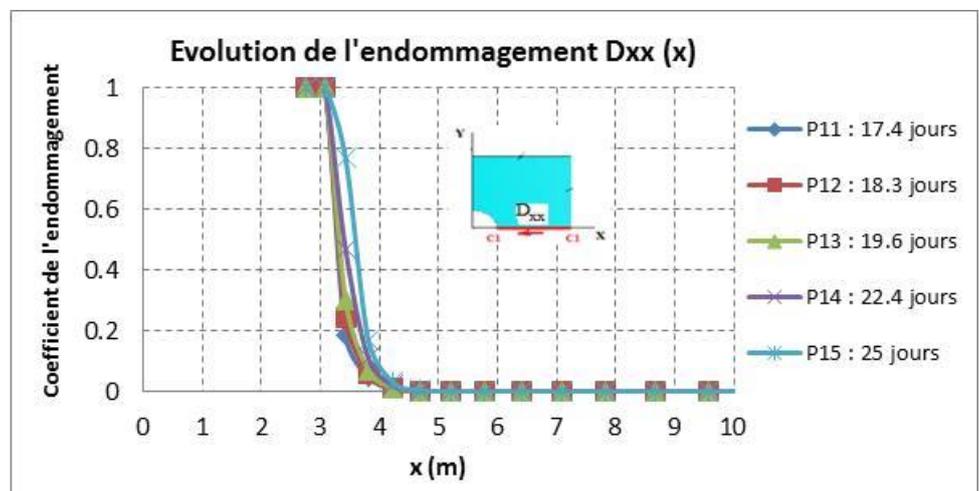


Figure IV-39 : Evolution des coefficients d'endommagement  $D_{xx}$  suivant la coupe C1-C1 au cours de l'excavation du test 1 (phases 11-15)

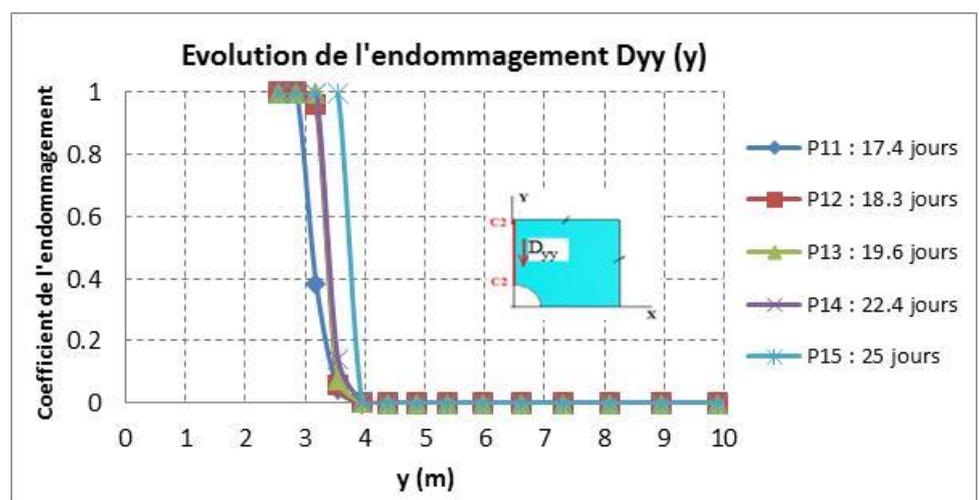


Figure IV-40 : Evolution des coefficients d'endommagement  $D_{yy}$  suivant la coupe C2-C2 au cours de l'excavation du test 1 (phases 11-15)

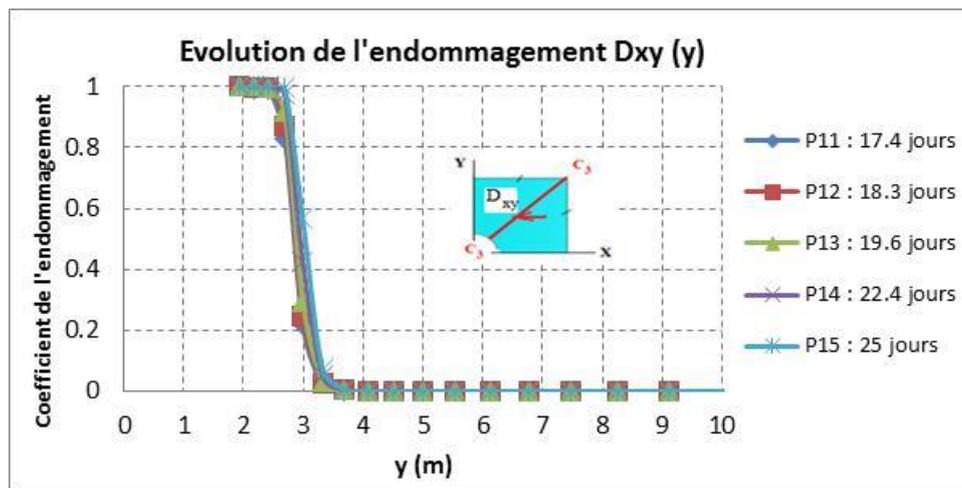


Figure IV-41 : Evolution des coefficients d'endommagement  $D_{xy}$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 1 (phases 11-15)

### IV.3.6 Conclusion

L'évolution spatio-temporelle des zones endommagées fracturées est obtenue lorsque les coefficients d'endommagement atteignent la valeur unité cf. Figure IV-42.

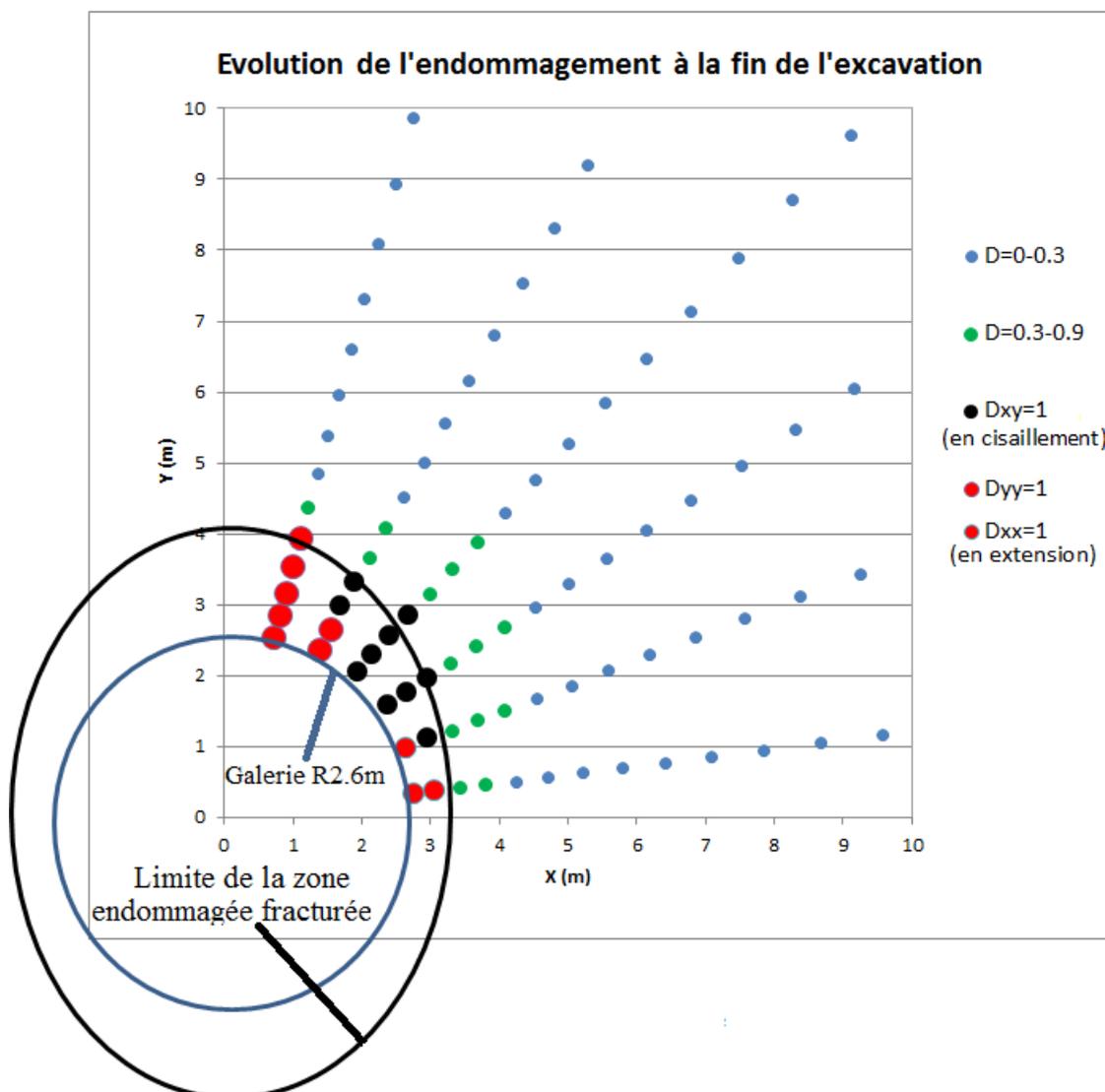


Figure IV-42 : Surface limite de forme elliptique de la zone endommagée fracturée pour des galeries orientées dans la direction petit  $h$

Les discontinuités résultantes sont obtenues lorsque les coefficients d'endommagement atteignent la valeur unité et leurs orientations sont des plans perpendiculaires à la direction des contraintes principales ou correspondent au plan de distorsion maximale

Figure IV-43 décrit les discontinuités autour des ouvrages excavés orientés dans la direction de contraintes mineures. La surface enveloppe de la zone endommagée fracturée est de forme elliptique avec un grand axe vertical d'environ 8.2m et un petit axe de 6.4m. Cette forme elliptique présente un bon accord avec les observations in situ cf. Figure IV-44.

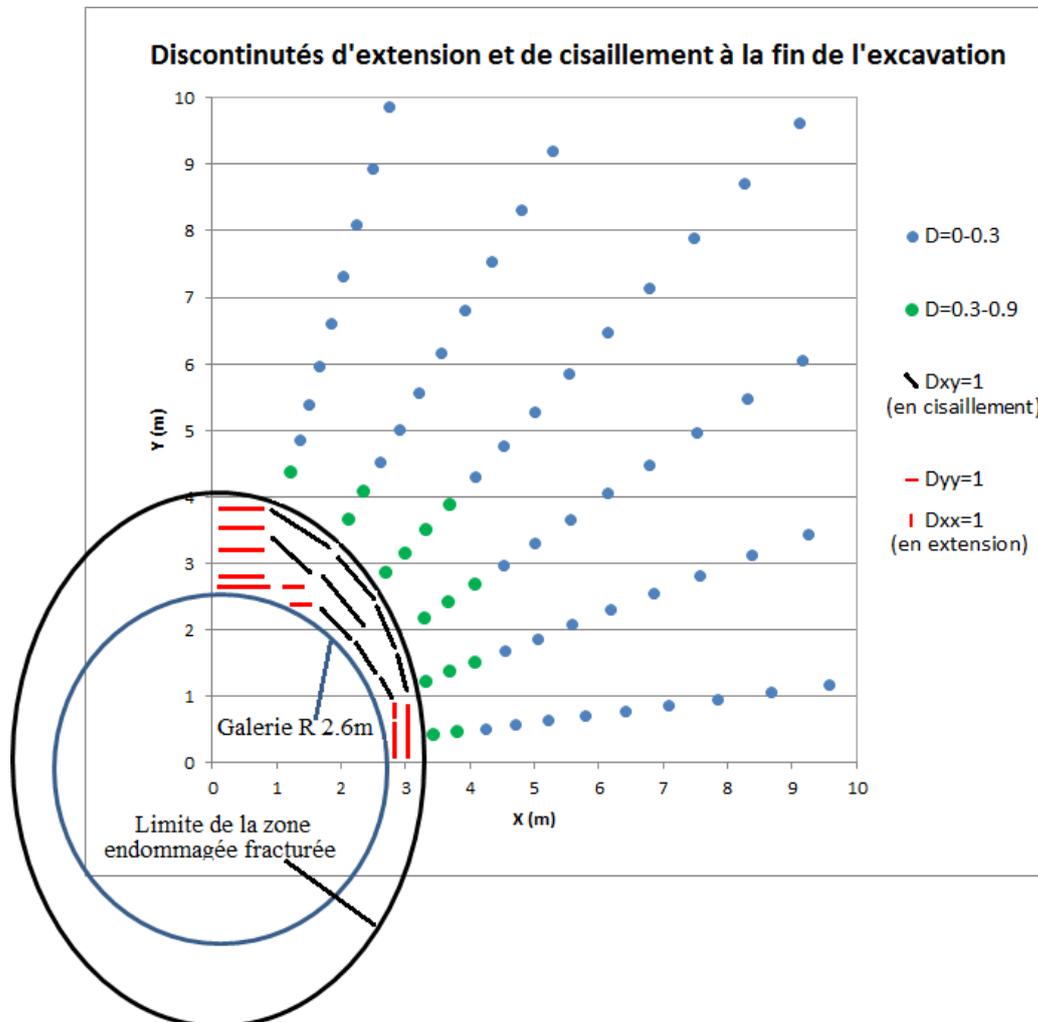


Figure IV-43 : Les discontinuités dans la zone endommagée fracturée pour des galeries orientées dans la direction petit  $h$

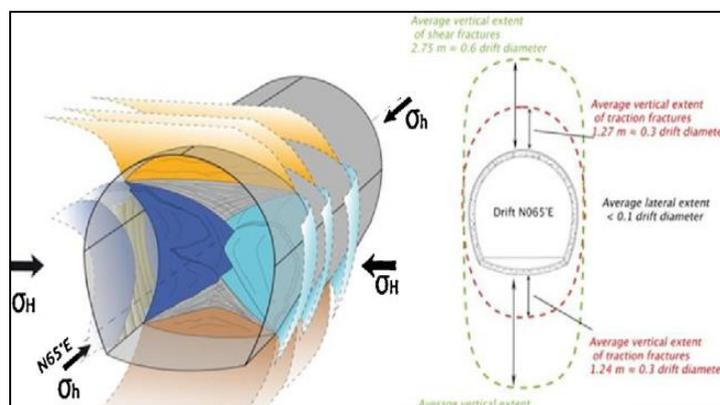


Figure IV-44 : Les discontinuités observées dans le laboratoire URL pour une galerie orientée dans la direction  $\sigma_h$  (Armand & al 2013)

## IV.4 SIMULATION DE L'EXCAVATION D'UNE GALERIE ORIENTEE SUIVANT LA CONTRAINTE HORIZONTALE MAJEURE GRAND H (TEST2)

### IV.4.1 Les conditions limites du problème et le maillage utilisé

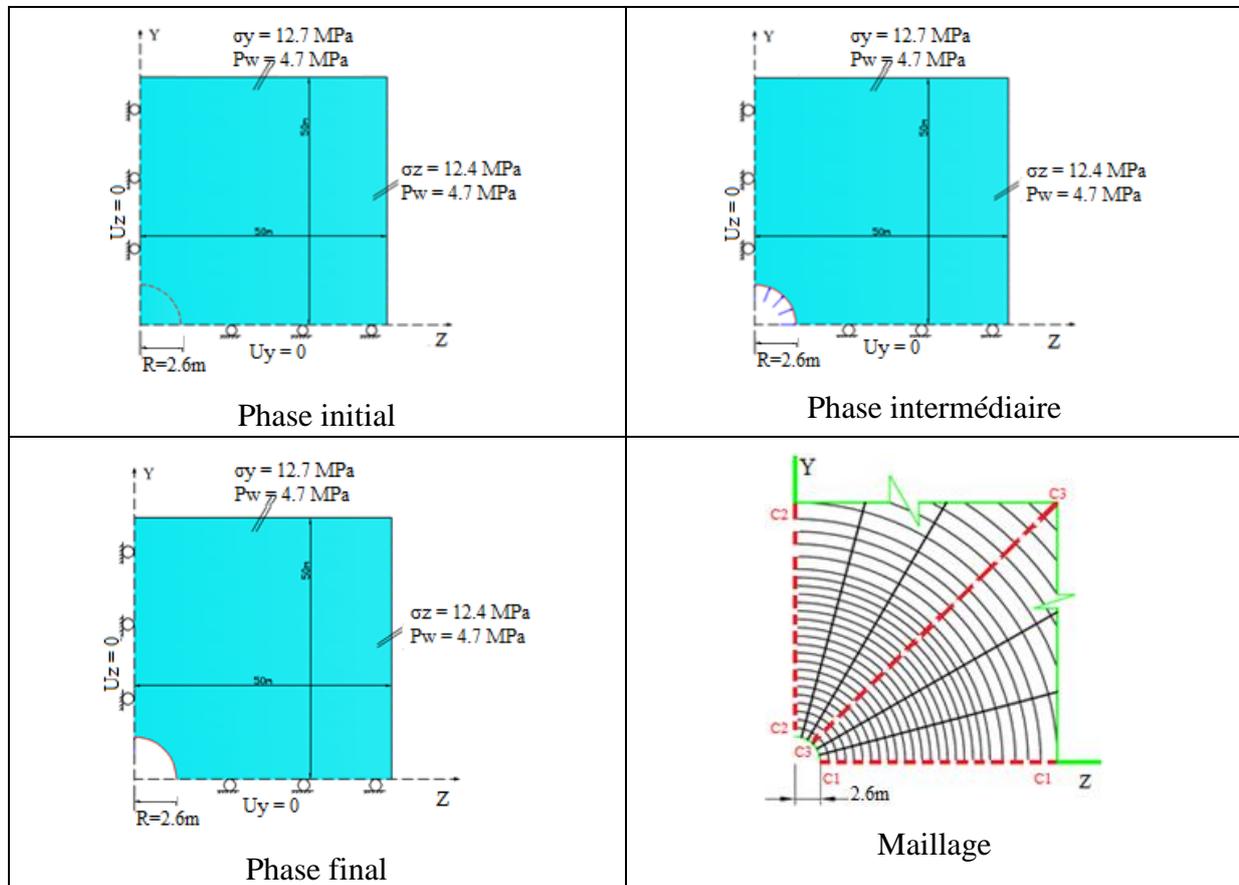


Figure IV-45 : Conditions aux limites et maillage utilisé

### IV.4.2 Evolution des valeurs suivant l'axe X (coupe C1-C1)

#### IV.4.2.1 Contraintes

Figure IV-46 → Figure IV-53 présentent les évolutions des contraintes totales, contraintes effectives et pressions interstitielles suivant la coupe C1-C1.

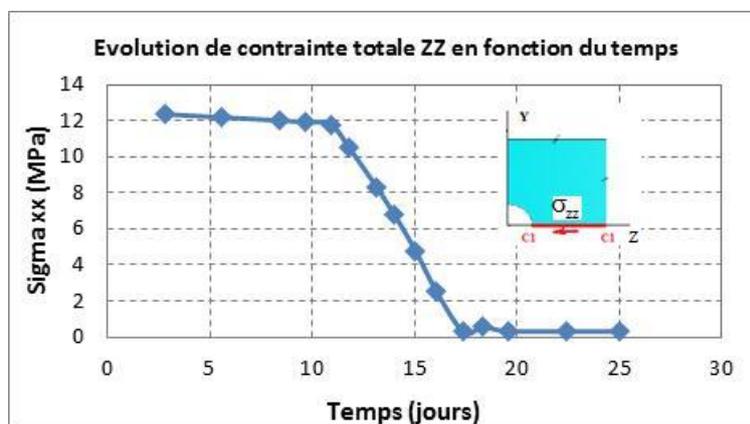


Figure IV-46 : Evolution de contrainte totale  $\sigma_{zz}$  en paroi de galerie orientée grand H au cours de l'excavation

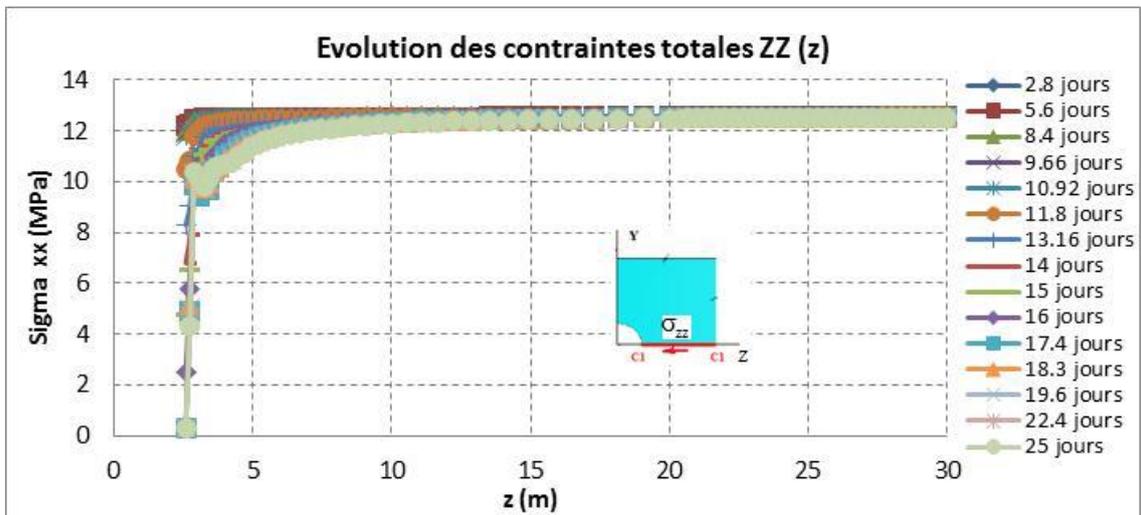


Figure IV-47 : Evolution des contraintes totales  $\sigma_{zz}$  suivant l'axe Z (coupe C1) au cours de l'excavation du test 2

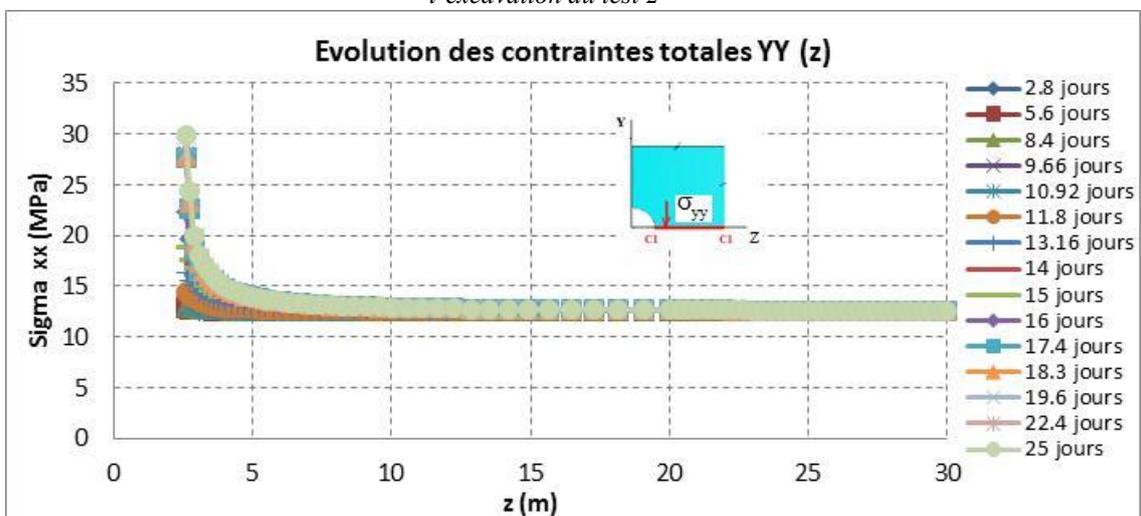


Figure IV-48 : Evolution des contraintes totales  $\sigma_{yy}$  suivant l'axe Z (coupe C1) au cours de l'excavation du test 2

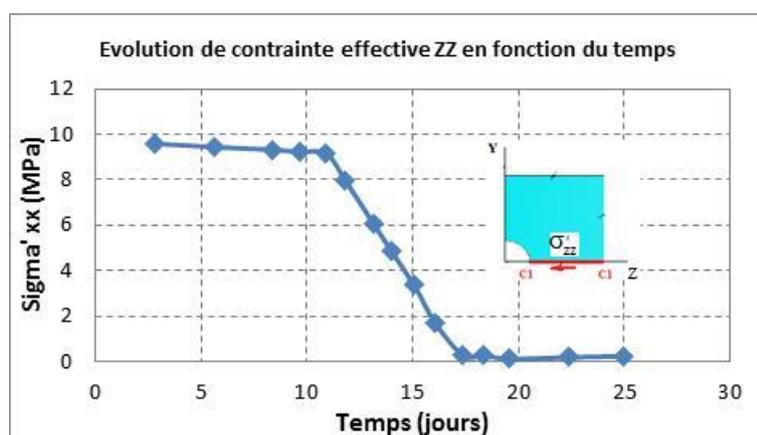


Figure IV-49 : Evolution de contrainte effective  $\sigma'_{zz}$  en paroi de galerie orientée grand H au cours de l'excavation

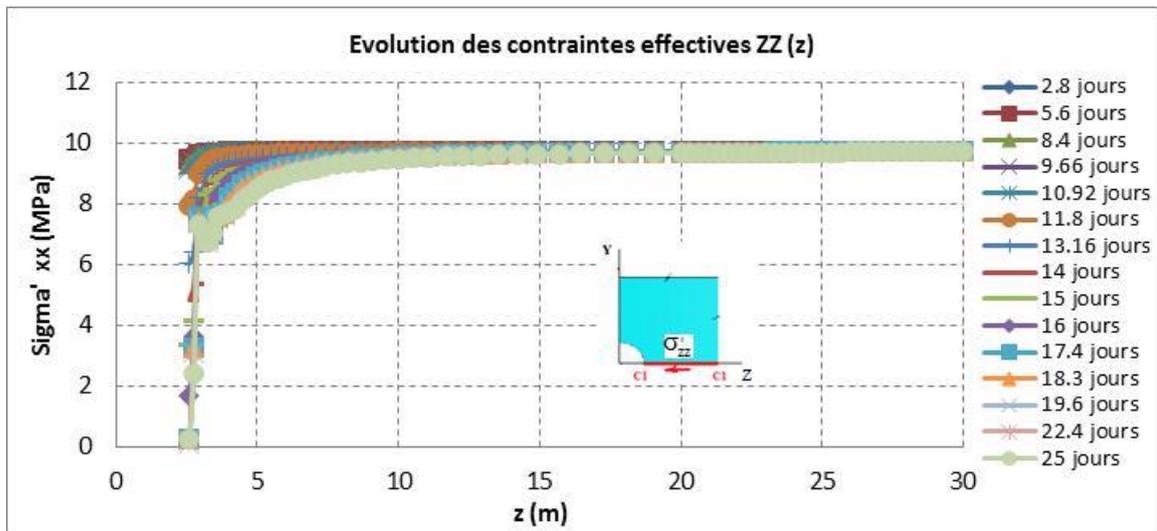


Figure IV-50 : Evolution des contraintes effectives  $\sigma'_{zz}$  suivant l'axe Z (coupe C1) au cours de l'excavation du test 2

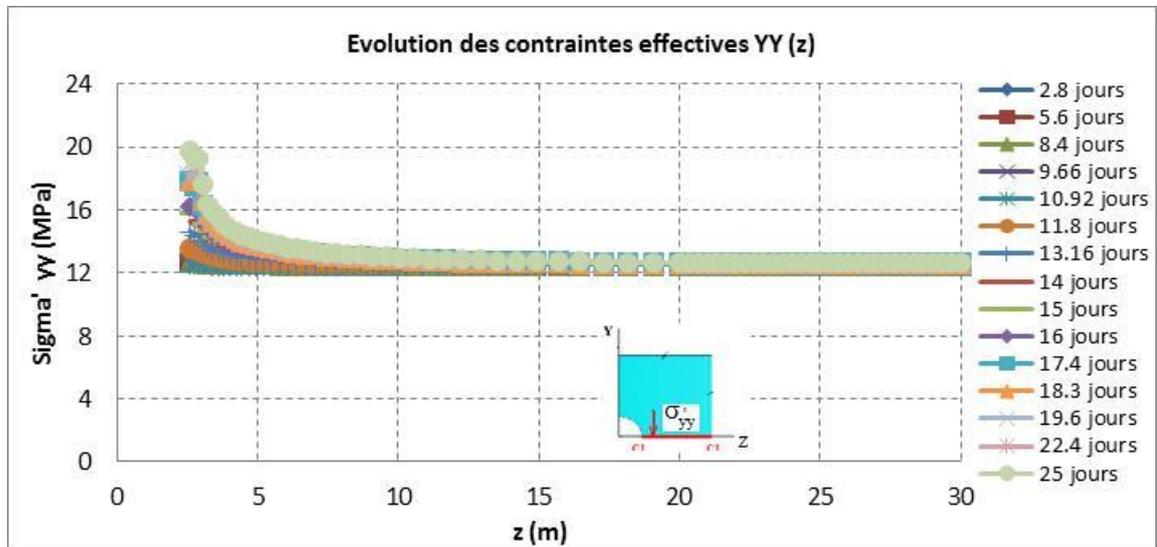


Figure IV-51 : Evolution des contraintes effectives  $\sigma'_{yy}$  suivant l'axe Y (coupe C1) au cours de l'excavation du test 2

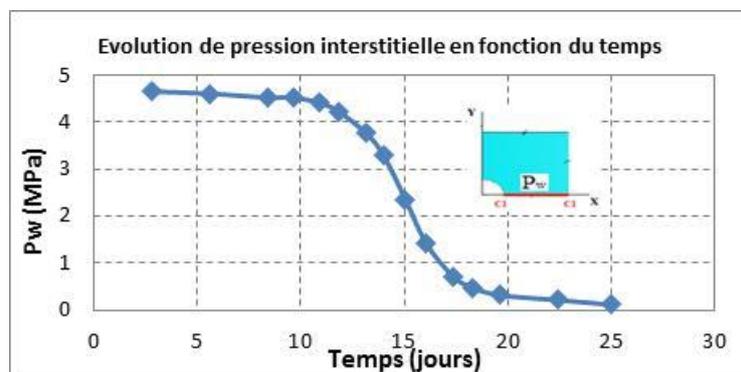


Figure IV-52 : Evolution de pression interstitielle  $P_w$  en paroi de galerie orientée petit h au cours de l'excavation

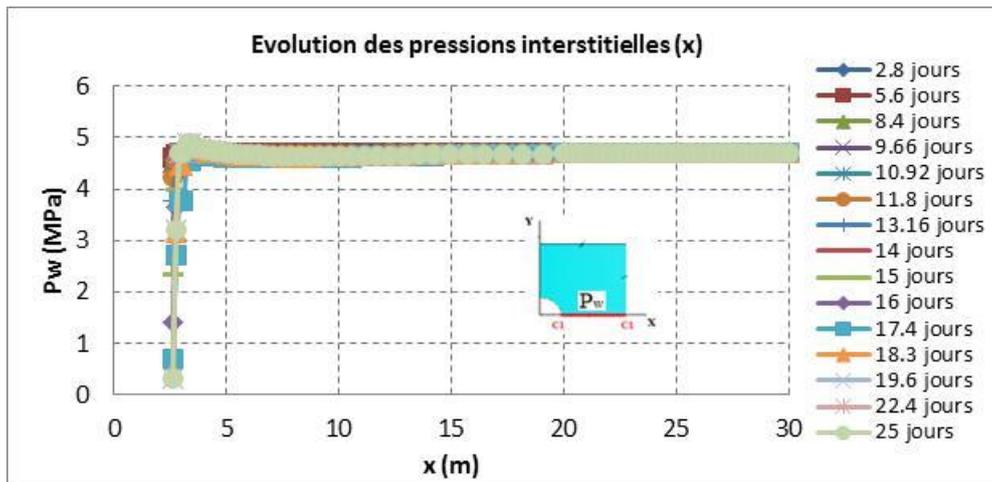


Figure IV-53 : Evolution des pressions interstitielles  $P_w$  suivant l'axe Z (coupe C1) au cours de l'excavation du test 2

#### IV.4.2.2 Déplacements et déformations

Les évolutions des déplacements horizontaux et déformations  $\epsilon_{xx}$  suivant l'axe X sont présentées sur Figure IV-54 et Figure IV-55.

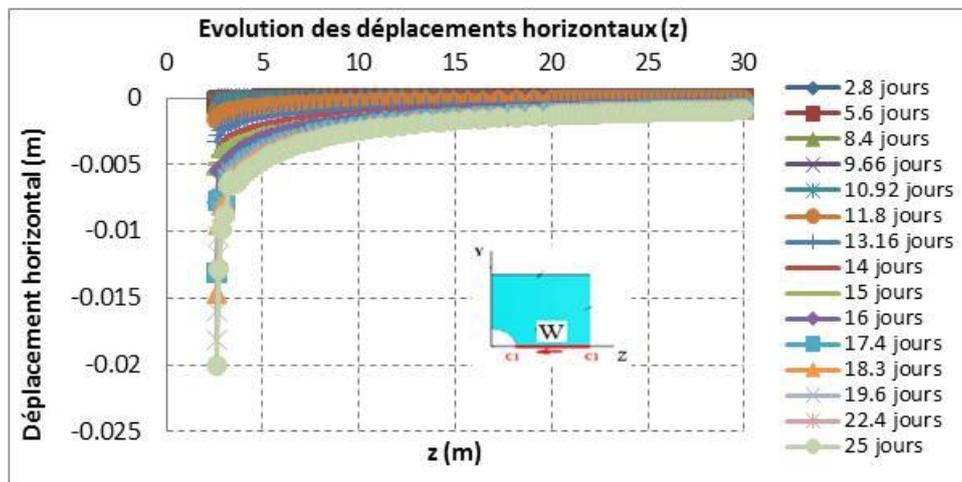


Figure IV-54 : Evolution des déplacements horizontaux  $w$  suivant l'axe Z (coupe C1) au cours de l'excavation du test 2

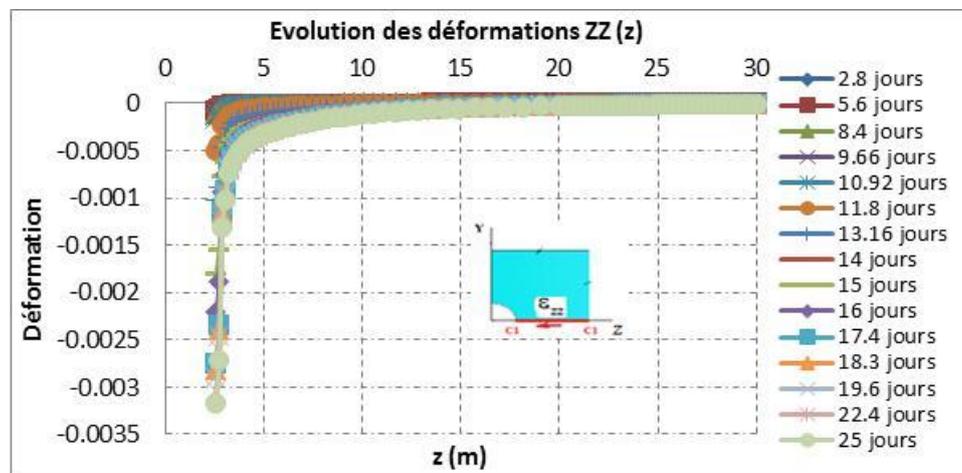


Figure IV-55 : Evolution des déformations  $\epsilon_{zz}$  suivant l'axe Z (coupe C1) au cours de l'excavation du test 2

### IV.4.3 Evolution des valeurs suivant l'axe Y (coupe C2-C2)

#### IV.4.3.1 Contraintes

Figure IV-56 → Figure IV-63 présentent les évolutions des contraintes totales, contraintes effectives et pressions interstitielles suivant la coupe C2-C2.

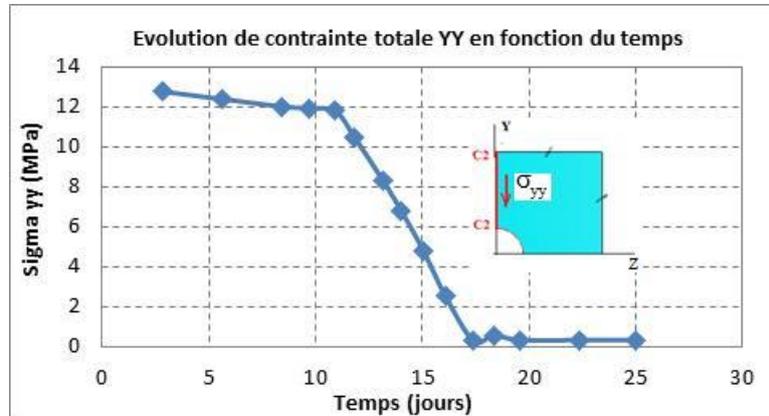


Figure IV-56 : Evolution de contrainte totale  $\sigma_{yy}$  en paroi de galerie orientée petit  $h$  au cours de l'excavation

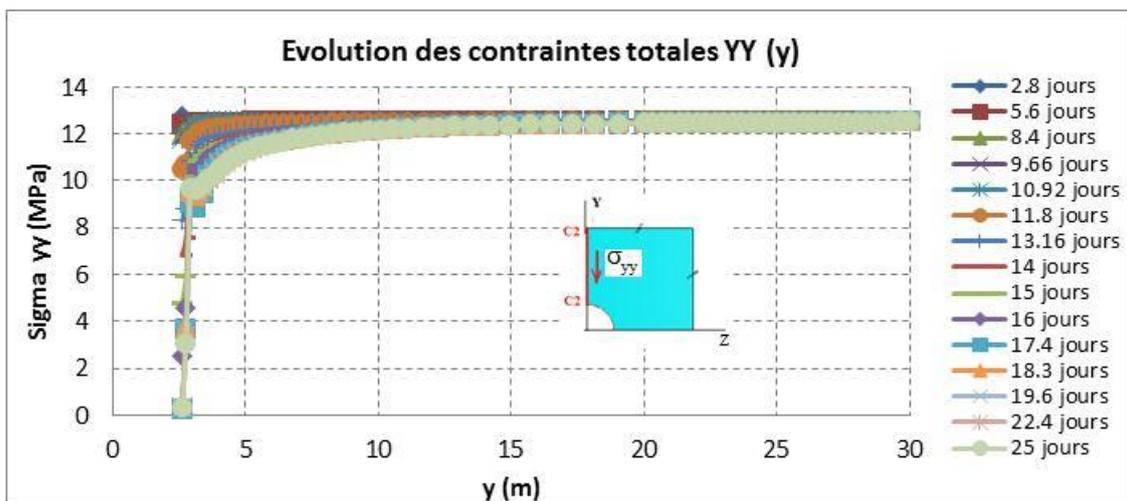


Figure IV-57 : Evolution des contraintes totales  $\sigma_{yy}$  suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 2

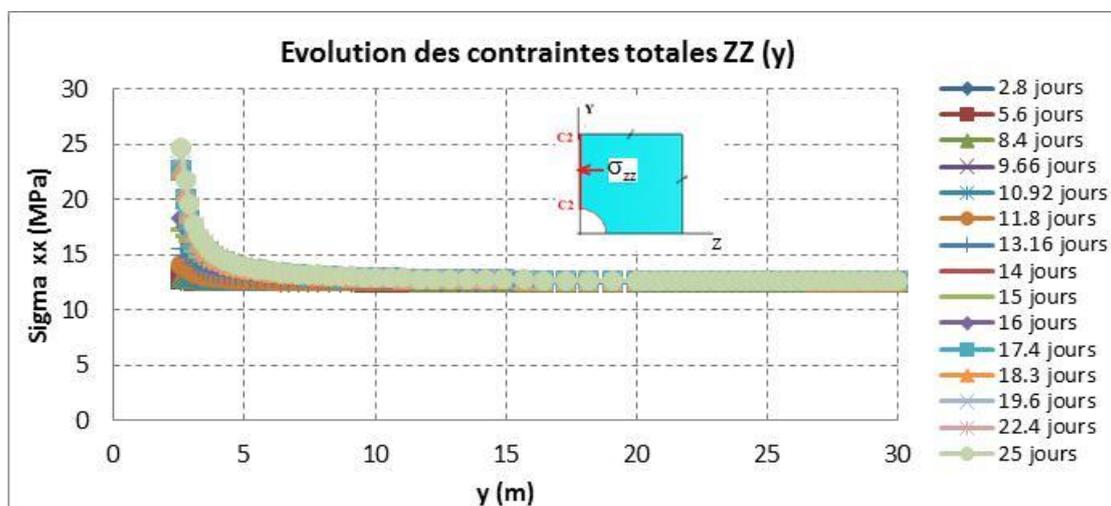


Figure IV-58 : Evolution des contraintes totales  $\sigma_{zz}$  suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 2

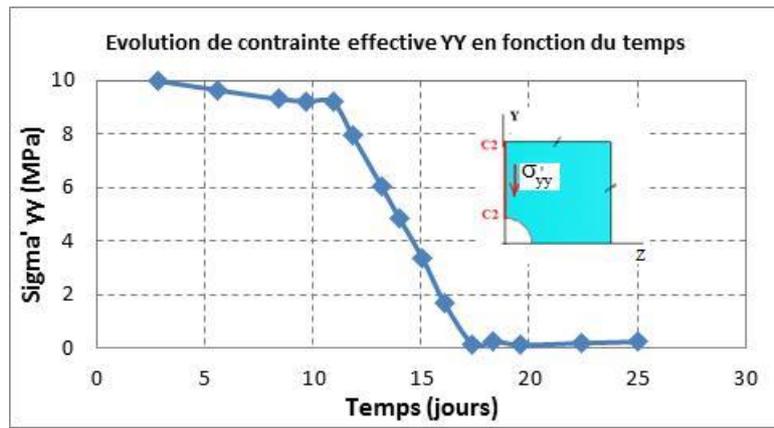


Figure IV-59 : Evolution de contrainte effective  $\sigma'_{yy}$  en paroi de galerie orientée petit h au cours de l'excavation

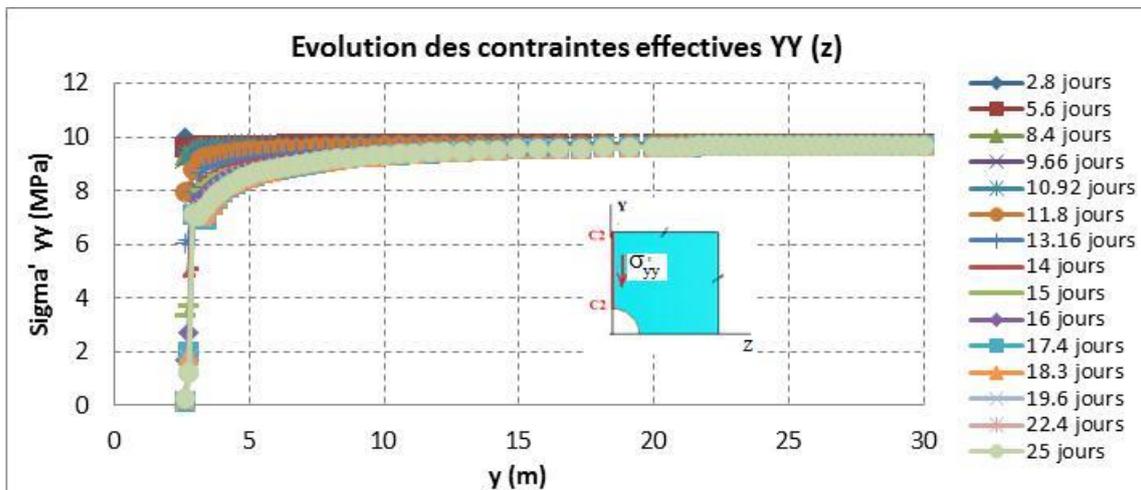


Figure IV-60 : Evolution des contraintes effectives  $\sigma'_{yy}$  suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 2

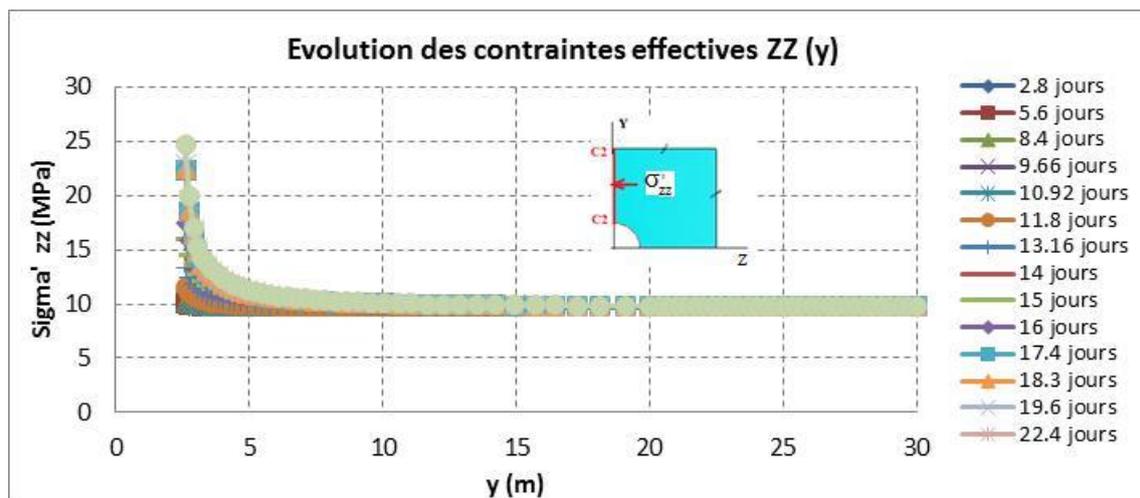


Figure IV-61 : Evolution des contraintes effectives  $\sigma'_{zz}$  suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 2

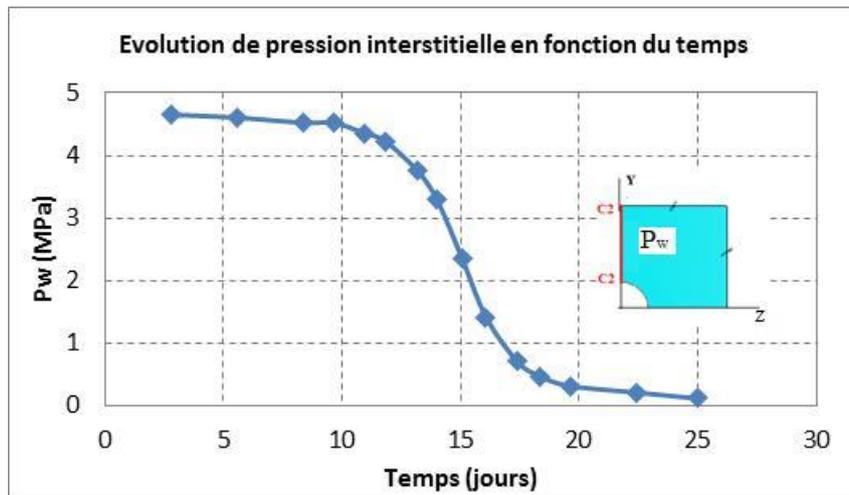


Figure IV-62 : Evolution de pression interstitielle  $P_w$  en paroi de galerie orientée grand H au cours de l'excavation

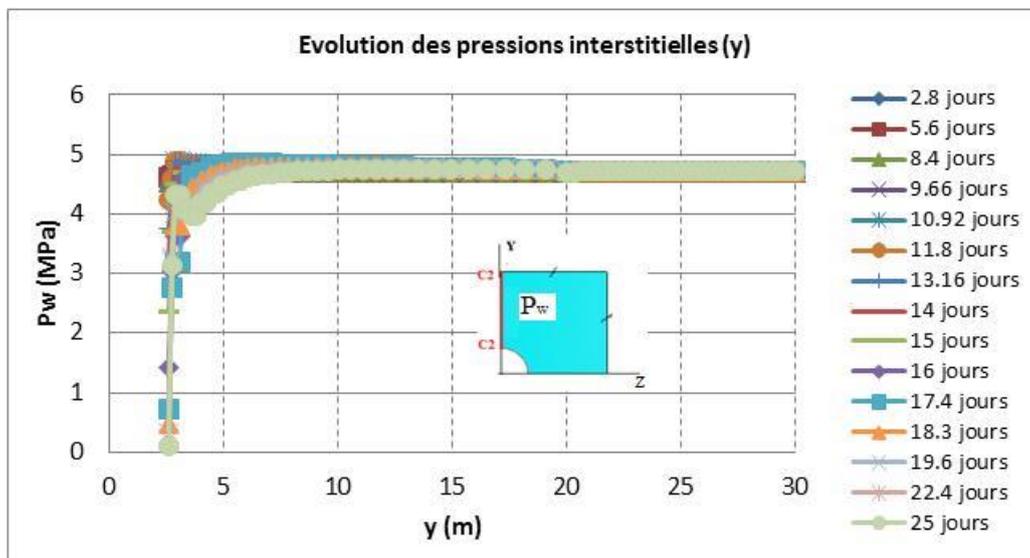


Figure IV-63 : Evolution des pressions interstitielles  $P_w$  suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 2

#### IV.4.3.2 Déplacements et déformations

Les évolutions des déplacements verticaux et déformations  $\epsilon_{yy}$  suivant l'axe Y sont présentées sur Figure IV-64 et Figure IV-65.

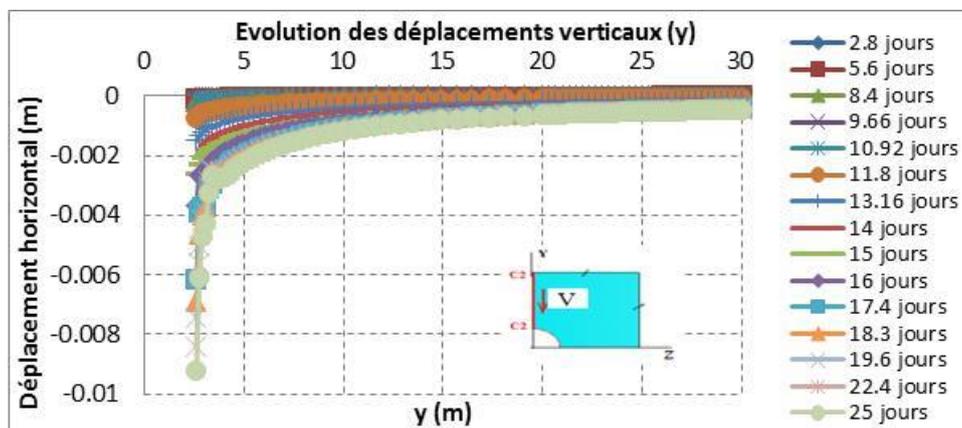


Figure IV-64 : Evolution des déplacements verticaux  $v$  suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 2

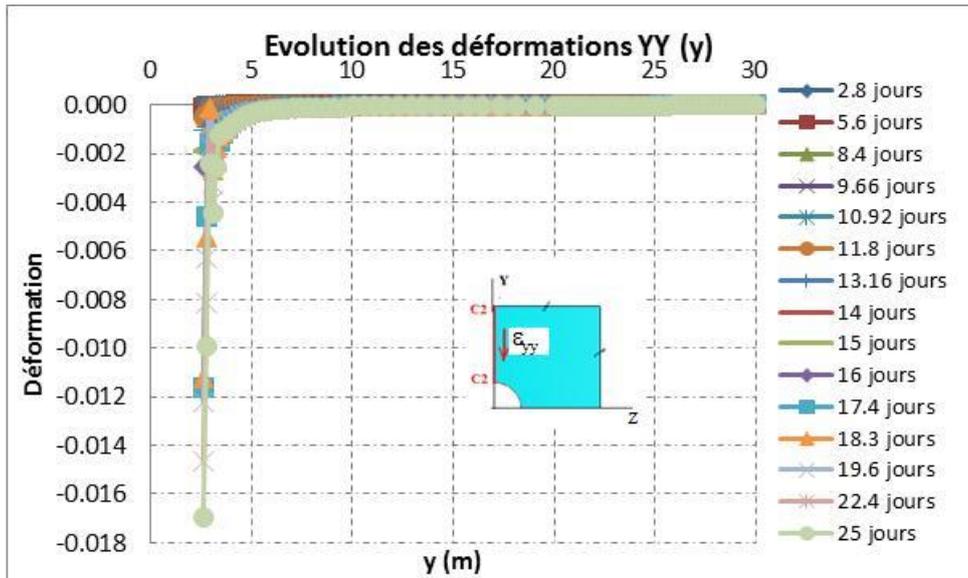


Figure IV-65 : Evolution des déformations  $\epsilon_{yy}$  suivant l'axe Y (coupe C2) au cours de l'excavation du test 2

#### IV.4.4 Evolution des valeurs suivant l'axe à 45° (coupe C3-C3)

##### IV.4.4.1 Contraintes

Figure IV-66 → Figure IV-74 présentent les évolutions des contraintes totales et contraintes effectives suivant la coupe C3-C3.

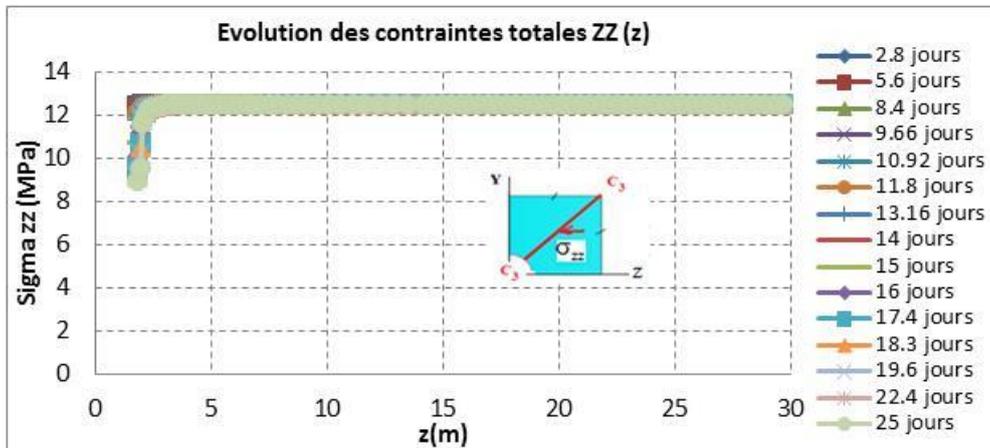


Figure IV-66 : Evolution des contraintes totales  $\sigma_{zz}$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2

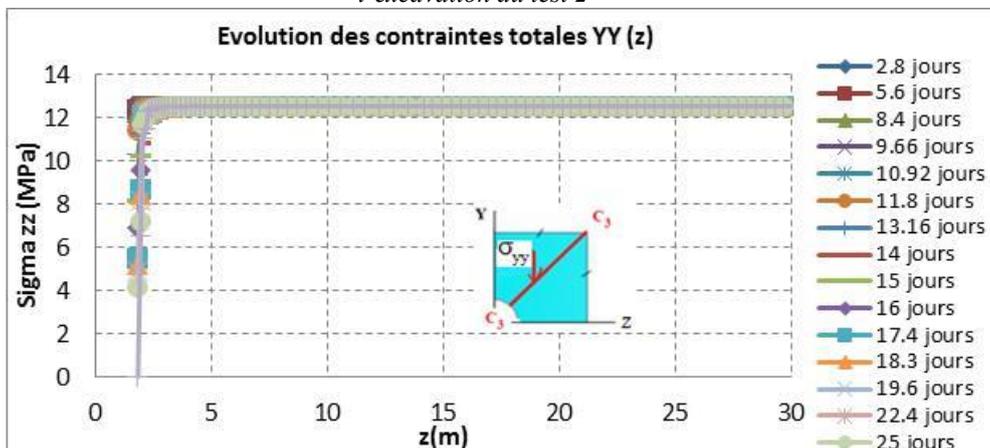


Figure IV-67 : Evolution des contraintes totales  $\sigma_{yy}$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2

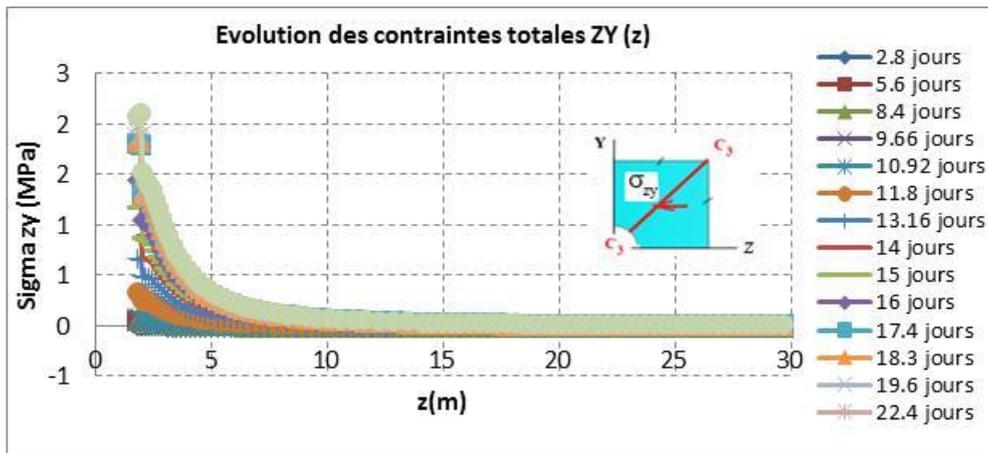


Figure IV-68 : Evolution des contraintes totales  $\sigma_{zy}$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2

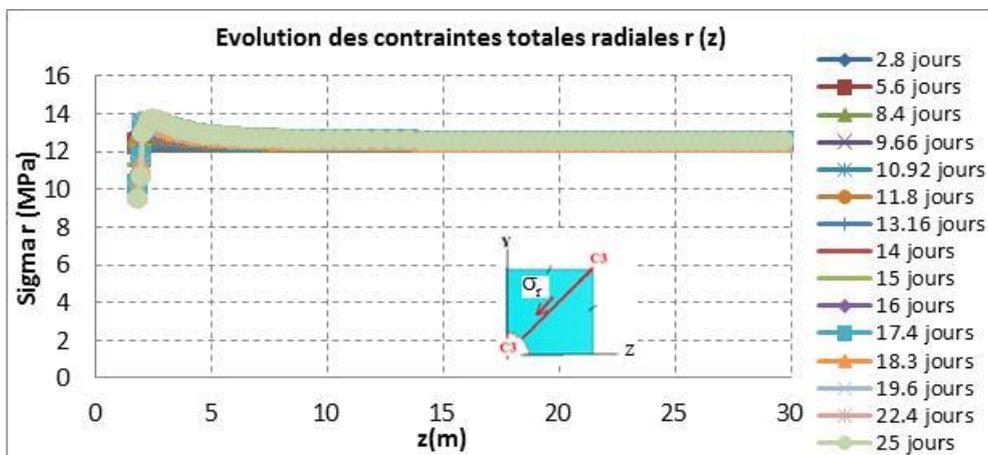


Figure IV-69 : Evolution des contraintes totales radiales  $\sigma_r$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2

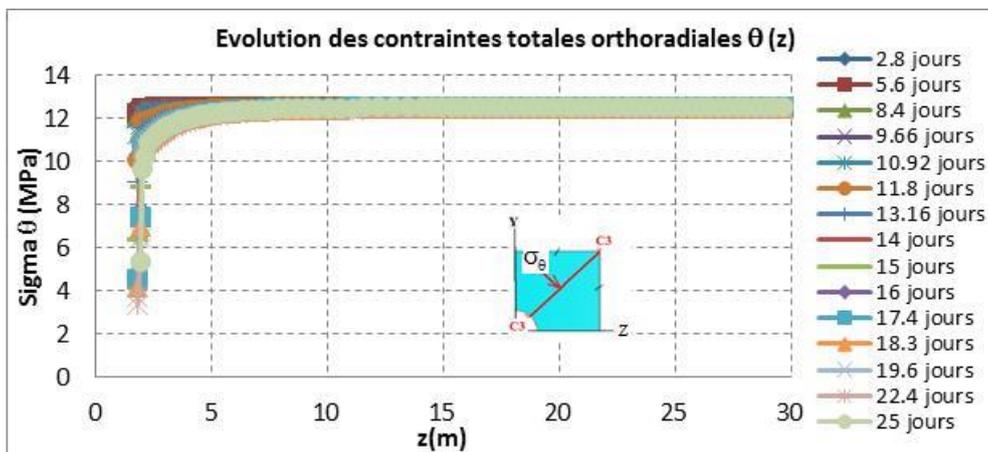


Figure IV-70 : Evolution des contraintes totales orthoradiales  $\sigma_{\theta}$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2

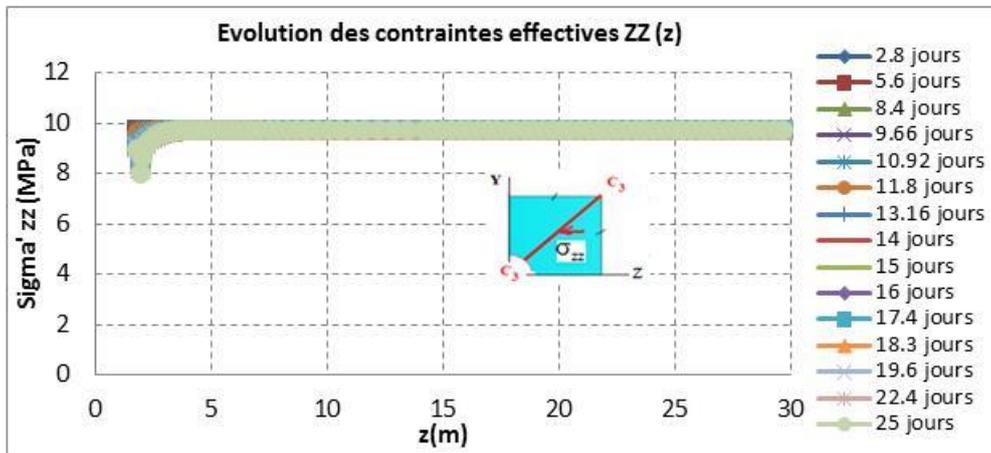


Figure IV-71 : Evolution des contraintes effectives  $\sigma'_{zz}$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2

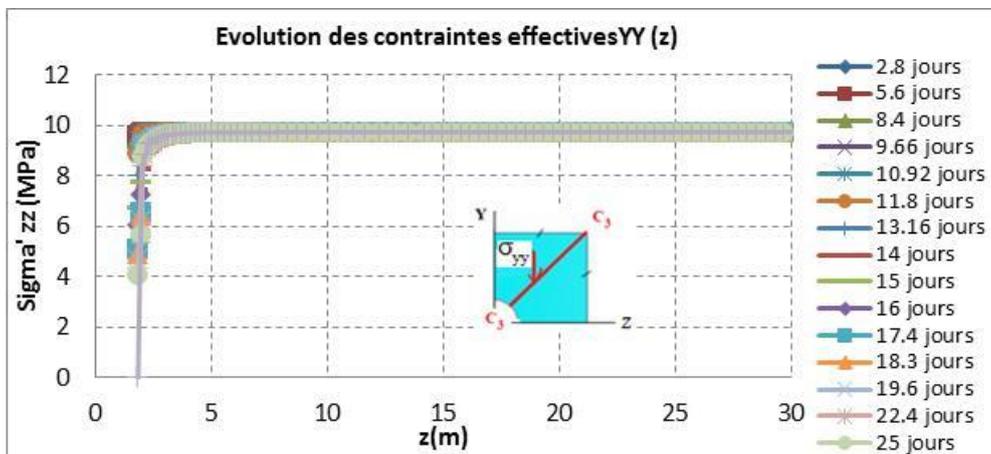


Figure IV-72 : Evolution des contraintes effectives  $\sigma'_{yy}$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2

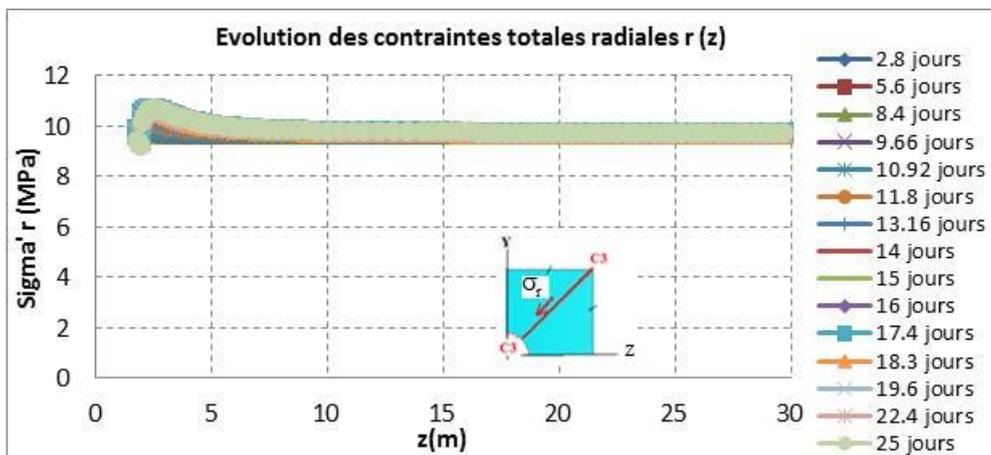


Figure IV-73 : Evolution des contraintes effectives radiales  $\sigma'_r$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2

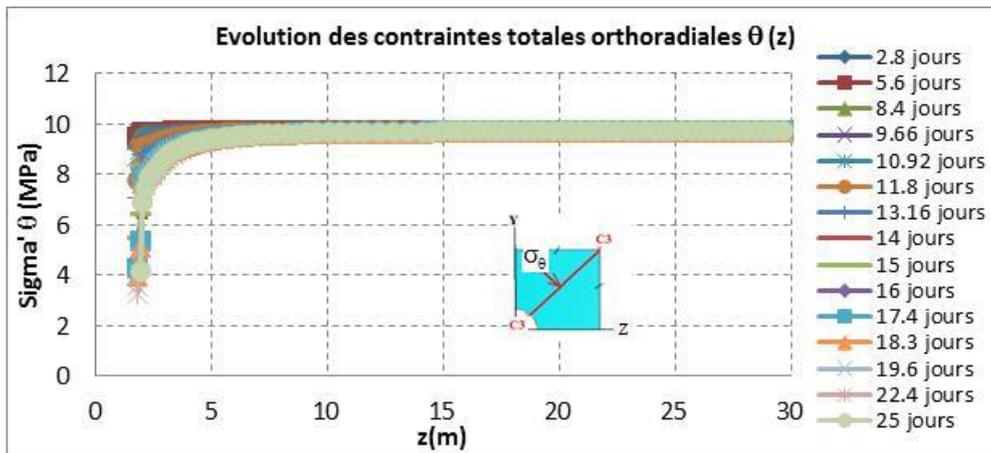


Figure IV-74 : Evolution des contraintes effectives orthoradiales  $\sigma'_{\theta}$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2

#### IV.4.4.2 Déplacements et déformations

Les évolutions des déplacements et déformations suivant la coupe C3-C3 sont présentées sur Figure IV-75 → Figure IV-80.

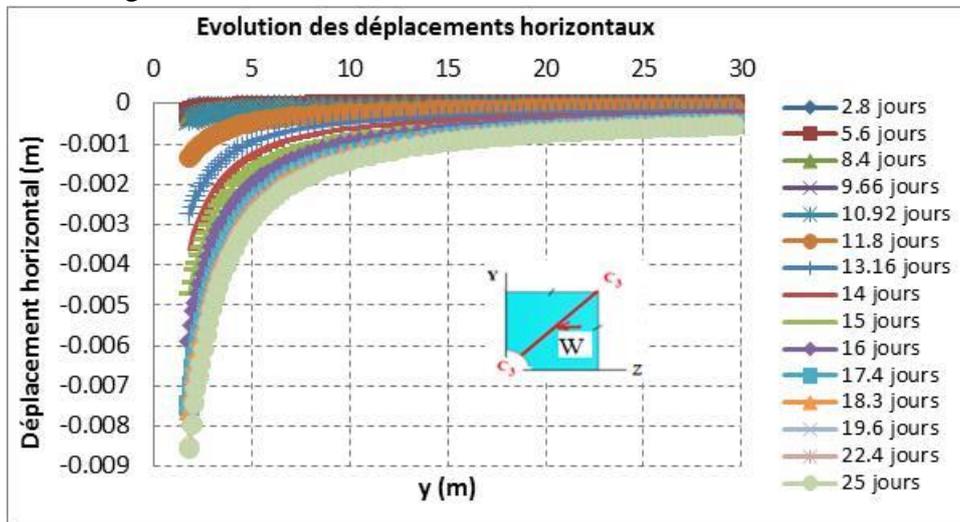


Figure IV-75 : Evolution des déplacements horizontaux  $w$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2

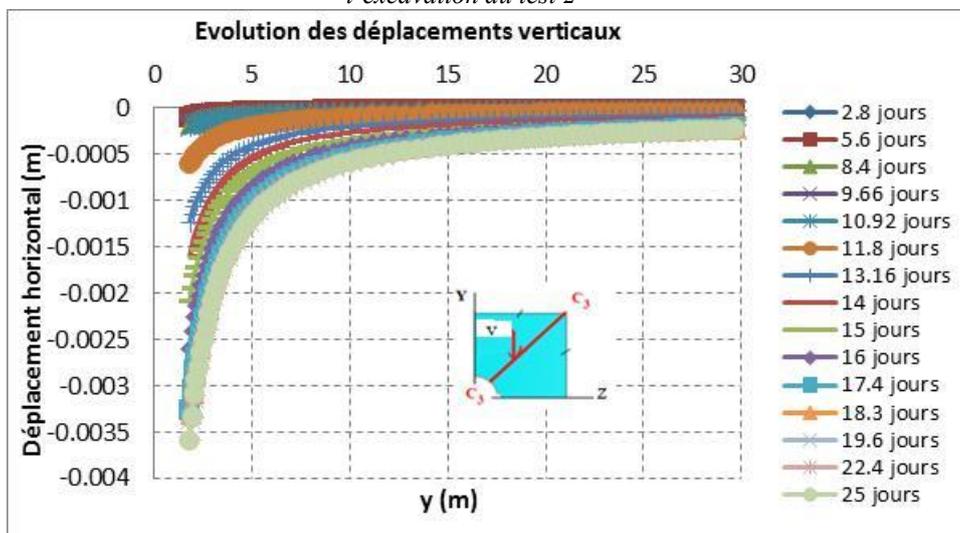


Figure IV-76 : Evolution des déplacements verticaux  $v$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2

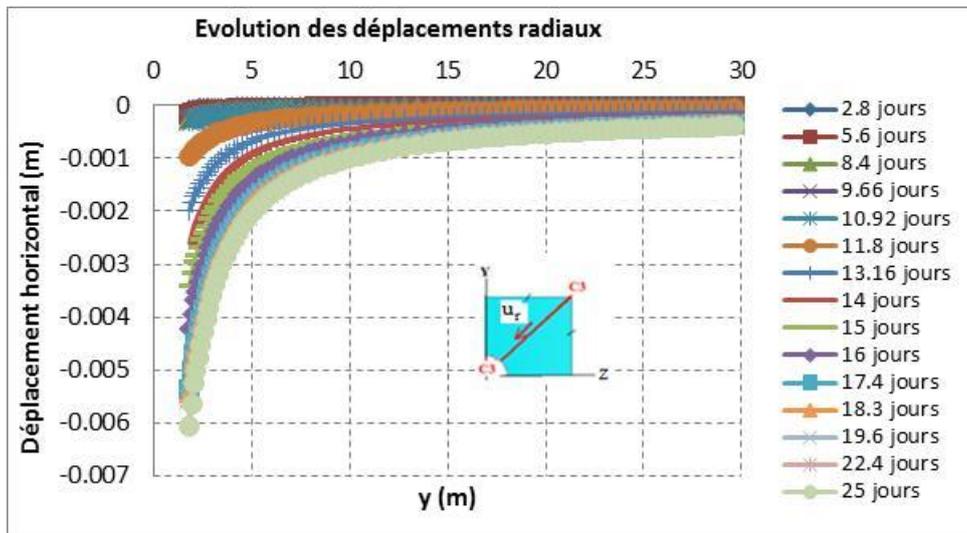


Figure IV-77 : Evolution des déplacements radiaux  $u_r$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2

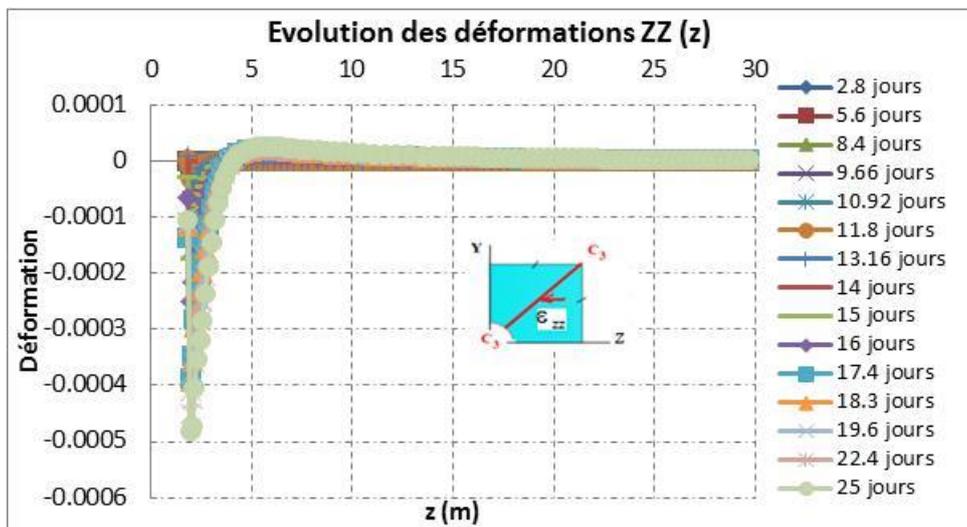


Figure IV-78 : Evolution des déformations  $\epsilon_{zz}$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2

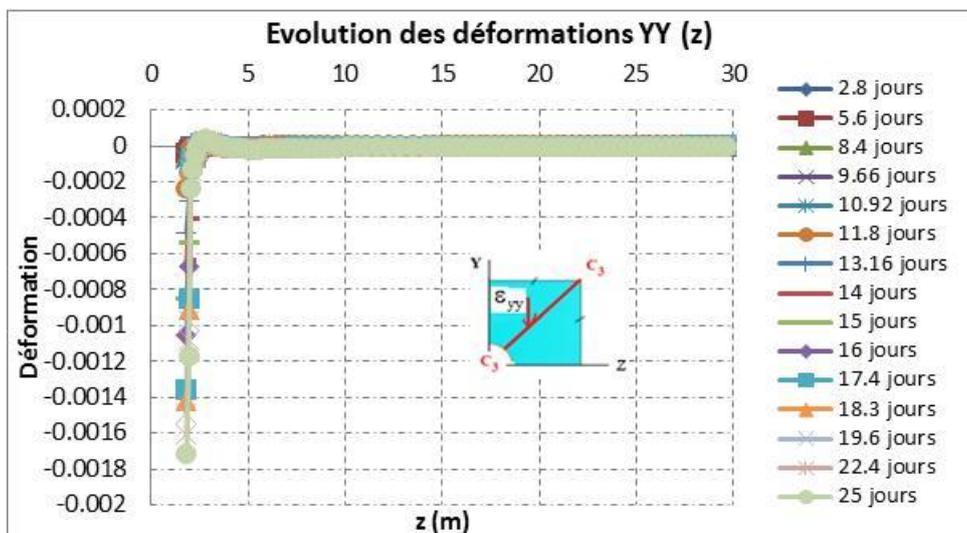


Figure IV-79 : Evolution des déformations  $\epsilon_{yy}$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2

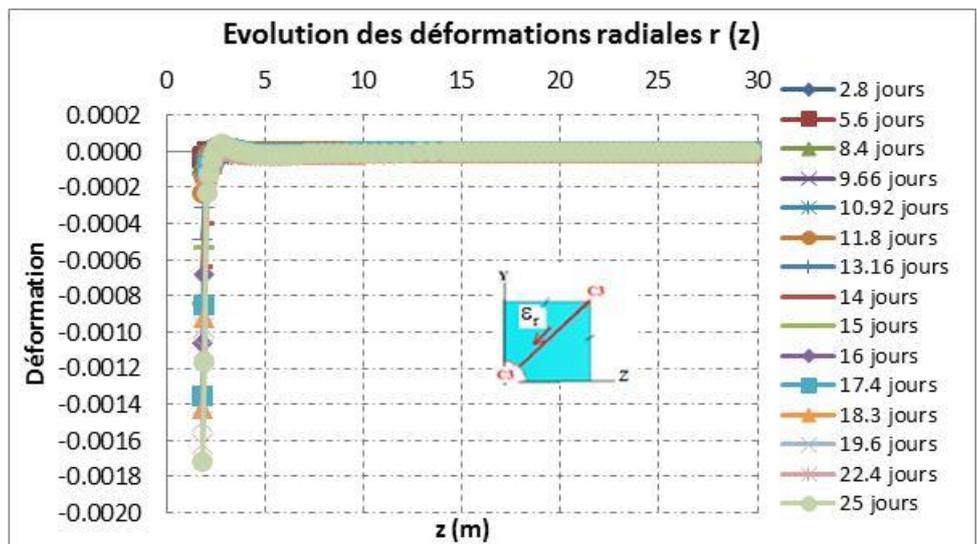


Figure IV-80 : Evolution des déformations radiales  $\epsilon_r$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2

#### IV.4.5 Evolution des coefficients d'endommagement du test 2

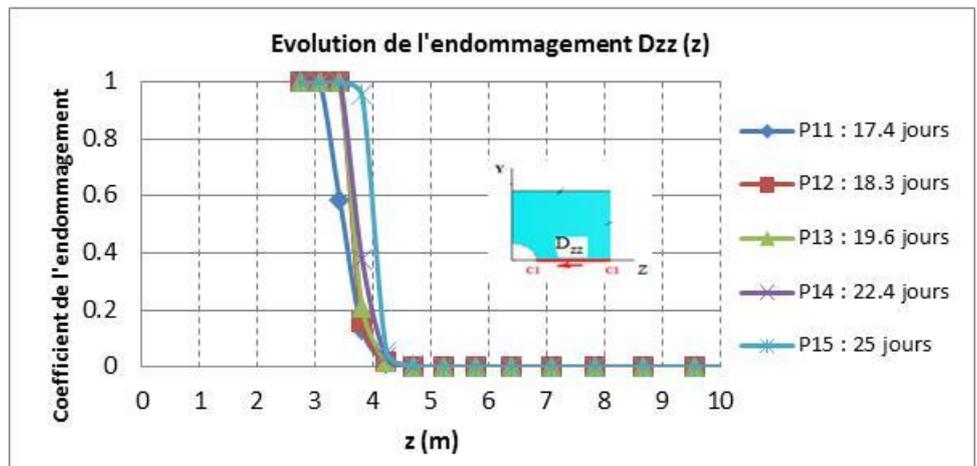


Figure IV-81 : Evolution des coefficients d'endommagement  $D_{zz}$  suivant la coupe C1-C1 au cours de l'excavation du test 2 (phases 11-15)

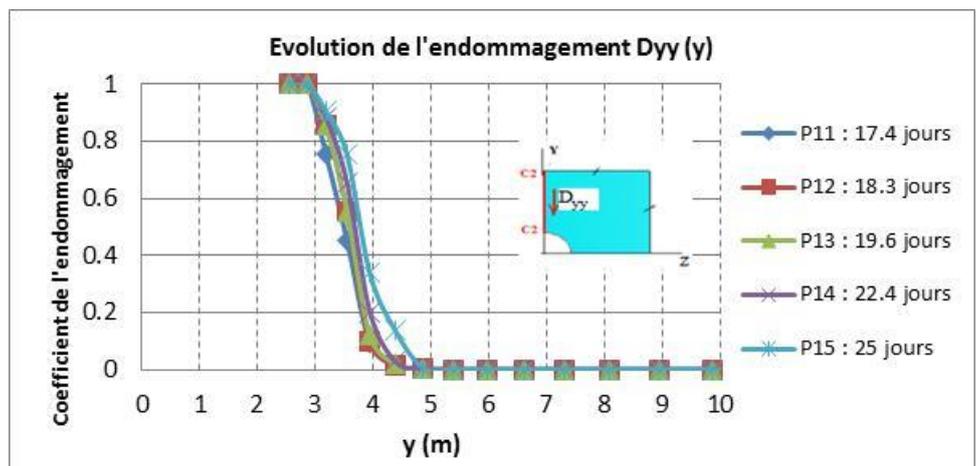


Figure IV-82 : Evolution des coefficients d'endommagement  $D_{yy}$  suivant la coupe C2-C2 au cours de l'excavation du test 2 (phases 11-15)

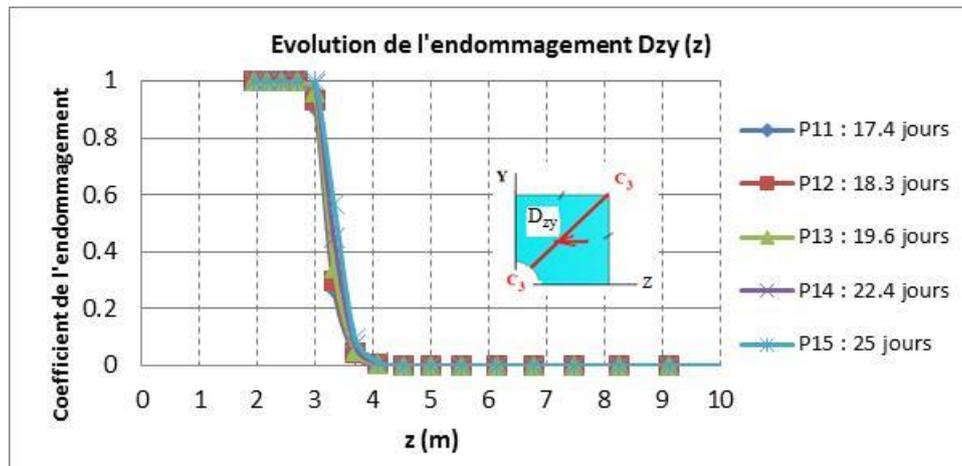


Figure IV-83 : Evolution des coefficients d'endommagement  $D_{zy}$  suivant la coupe C3-C3 au cours de l'excavation du test 2 (phases 11-15)

#### IV.4.6 Conclusion

L'évolution spatio-temporelle des zones endommagées fracturées est obtenue lorsque les coefficients d'endommagement sont égaux 1 cf. Figure IV-84.

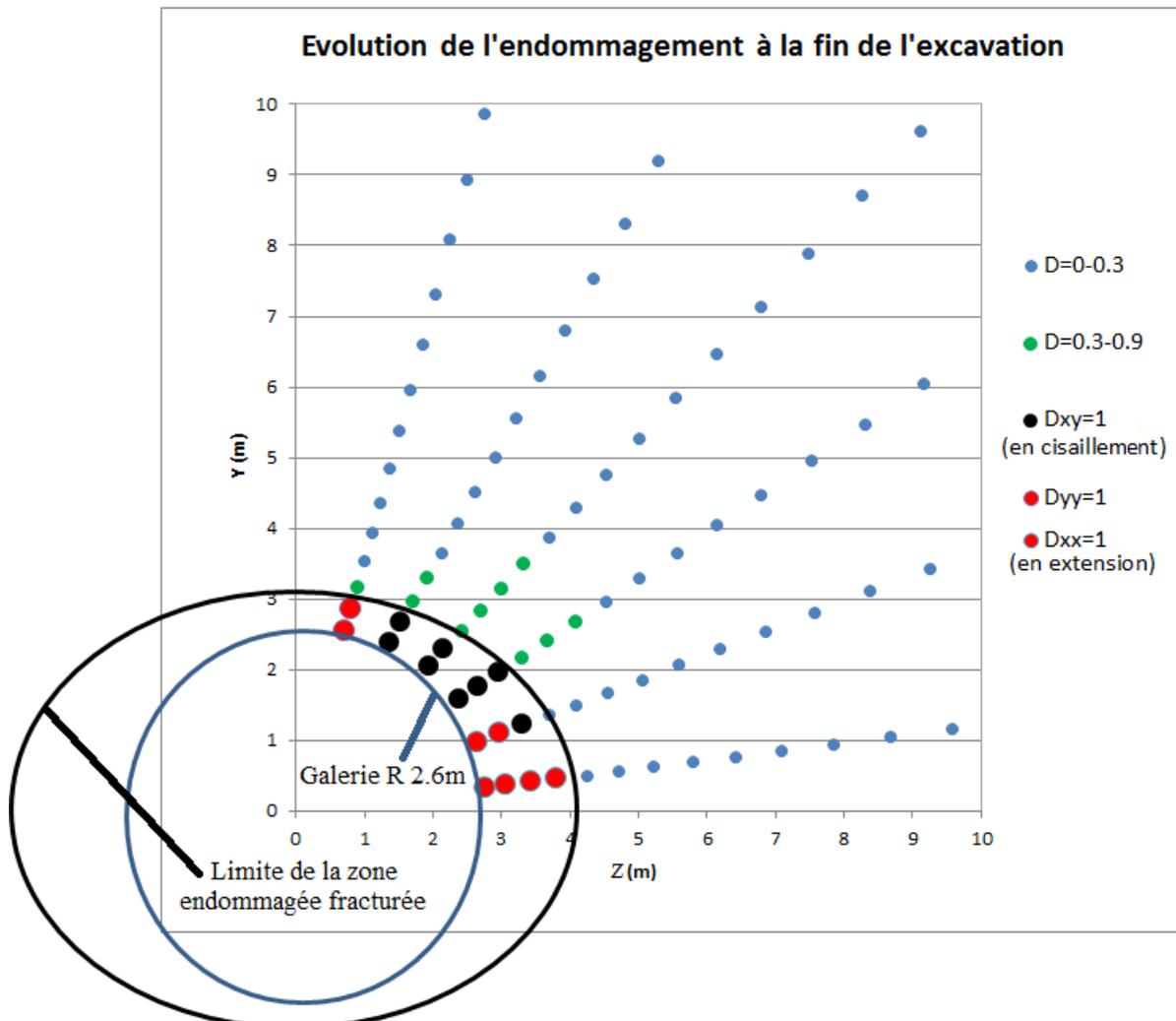


Figure IV-84 : Surface limite de forme elliptique de la zone endommagée fracturée pour des galeries orientées dans la direction grand H

Figure IV-85 présente la zone endommagée fracturée pour laquelle les coefficients d'endommagement sont unitaires. Cette zone est caractérisée par un ensemble de discontinuités d'extension horizontales, verticales et de cisaillement dont les directions correspondent aux distorsions maximales. La surface enveloppe de cette zone est elliptique avec un grand axe horizontal d'environ 8 m et un petit axe de 6 m.

Figure IV-86 montre que les discontinuités observées in situ sont en bonne accord avec celles obtenues de la modélisation.

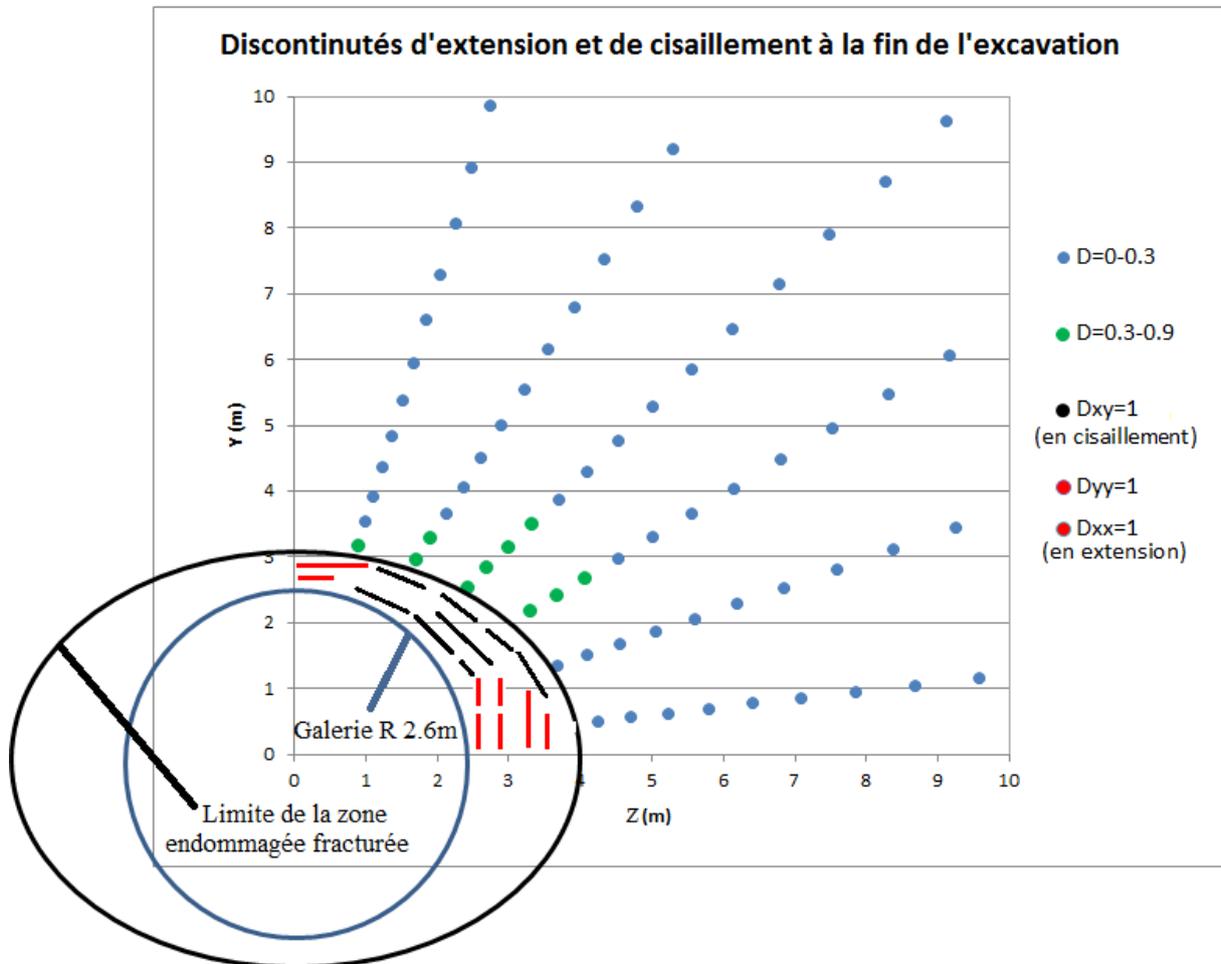


Figure IV-85 : Les discontinuités dans la zone endommagée fracturée pour des galeries orientées dans la direction H

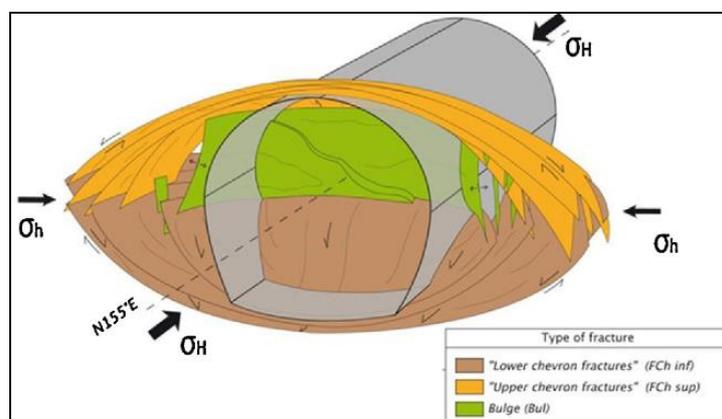


Figure IV-86 : Les discontinuités observées dans le laboratoire URL pour une galerie orientée dans la direction  $\sigma_H$  (Armand & al 2013)

## CHAPITRE V. APPLICATION DU MODELE SC2D A L'OBSERVATION DES EFFETS DIFFERES AUTOUR DES OUVRAGES APRES L'EXCAVATION

*Les observations dans le laboratoire souterrain Meuse Haute Marne ont mis en évidence que les effets différés étaient principalement gouvernés par les zones endommagées fracturées entourant les ouvrages.*

*Les effets différés dans le modèle rhéologique SC2D sont représentés par les vecteurs vitesses de déformation. Les amplitudes de ces vecteurs sont gouvernées par les niveaux d'endommagement et les déviateurs des contraintes :  $V_{ij}^{vis} = A \times \frac{D_{ij}}{1 + \frac{D_{ij}}{0.5}} \times \frac{s_{ij} - s_0}{p_{moy}} \times \frac{1}{1+t}$ .*

*Le travail dans ce chapitre présente des résultats de convergence de la galerie après la phase d'excavation pour deux cas de tunnel*

- *orienté selon la contrainte horizontale mineure (direction petit h-test1)*
- *orienté selon la contrainte horizontale majeure (direction grand H-test2)*

## V.1 CALAGE DES PARAMETRES DE VISCOSITE

L'objet principal de cette partie amont est d'évaluer la capacité du modèle SC2D implémenté dans CLEO à décrire les effets différés autour des ouvrages après l'excavation .

Le modèle rhéologique s'exprime sous la forme :

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^{vis}$$

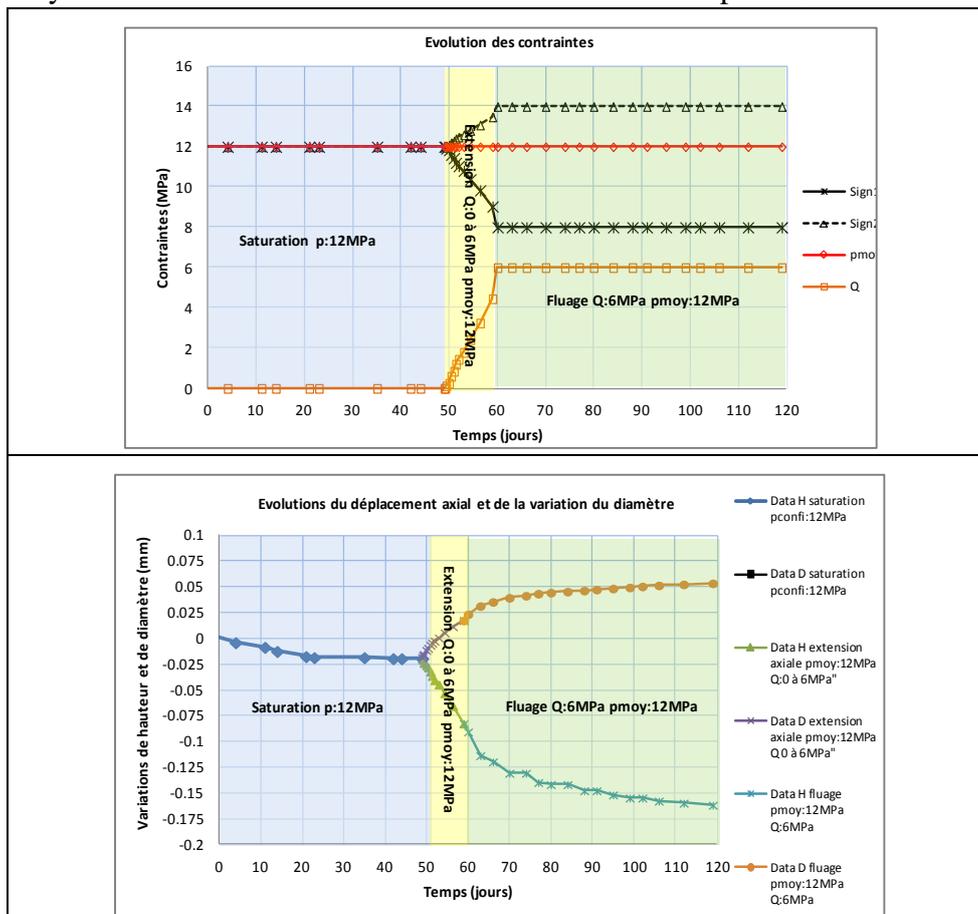
$$\text{Posons } \varepsilon_{ij}^{vis} = A \cdot \frac{D_{ij}}{1 + \frac{D_{ij}}{0.5}} \cdot \frac{s_{ij} - s_0}{p_{moy}} \cdot \text{Ln}(1 + t) = V_{ij} dt$$

Alors, la vitesse  $V_{ij}$  de déformation en fonction du niveau d'endommagement et du déviateur de contrainte s'exprime sous la forme

$$V_{ij}^{vis} = A \times \frac{D_{ij}}{1 + \frac{D_{ij}}{0.5}} \times \frac{s_{ij} - s_0}{p_{moy}} \times \frac{1}{1 + t}$$

### V.1.1 Sur les essais de fluage dans la direction perpendiculaire à la stratification $\sigma_v$ et dans la direction de la contrainte majeure

Figure V-1 présente les résultats de l'essai mixte saturation-extension axiale et fluage à pression moyenne de 12MPa sous un déviateur de 6MPa réalisé par EGC.



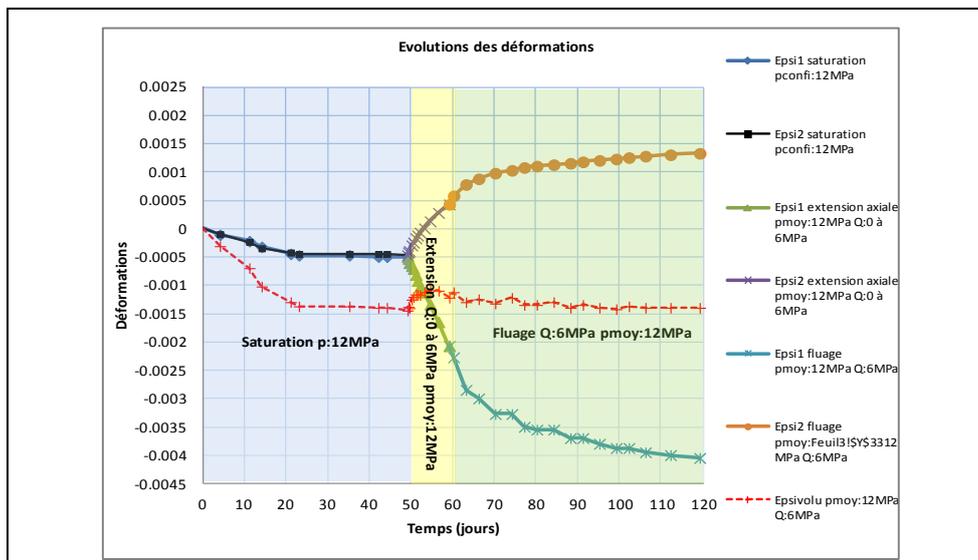


Figure V-1 : Résultat de l'essai mixte saturation – extension axiale sur chemin à pression moyenne constante de 12MPa et fluage sous déviateur de 6 MPa perpendiculaire à la stratification

A partir des comparaisons entre la modélisation et les essais de fluage, on peut prendre la valeur de  $A=0.015$  pour évaluer le comportement différé de l'argilite saturé cf. Figure V-2.

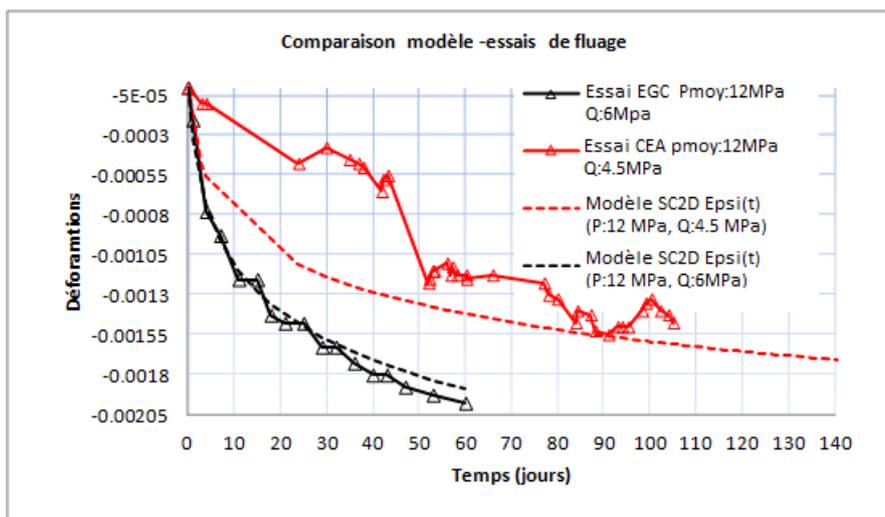
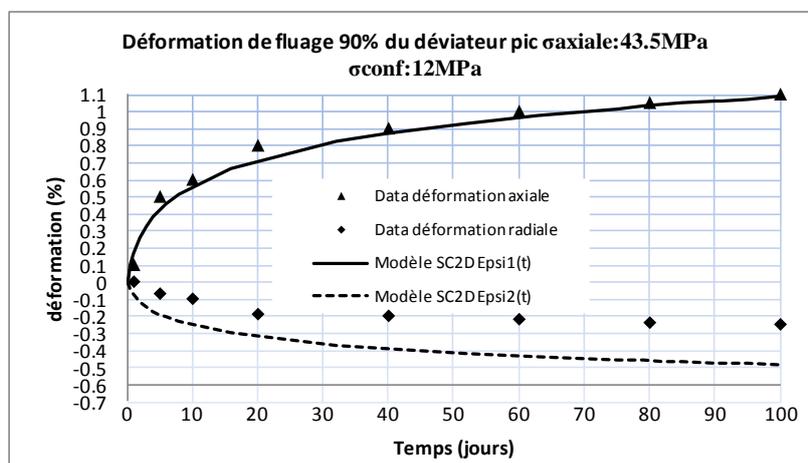


Figure V-2 : Comparaison entre le modèle SC2D et les essais de fluage (EGC et CEA).

Par ailleurs, pour le cas de l'argilite partiellement saturé, la valeur de  $A=0.05$  permet de simuler les résultats des essais de fluage cf. Figure V-3.



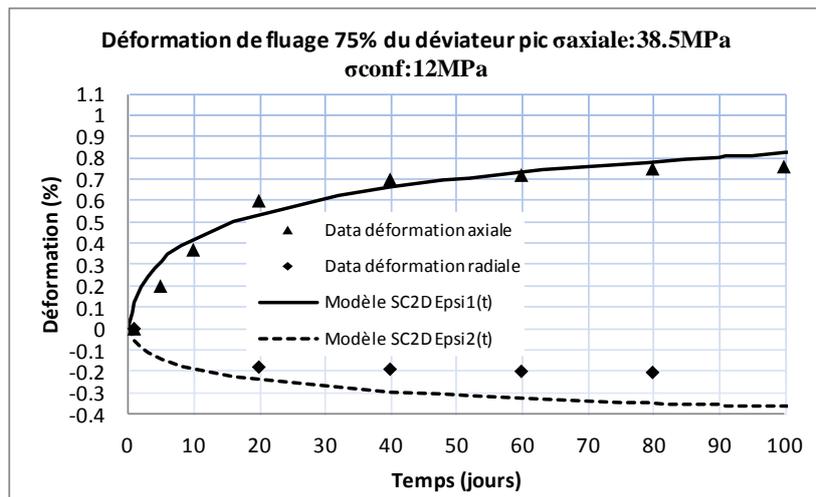


Figure V-3 : Comparaison entre le modèle SC2D et les essais du LAEGO sur des chemins de chargement triaxiaux pour  $H_r$  : 90% et 75% du déviateur de pic

### V.1.2 Application du modèle de viscosité aux mesures de convergence de la galerie orientée dans la direction horizontale majeure $\sigma_H$

Le modèle SC2D considère que les effets différés sont gouvernés par l'amplitude de l'endommagement et du déviateur de contrainte  $s$  par rapport au déviateur initial  $s_0$  traduisant l'anisotropie des contraintes initiales.

Les paramètres de viscosité reprennent ceux déduits des essais de fluage sur échantillons à l'état partiellement saturé.

$$V_z = 0.05 \times \frac{(s_z - s_{z0})}{p_{moy}} \times \frac{D_z}{1 + \frac{D_z}{0.5}} \times \frac{1}{1 + t}$$

$\overline{V_{z-y}}$  :

$$V_y = 0.05 \times \frac{(s_y - s_{y0})}{p_{moy}} \times \frac{D_y}{1 + \frac{D_y}{0.5}} \times \frac{1}{1 + t}$$

#### V.1.2.1 Cas de la convergence verticale

On observe sur Figure V-4 une bonne évaluation des convergences verticales obtenues avec le calage des paramètres de viscosité-gonflement sur l'essai de fluage sur échantillon.

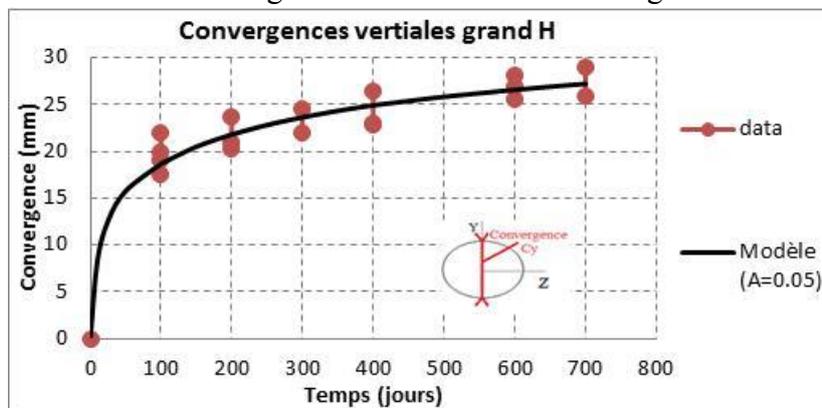


Figure V-4 : Comparaison des convergences  $C_y$  entre le modèle et les résultats in situ de la galerie orientée  $\sigma_H$

### V.1.2.2 Cas de la convergence horizontale

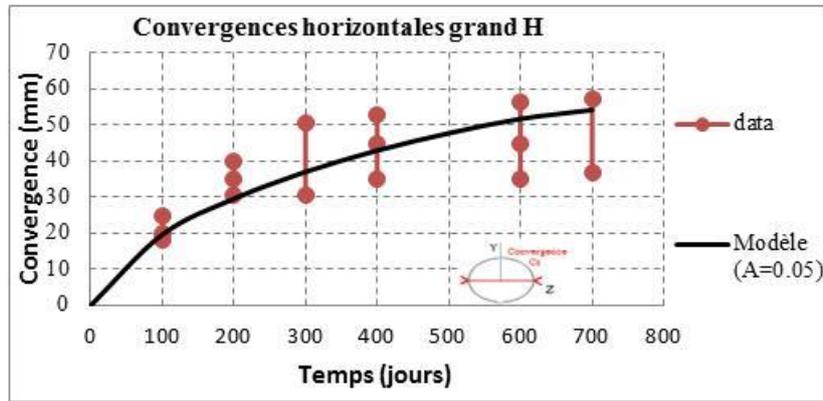


Figure V-5 : Comparaison des convergences Cz entre le modèle et les résultats in situ de la galerie orientée  $\sigma_H$

Il y a donc une bonne évaluation des convergences horizontales obtenues avec le calage des paramètres de viscosité-gonflement sur l'essai de fluage sur échantillon.

On prend la valeur de  $A=0.05$  pour l'argilite partiellement saturé pour simuler les déformations visqueuses dans ce cas.

Ainsi les composantes de la vitesse de déformation dans le plan X-Y  $\sigma_H$ - $\sigma_V$  s'expriment sous la forme :

$$\begin{aligned} V_z &= 0.05 \times \frac{(s_z - s_{z0})}{p_{moy}} \times \frac{D_z}{1 + \frac{D_z}{0.5}} \times \frac{1}{1+t} \\ \overrightarrow{V_{Z-Y}} : \\ V_y &= 0.05 \times \frac{(s_y - s_{y0})}{p_{moy}} \times \frac{D_y}{1 + \frac{D_y}{0.5}} \times \frac{1}{1+t} \end{aligned} \quad (V-1)$$

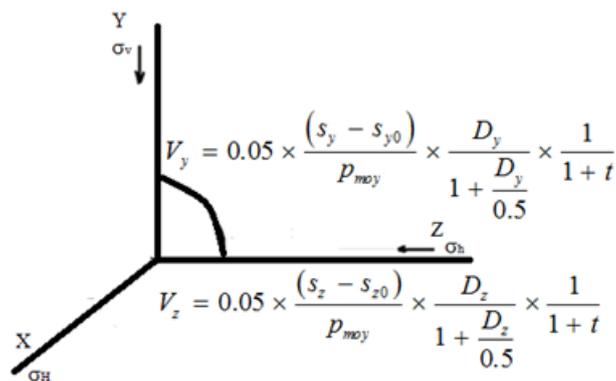


Figure V-6 : Les vitesses de déformation dans le plan YZ pour des ouvrages orientés dans la direction  $\sigma_H$

### V.1.3 Application du modèle de viscosité aux mesures de convergence de la galerie orientée dans la direction horizontale mineure $\sigma_h$

Les paramètres de viscosité reprennent ceux déduits des essais de fluage sur échantillons à l'état partiellement saturé.

$$V_z = 0.05 \times \frac{(s_z - s_{z0})}{p_{moy}} \times \frac{D_z}{1 + \frac{D_z}{0.5}} \times \frac{1}{1 + t}$$

$\vec{V}_{z-y}$  :

$$V_y = 0.05 \times \frac{(s_y - s_{y0})}{p_{moy}} \times \frac{D_y}{1 + \frac{D_y}{0.5}} \times \frac{1}{1 + t}$$

#### V.1.3.1 Cas de la convergence verticale

Figure V-7 présente la comparaison des convergences entre la modélisation et le résultat des mesures in situ de la galerie GED (Armand & al 2013). La bonne concordance entre le modèle et les mesures de convergence permet de retenir la quantification du vecteur vitesse de déformation dans la direction verticale pour des galeries orientées dans la direction  $\sigma_h$ .

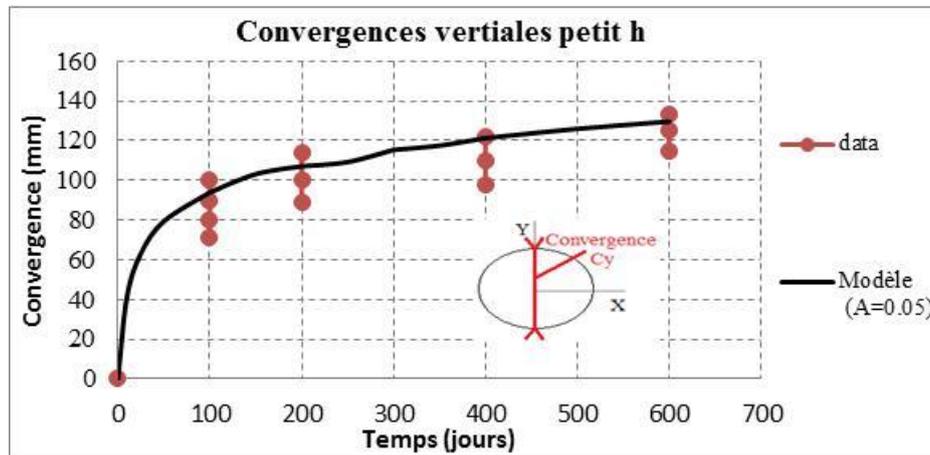


Figure V-7 : Comparaison des convergences  $C_y$  entre le modèle et les résultats in situ de la galerie orientée  $\sigma_h$

#### V.1.3.2 Cas de la convergence horizontale

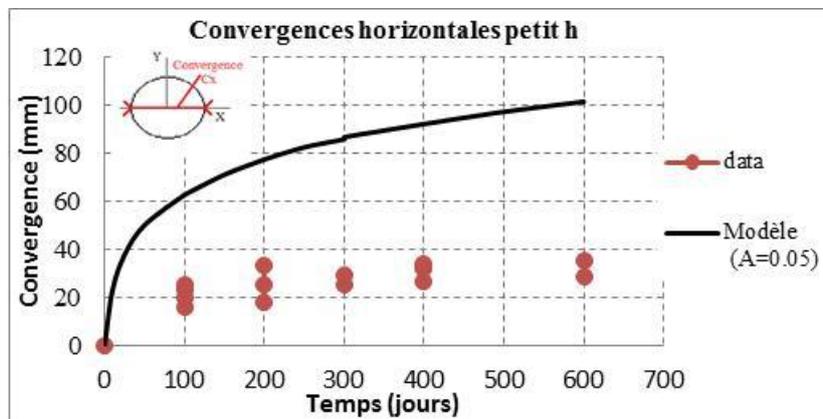


Figure V-8 : Comparaison des convergences  $C_x$  entre le modèle et les résultats in situ de la galerie orientée  $\sigma_h$

On constate que la convergence déduite à partir du modèle (A=0.05) est beaucoup plus grande que celle de l'essai de fluage sur échantillons. Cette augmentation peut être attribuée à un autre état hydrique de l'argilite en direction horizontale (état saturé). C'est-à-dire qu'il existe deux états de l'argilite dans ce cas.

En changeant le coefficient A équivalent de l'état saturé pour évaluer les vitesses de déformation cf. Figure V-9, on obtient une nouvelle vitesse de déformation permettant de reproduire les convergences observées sur la galerie orientée dans la direction horizontale.

$$V_x = 0.015 \times \frac{s_x - s_{x0}}{p_{moy}} \times \frac{D_x}{1 + \frac{D_x}{0.5}} \times \frac{1}{1 + t}$$

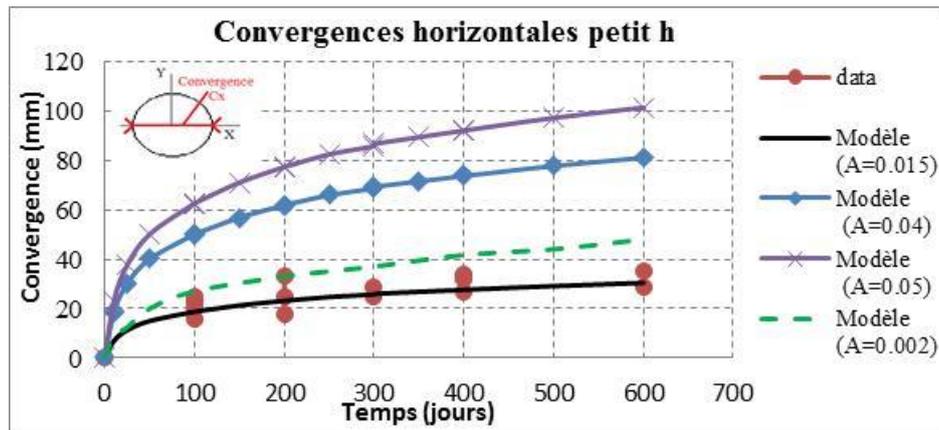


Figure V-9 : Etude paramétrique des vitesses de déformation réduites par le boulonnage

Ainsi les composantes de la vitesse de déformation dans le plan X-Y  $\sigma_H$ - $\sigma_V$  s'expriment sous la forme :

$$\overrightarrow{V_{X-Y}} : \begin{cases} V_x = 0.015 \times \frac{(s_x - s_{x0})}{p_{moy}} \times \frac{D_x}{1 + \frac{D_x}{0.5}} \times \frac{1}{1 + t} \\ V_y = 0.05 \times \frac{(s_y - s_{y0})}{p_{moy}} \times \frac{D_y}{1 + \frac{D_y}{0.5}} \times \frac{1}{1 + t} \end{cases} \quad (V-2)$$

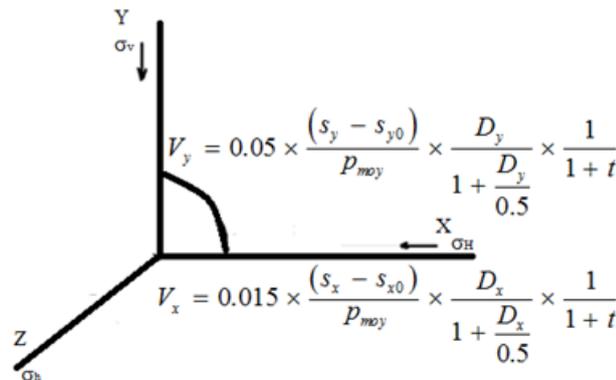


Figure V-10 : Les vitesses de déformation dans le plan XY pour des ouvrages orientés dans la direction  $\sigma_h$

## V.2 SIMULATION DE L'EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DES DEFORMATIONS DIFFEREES DU TEST 1

### V.2.1 Simulation de l'évolution spatio-temporelle des déformations

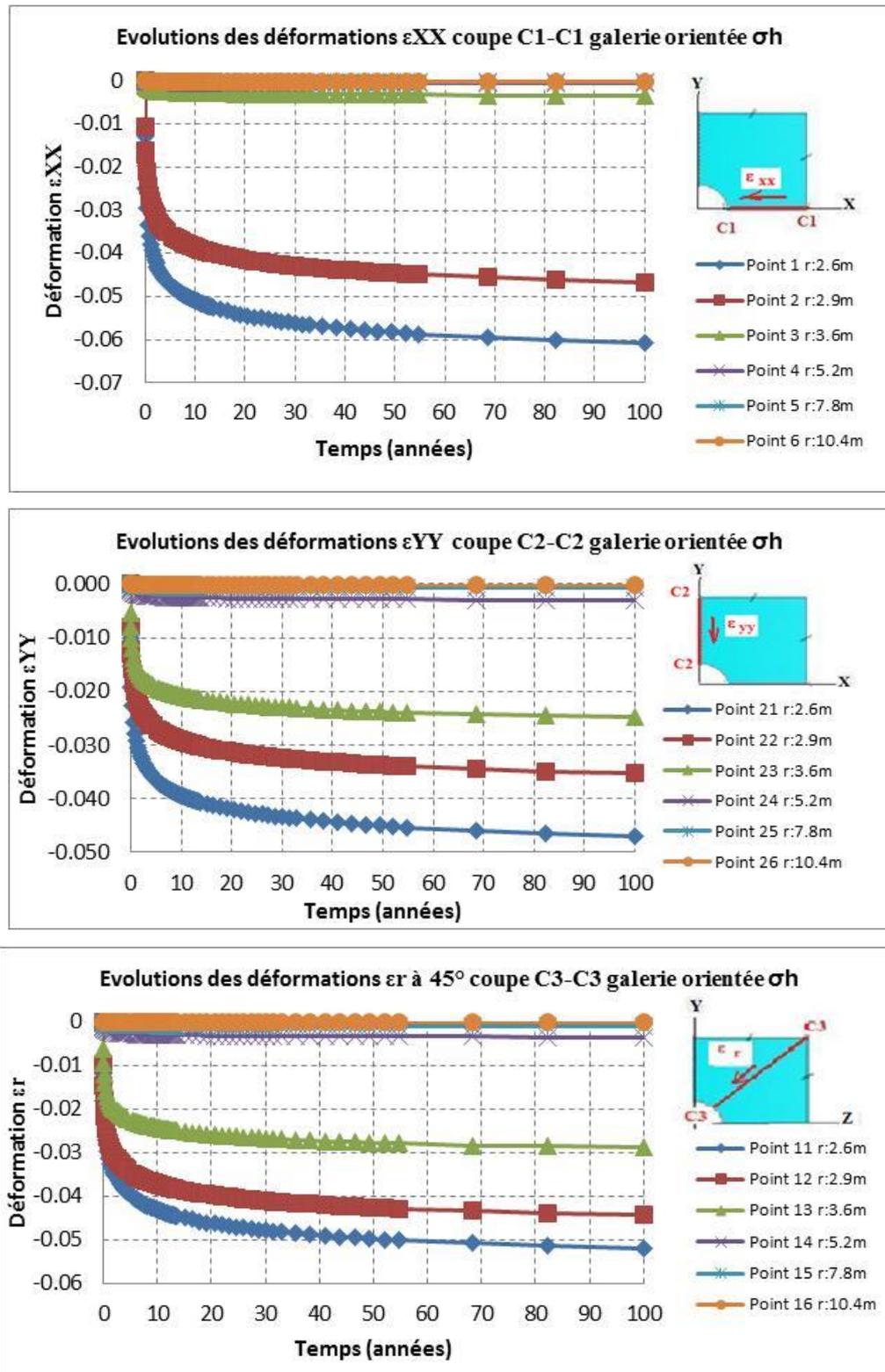


Figure V-11 : Evolutions spatio-temporelles des déformations pour différents points suivant 3 coupes d'une galerie orientée  $\sigma_h$  (test1)

## V.2.2 Simulation de l'évolution spatio-temporelle des déplacements et convergences

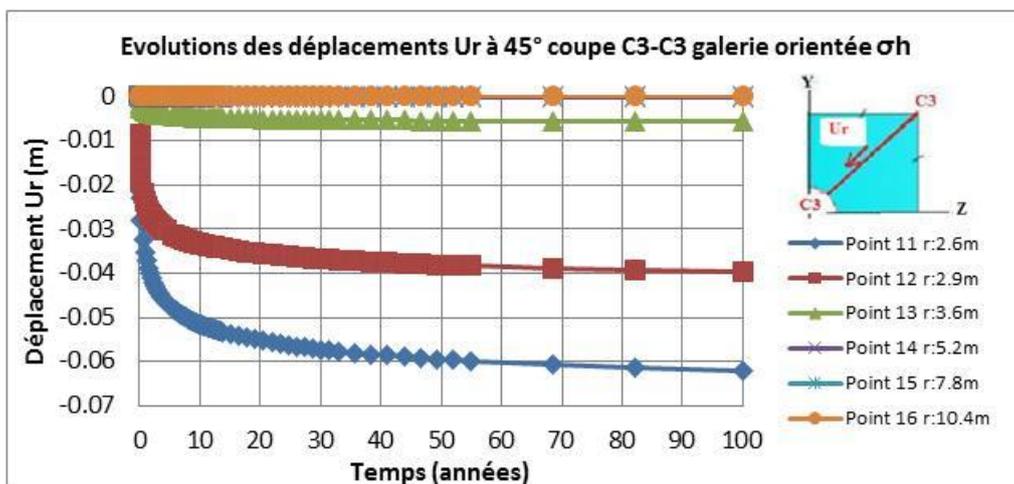
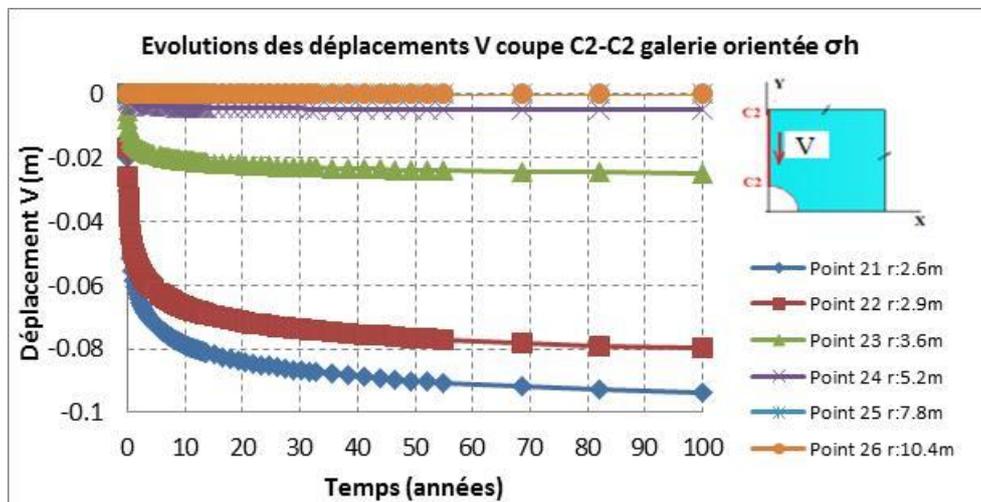
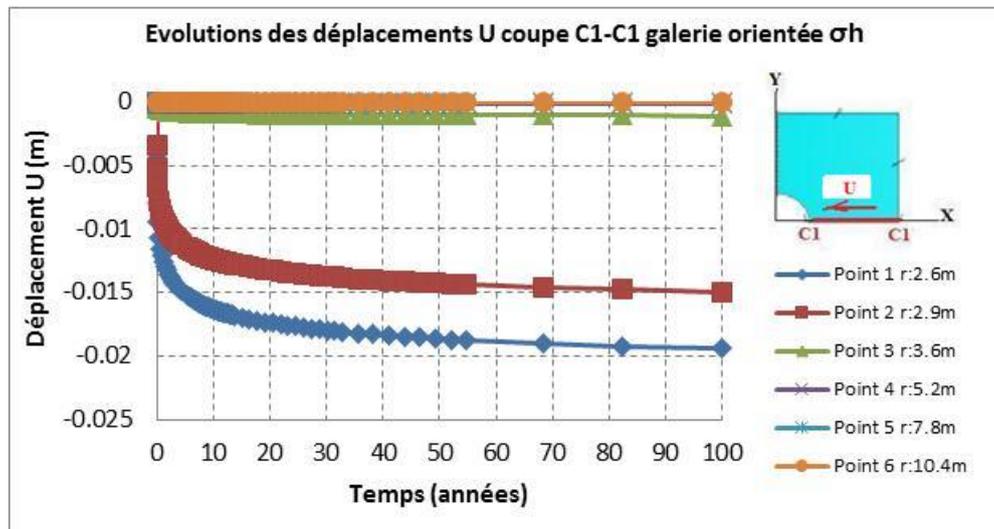


Figure V-12 : Evolutions spatio-temporelles des déplacements pour différents points suivant 3 coupes d'une galerie orientée  $\sigma_h$  (test1)

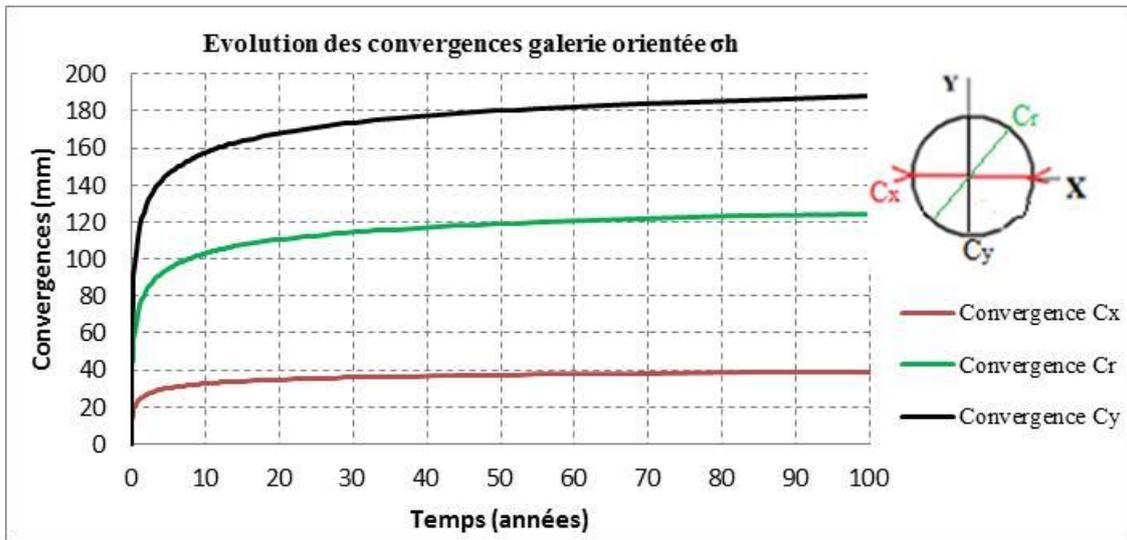
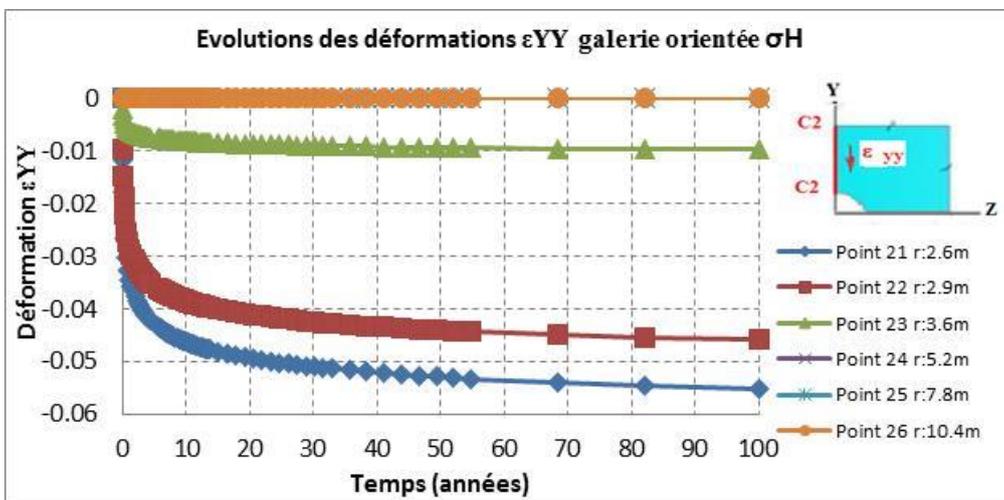
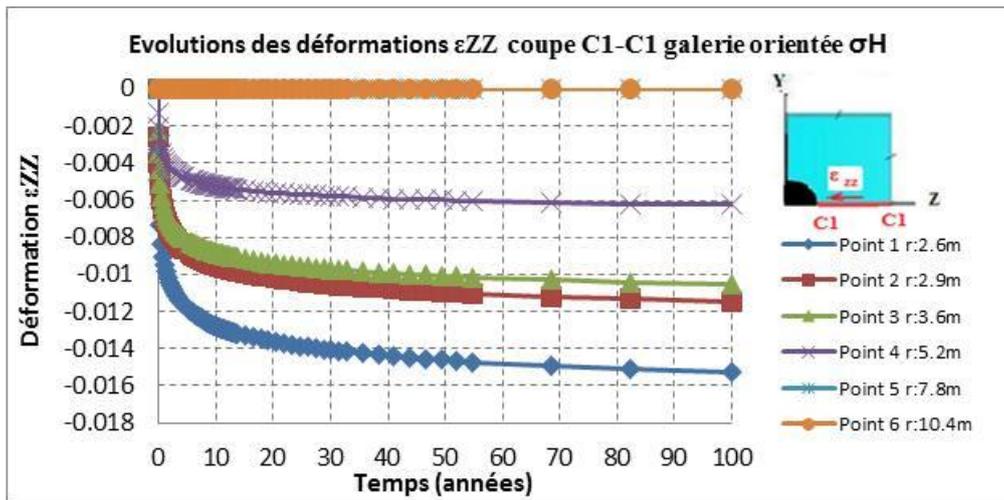


Figure V-13 : Convergences aux points en paroi d'une galerie orientée suivant  $\sigma_H$  (test1)

### V.3 SIMULATION DE L'EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DES DEFORMATIONS DIFFEREES DU TEST 2

#### V.3.1 Simulation de l'évolution spatio-temporelle des déformations



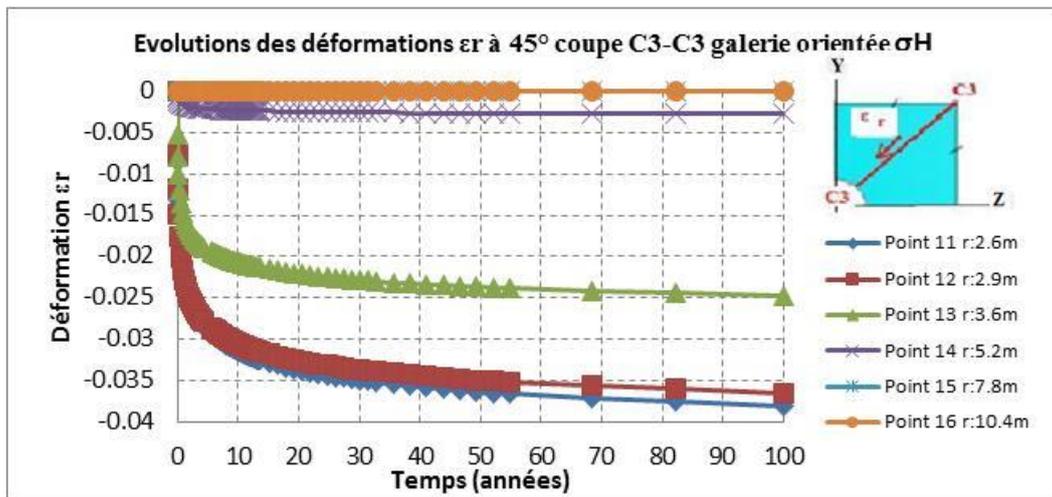
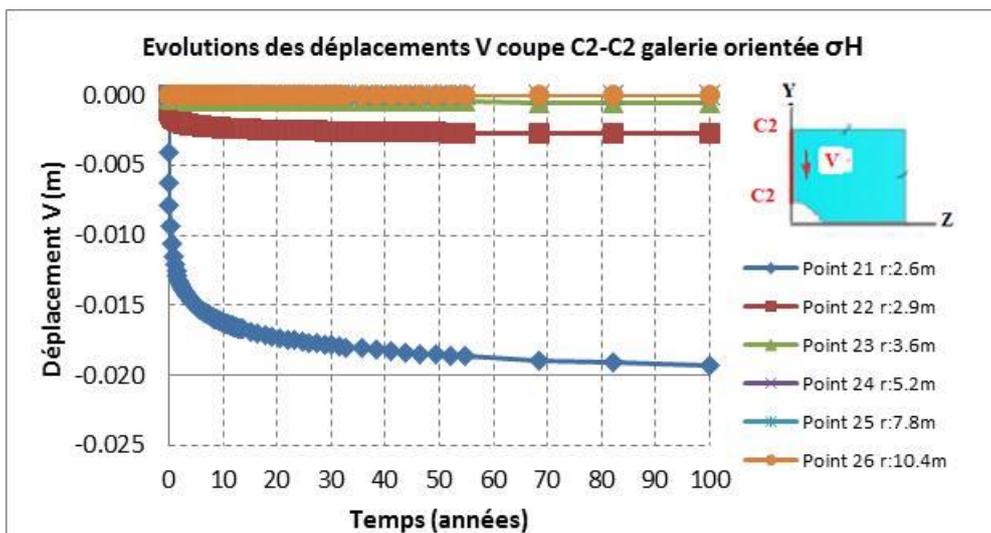
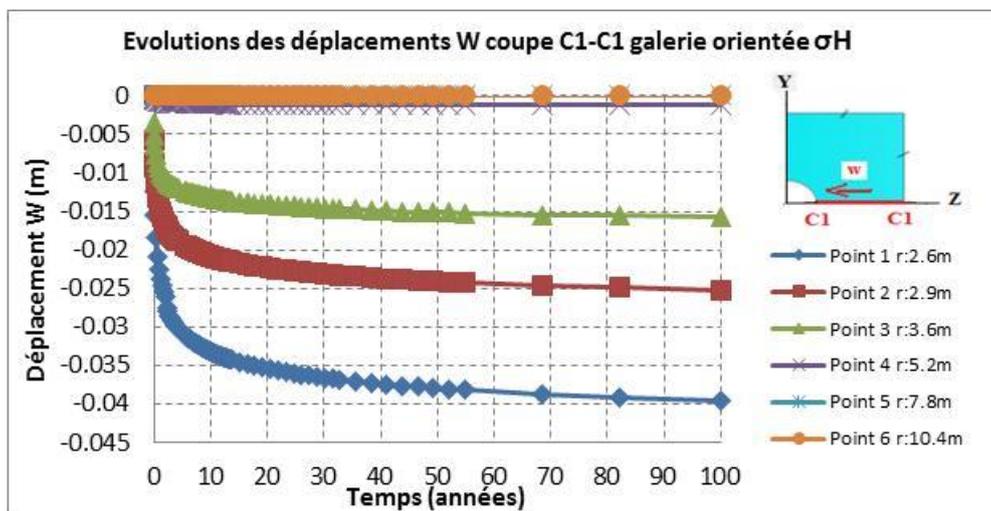


Figure V-14 : Evolutions spatio-temporelles des déformations pour différents points suivant 3 coupes d'une galerie orientée  $\sigma_H$  (test2)

### V.3.2 Simulation de l'évolution spatio-temporelle des déplacements et convergences



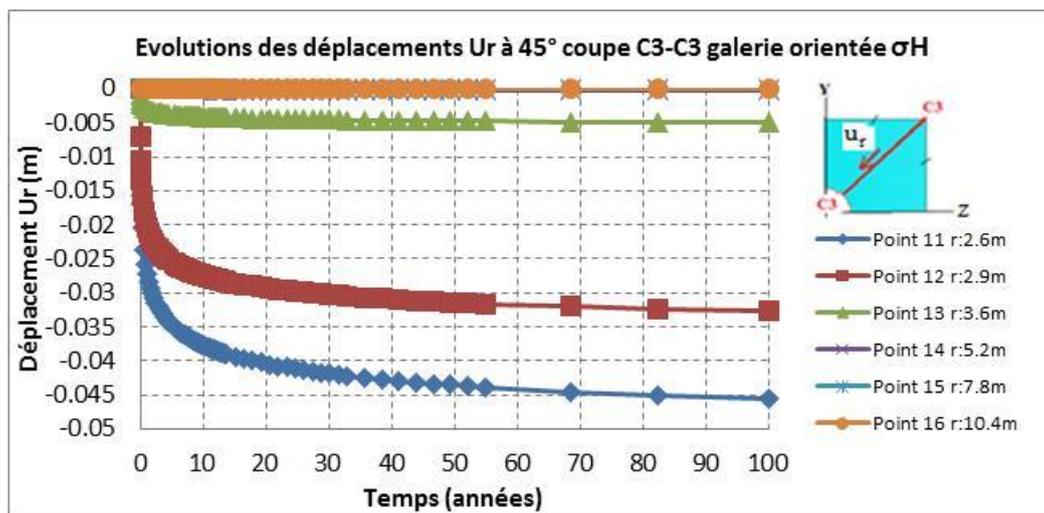


Figure V-15 : Evolutions spatio-temporelles des déplacements pour différents points suivant 3 coupes d'une galerie orientée  $\sigma_H$  (test2)

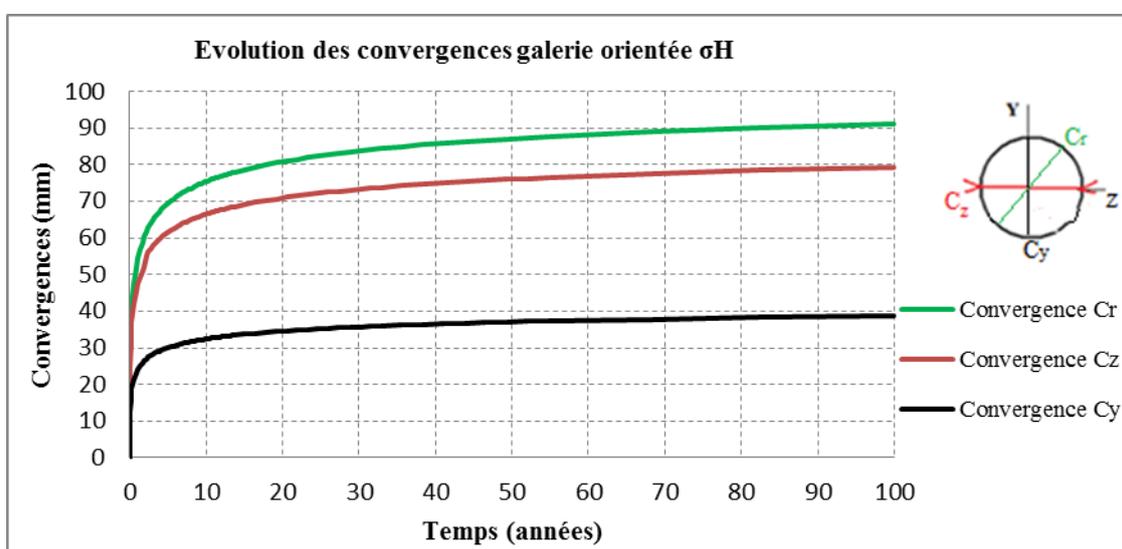


Figure V-16 : Convergences aux points en paroi d'une galerie orientée suivant  $\sigma_H$  (test2)

## V.4 COMPARAISON AVEC DES AUTRES RESULTATS

Dans le cadre du programme de simulation de groupe des laboratoires de recherche de l'ANDRA, on a fait une comparaison des différents résultats de convergences.

### V.4.1 Test 1 (direction petit h)

Mes convergences calculées sont très proches par rapport aux celles mesurées, on peut noter que seulement mes calculs et ceux de UPC distinguent la différence entre la vitesse de déformation horizontale et verticale ; toutes les autres équipes (EDF, Prisme, Ineris, ULG ...) proposent que les convergences dans les différences directions sont les mêmes cf. Figure V-17 et Tableau V-1.

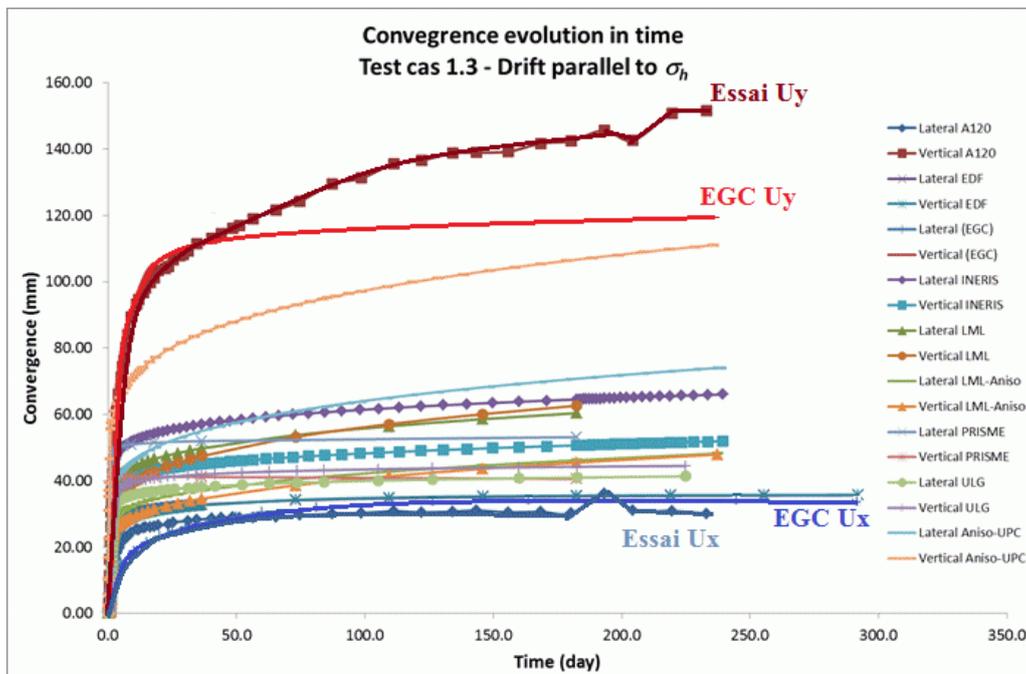


Figure V-17 : Comparaison des convergences modélisées par les différentes équipes par rapport aux mesurés réalisées dans une galerie orientée suivant  $\sigma_h$

Convergence horizontale	600j (mm)	1300j (mm)	Convergence verticale	600j (mm)	1300j (mm)
Essai	22	24	Essai	122	145
EGC	20	23	EGC	102	110
EDF	40	40	EDF	40	40
Prisme	38	40	Prisme	38	40
INERIS	58	62	INERIS	58	62
ULG	38	42	ULG	38	42

Tableau V-1 : Comparaison des convergences modélisées par les différentes équipes

#### V.4.2 Test 2 (direction grand H)

Il y a une bonne concordance entre mes convergences calculées et celles de l'essai in situ, les différentes équipes donnent des convergences verticales modélisées presque les mêmes, il existe une petite différence pour celles horizontales cf. Figure V-17 et Tableau V-2.

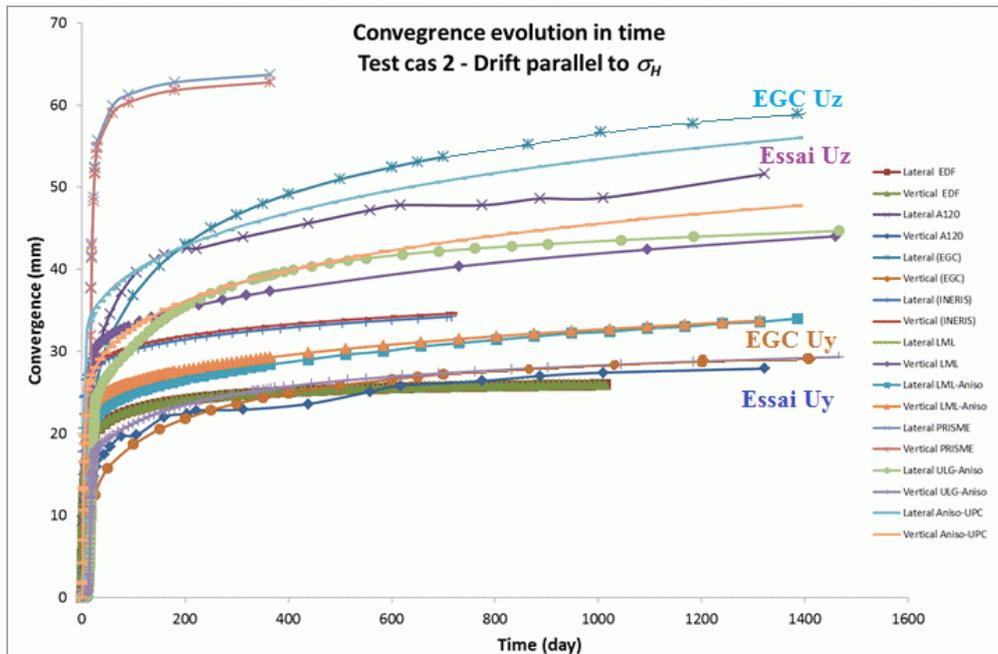


Figure V-18 : Comparaison des convergences modélisées par les différentes équipes par rapport aux mesurés réalisées dans une galerie orientée suivant  $\sigma_H$

Convergence horizontale	600j (mm)	1300j (mm)	Convergence verticale	600j (mm)	1300j (mm)
Essai	45	50	Essai	25	30
EGC	48	55	EGC	26	32
EDF	25	25	EDF	25	25
Prisme	62	64	Prisme	62	64
INERIS	32	32	INERIS	26	28
ULG	45	52	ULG	40	43

Tableau V-2 : Comparaison des convergences modélisées par les différentes équipes

## V.5 CONCLUSION

Les convergences résultant des modélisations s'appuient sur le modèle SC2D avec le vecteur vitesse de déformation qui dépend du déviateur de contrainte, de la pression moyenne, et du niveau d'endommagement. Ainsi sans endommagement pas d'effets différés. Cette dernière hypothèse résulte des observations réalisées dans le laboratoire souterrain qui a bien mis en évidence que les effets différés étaient gouvernés par les zones endommagées fracturées.

Les comparaisons des convergences modélisées avec le modèle SC2D et les mesures in situ montrent un assez bon accord sauf pour les convergences horizontales pour la galerie orientée suivant la contrainte mineure. Il ressort que l'état hydrique de cette zone endommagée fracturée doit être mieux pris en compte dans le modèle SC2D.

Observant les résultats, on peut voir que les convergences augmentent très vite dans les premières années. Le développement de nouveaux soutènements qui peuvent absorber ces fortes convergences est très attendu.

## CHAPITRE VI. CONCLUSIONS ET DISCUSSIONS

Les observations dans le laboratoire souterrain Meuse Haute Marne ont mis en évidence que les effets différés (convergence évolution des contraintes) étaient principalement gouvernés par les zones endommagées fracturées entourant les ouvrages. Pour évoluer aussi bien à court terme qu'à long terme d'une part les convergences et d'autres part les contraintes appliquées sur les soutènements, il est nécessaire de reproduire par simulations numériques ces discontinuités. Notons que l'ANDRA a réalisé dans son laboratoire de Bure un important travail de caractérisation de la zone endommagée autour des galeries des alvéoles et des forages dans la formation du Callovo Oxfordien (Armand & al 2013).

Avec le modèle SC2D, mon travail a comporté deux évolutions :

- à court terme (excavation)
- à long terme (fluage après l'excavation jusqu'à 100 ans)

### VI.1 EVOLUTION D'UNE ZONE ENDOMMAGEE FRACTUREE PENDANT L'EXCAVATION

La création des zones fracturées autour des galeries dans le code *CLEO* fait appel au modèle rhéologique SC2D pour l'argilite non perturbée et correspond aux domaines dans lesquels les coefficients d'endommagement atteignent la valeur unitaire. Ainsi, lorsqu'un coefficient d'endommagement est égal à 1 une discontinuité est créée.

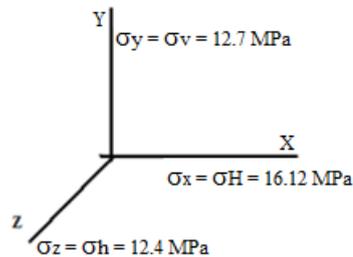


Figure VI-1 : Schématisation de l'état de contrainte totale anisotrope à 517 m de profondeur

Ces simulations s'appuient sur un modèle rhéologique SC2D implémenté dans le code EF *CLEO*. La spécificité de ce modèle repose sur une compétition entre un comportement ductile dans les directions des déformations de tassement et comportement semi fragile dans les directions des déformations d'extension.

Les coefficients d'endommagement sont déterminés à partir de l'extension du formalisme de Mazars tels que :

$$\varepsilon_i \geq 0 \rightarrow D_i = 0$$

$$\varepsilon_i < 0 \rightarrow D_i = 1 - \exp\left[-\frac{1}{10} \cdot \left(\frac{\varepsilon_i^-}{\varepsilon_{i\text{lim}}^-}\right)^{10}\right]$$

Les déformations limites d'extension  $\varepsilon_{\text{lim}X,Y,Z}^- = -k_{X,Y,Z} \cdot \Delta\sigma_{X,Y,Z}$  sont fonction des modules de gonflement

Direction de la stratification	Coefficient de gonflement (1/MPa)	Contrainte effective $\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - 0.6 \times 4.7$ (MPa)	Déformation limite $\varepsilon_{i\text{lim}}^- = -k_i \cdot \Delta\sigma_i$
X ( $\sigma_H$ )	0.00014	13,3	-0.0019
Z ( $\sigma_h$ )	0.00014	9,58	-0.0014
Y ( $\sigma_v$ )	0.00007	9,88	-0.0007

Tableau VI-1 : Valeurs des déformations limites pour les profondeurs 517m

Les coefficients en cisaillement  $D_{ij}$   $i \neq j$  conservent l'expression sous forme exponentielle des coefficients d'endommagement en extension.

La création des discontinuités en extension sont associées aux valeurs des coefficients d'endommagement unitaire et leurs orientations sont des plans perpendiculaires aux directions principales des contraintes in situ. Les surfaces de discontinuités en cisaillement correspondent à la valeur unitaire du coefficient d'endommagement en cisaillement et leurs orientations correspondent au plan de distorsion maximale.

Notons ici qu'une des principales difficultés est la détermination des caractéristiques mécaniques de l'argilite à partir d'échantillons carottés. En effet, l'argilite est constituée d'une phase argileuse avec des inclusions de calcite dans sa macroporosité, la décharge hydro-mécanique lors du prélèvement induit nécessairement un endommagement par glissement au niveau des interfaces argile - calcite et des ruptures des inclusions de calcite. Il en résulte qu'une partie du renfort de la calcite se trouve de fait réduit dans les essais sur échantillons carottés et c'est principalement la phase argileuse qui s'exprime dans ces essais.

Ainsi, la détermination des caractéristiques mécaniques à partir d'échantillons carottés notamment la quantification de l'endommagement nécessite de prendre en compte son histoire induite par la décharge hydromécanique de prélèvement. Les composantes principales  $D_{ii}$   $i \in 1,2,3$  sont quantifiées par analyse inverse des déformations obtenues des essais en extension à pression moyenne constante. De la même manière les coefficients d'endommagement en cisaillement peuvent être quantifiés sur des chemins sous des cinématiques rotationnelles (torsion sur cylindre creux Robinet & al 1983-1984). Seuls les travaux réalisés en torsion sur une argilite par Lee & al 2002 ont permis d'évaluer les coefficients d'endommagement de cisaillement.

Les simulations des zones endommagées fracturées avec le code *CLEO* et le modèle rhéologique *SC2D* ont permis de reproduire assez fidèlement les domaines observés autour des galeries d'une part orientées dans la direction de la contrainte mineure (test 1) et d'autre part dans la direction de la contrainte majeure (test 2). Il y a un bon accord entre la simulation des zones endommagées et celles observées in situ et cf. Figure VI-2 et Figure VI-3.

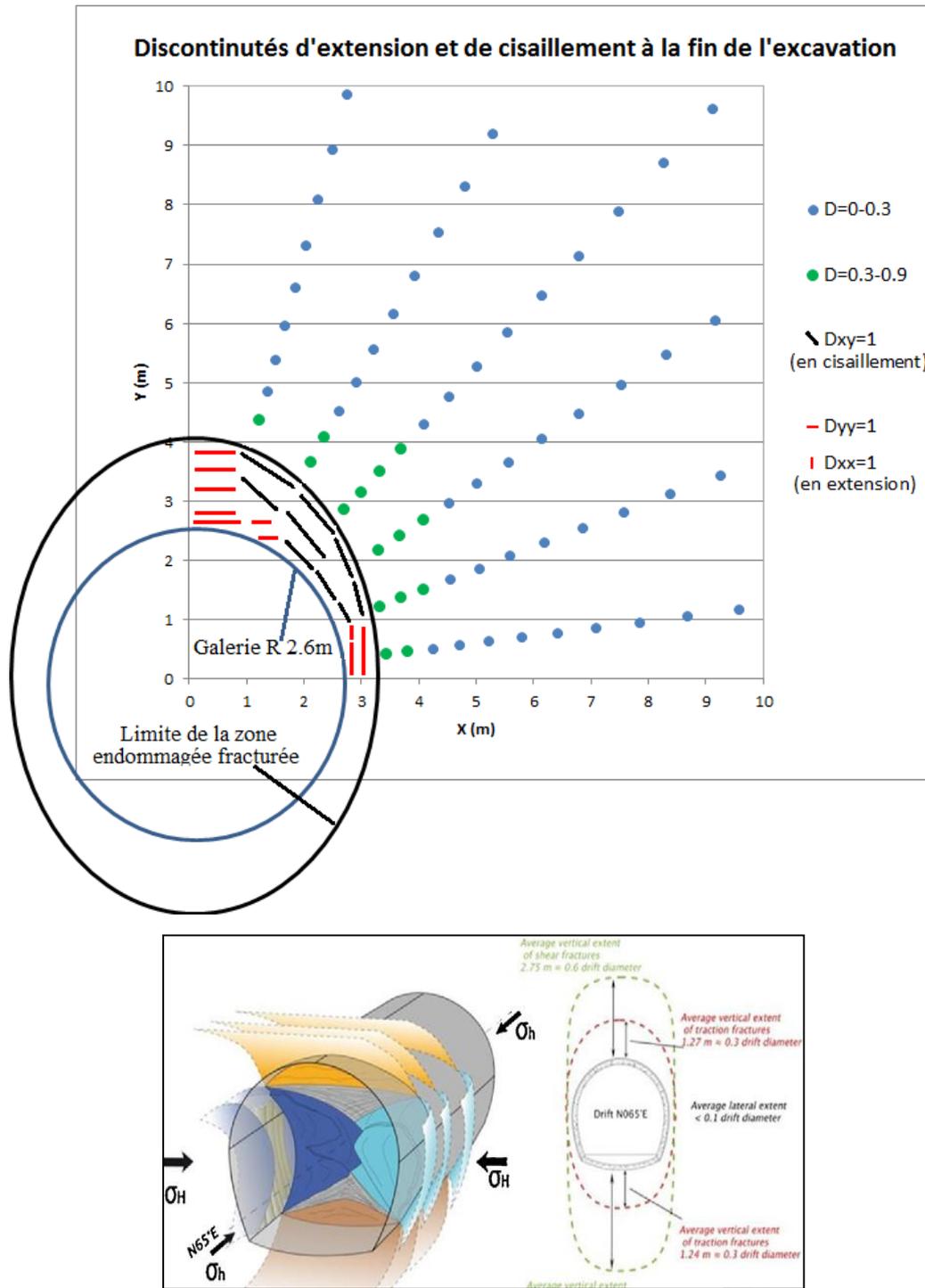


Figure VI-2 : Simulation de la zone endommagée fracturée autour une galerie orientée suivant la contrainte horizontale mineure  $\sigma_h$

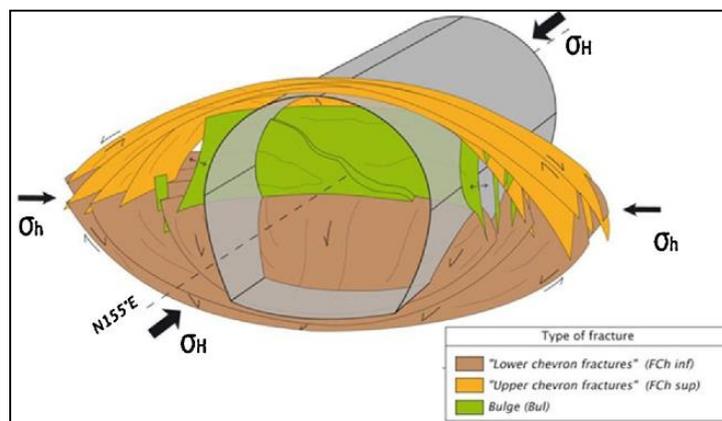
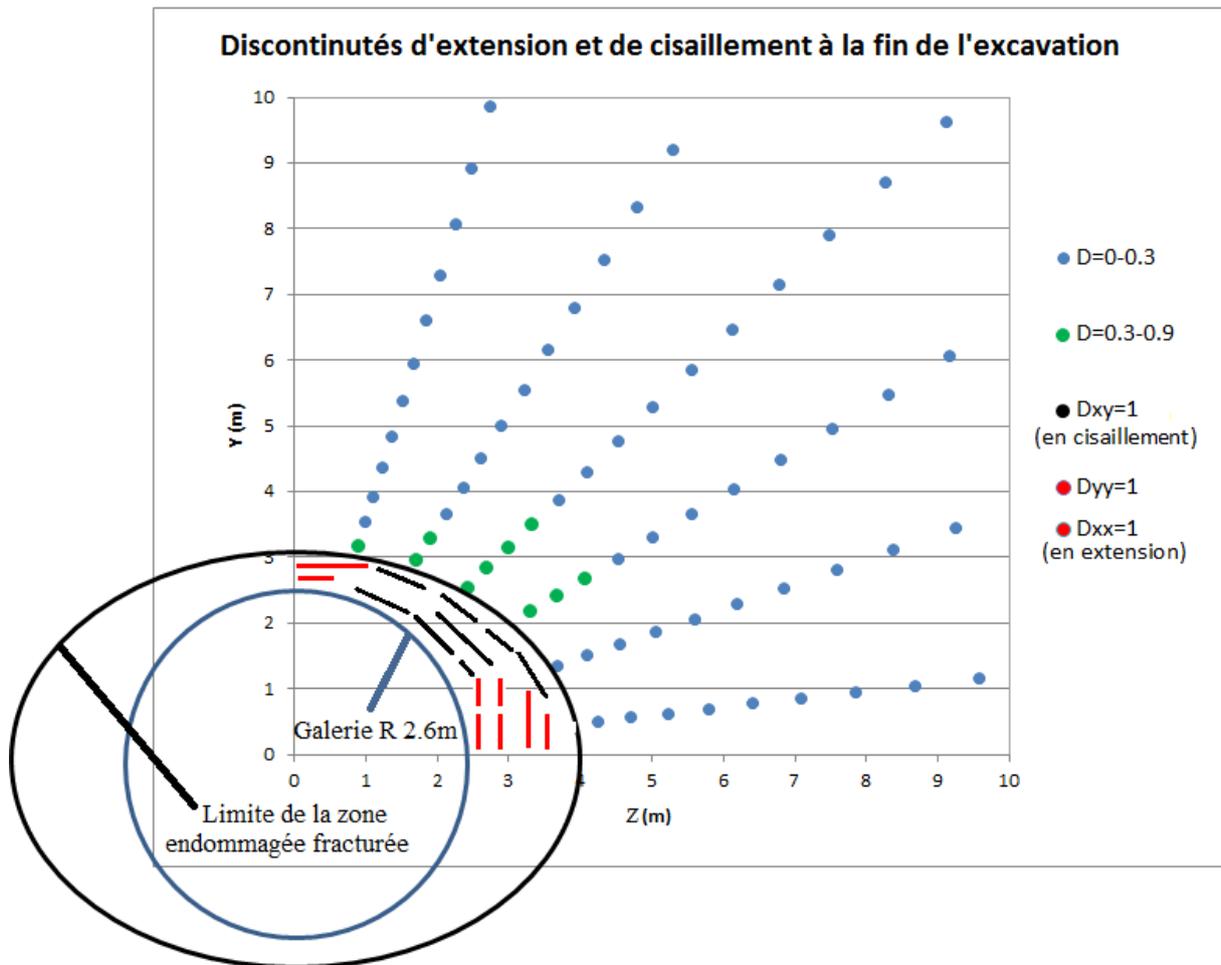


Figure VI-3 : Simulation de la zone endommagée fracturée autour une galerie orientée suivant la contrainte horizontale majeure  $\sigma_H$

## VI.2 EVOLUTION DES EFFETS DIFFERES AUTOUR DES OUVRAGES APRES L'EXCAVATION

Les effets différés dans le modèle rhéologique SC2D sont représentés par les vecteurs vitesses de déformation. Les amplitudes de ces vecteurs sont gouvernées par les niveaux d'endommagement et les déviateurs des contraintes :

$$V_{ij}^{vis} = A \times \frac{D_{ij}}{1 + \frac{D_{ij}}{0.5}} \times \frac{s_{ij} - s_0}{P_{moy}} \times \frac{1}{1+t}$$

L'évaluation du paramètre A à partir d'essai de fluage sur échantillons carottés se heurte à la même difficulté que celle rencontrée pour les caractéristiques mécaniques à court terme.

Cette évaluation réalisée sur des essais de fluage aux états partiellement saturés après un chemin de chargement à pression moyenne constante a nécessité de prendre en compte toute l'histoire subie par l'échantillon et a abouti à la valeur de A=0.05 cf. Figure VI-4 ; Par ailleurs, celle sur des essais de fluage à l'état saturé donne une autre valeur de A = 0.015 cf. Figure VI-5.

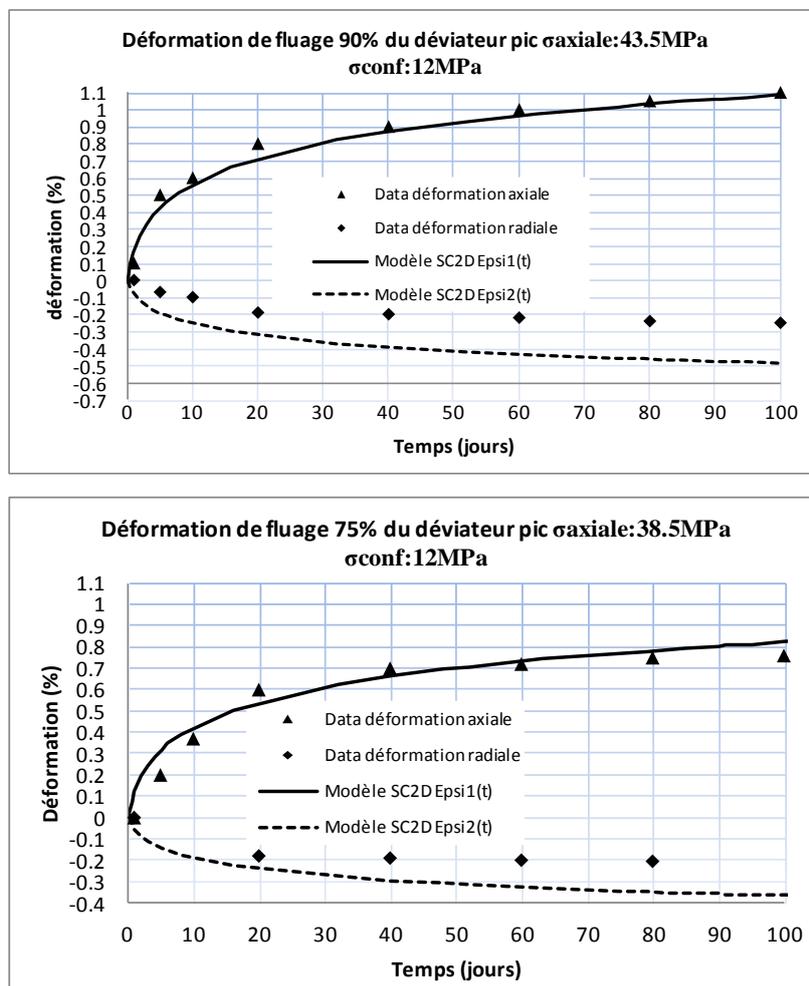


Figure VI-4 : Comparaison entre le modèle SC2D et les essais du LAEGO sur des chemins de chargement triaxiaux pour Hr : 90% et 75% du déviateur de pic.

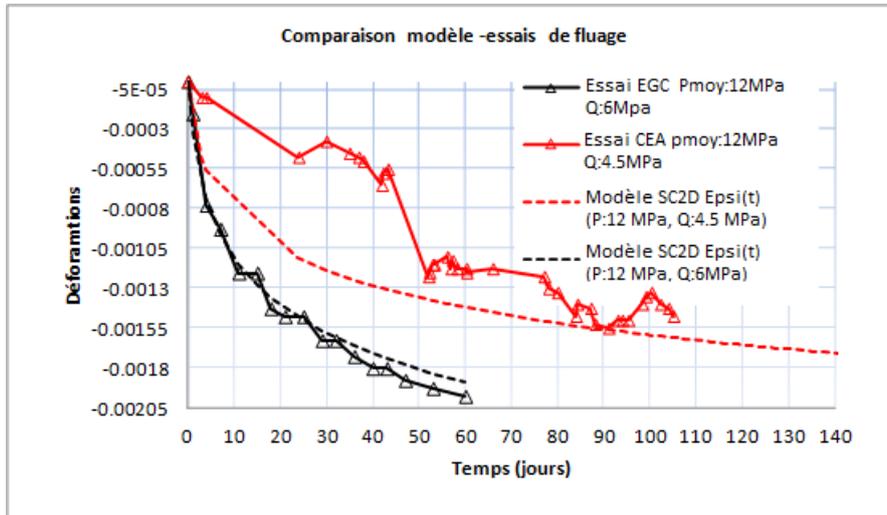


Figure VI-5 : Comparaison entre le modèle SC2D et les essais de fluage (EGC et CEA).

La validation du vecteur vitesse de déformation a été réalisée par comparaison aux convergences observées sur les galeries de l'URL de Bure. La confrontation des simulations numériques avec les convergences des galeries a mis en évidence :

- \* Une bonne concordance pour les convergences verticales pour l'ensemble des galeries orientées dans les directions des contraintes majeures et mineurs de l'argilite à l'état partiellement saturé.
- \* Une bonne concordance pour les convergences horizontales pour l'ensemble des galeries orientées dans les directions des contraintes majeures de l'argilite à l'état partiellement saturé.
- \* Cependant, des convergences horizontales modélisées dans la direction de contraintes mineurs  $\sigma_h$  sont beaucoup trop grandes par rapport à ceux mesurées in situ. Cette diminution des vitesses de déformation dans la direction  $\sigma_h$  peut être expliquée par le fait que la zone endommagée est faible et qu'il existe une suppression interstitielle dans la plan horizontale due au creusement. L'hypothèse que cette zone reste saturée peut donc être retenue et le coefficient de la vitesse de déformation prend la valeur  $A = 0.015$

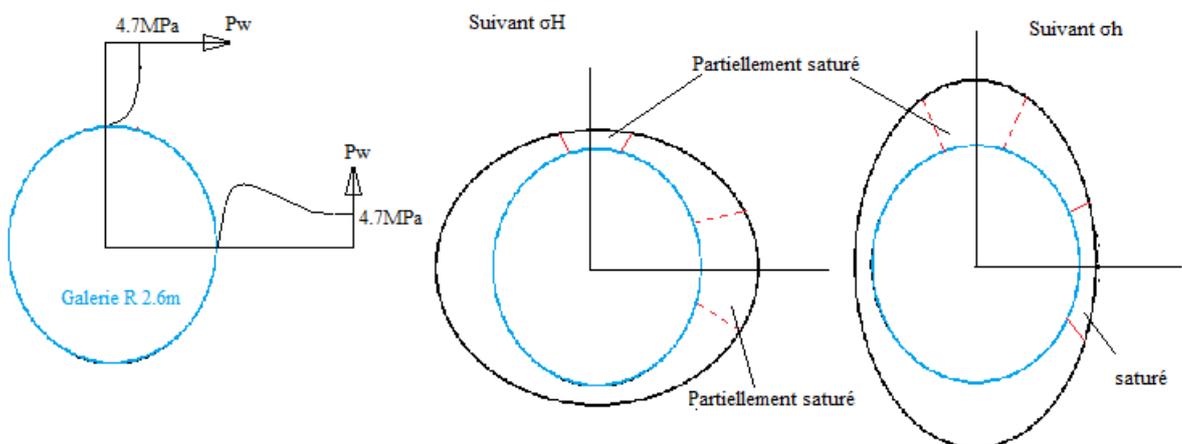


Figure VI-6 : La suppression interstitielle et différents états hydriques autour des ouvrages

Figure VI-7 présente les convergences pour des galeries orientées dans les directions des contraintes majeures et mineures.

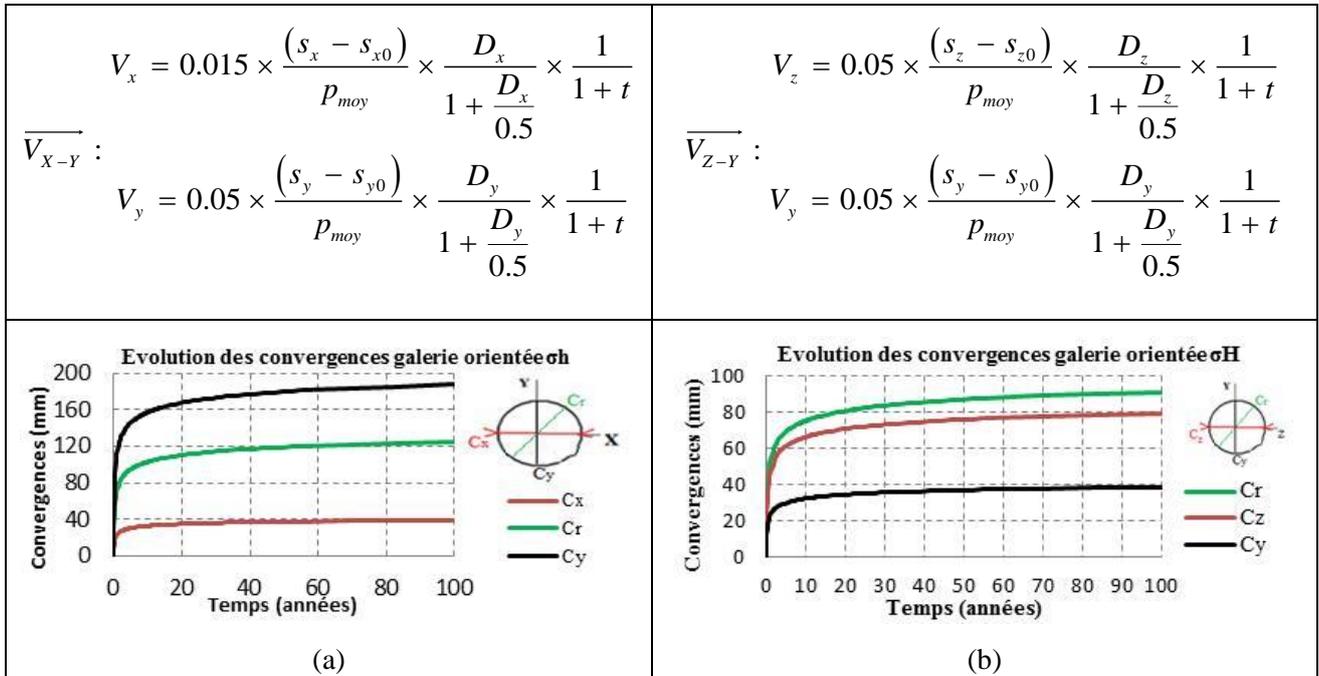


Figure VI-7 : Simulations des convergences des galeries orientées suivant la direction de la contrainte (a) mineure-test1 (b) majeure-test2

Après 100 ans de fluage, la zone endommagée fracturée prend finalement une forme d'un cercle de rayon environ 5m cf..

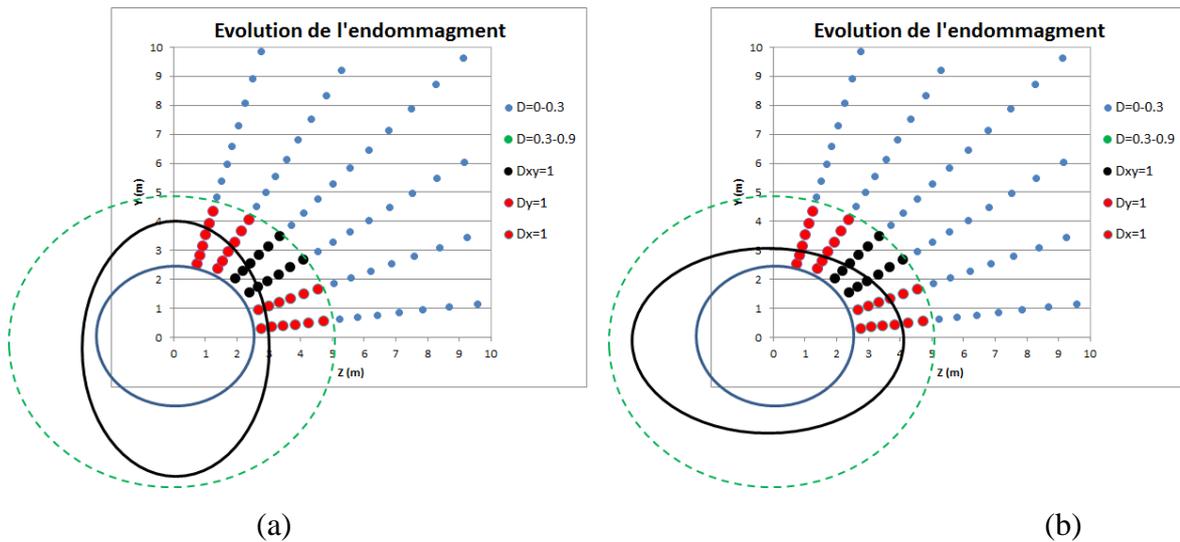


Figure VI-8 : Zones endommagées fracturées après 100 ans autour des galeries orientées suivant la direction de la contrainte (a) mineure-test1 (b) majeure-test2

### VI.3 PERSPECTIVES

Tout d'abord, il est nécessaire de compléter la base de données sur les chemins à pression moyenne constante en cinématique irrotationnelle avec de nouveaux appareillages sur des échantillons à tête et à embase élargies resaturés et réparés par un pré chargement.

Laboratoire EGC est en train de développer de nouveaux essais en cinématique rotationnelle (cylindre creux en torsion) pour caractériser les zones en cisaillement avec de fort rotation des axes principaux cf Figure VI-9.

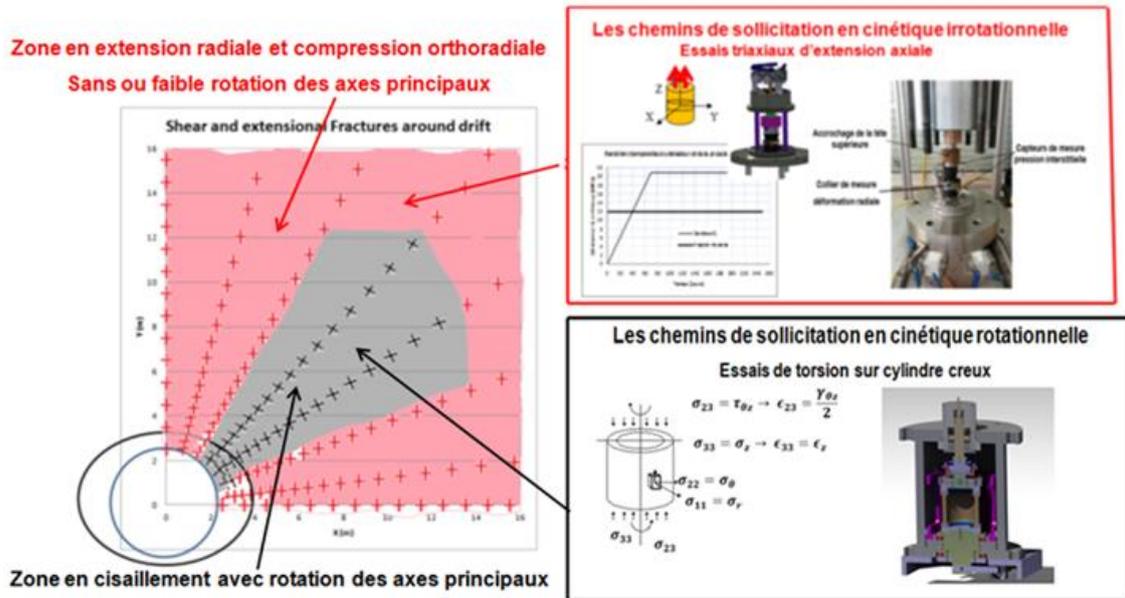


Figure VI-9 : Essais en cinématique rotationnelle

Retour sur les convergences, on observe qu'elles augmentent très vite dans les premiers années, on développe de nouveaux soutènements dit compressibles permettant de limiter les efforts sur les soutènements en absorbant les fortes convergences dans les premiers années.

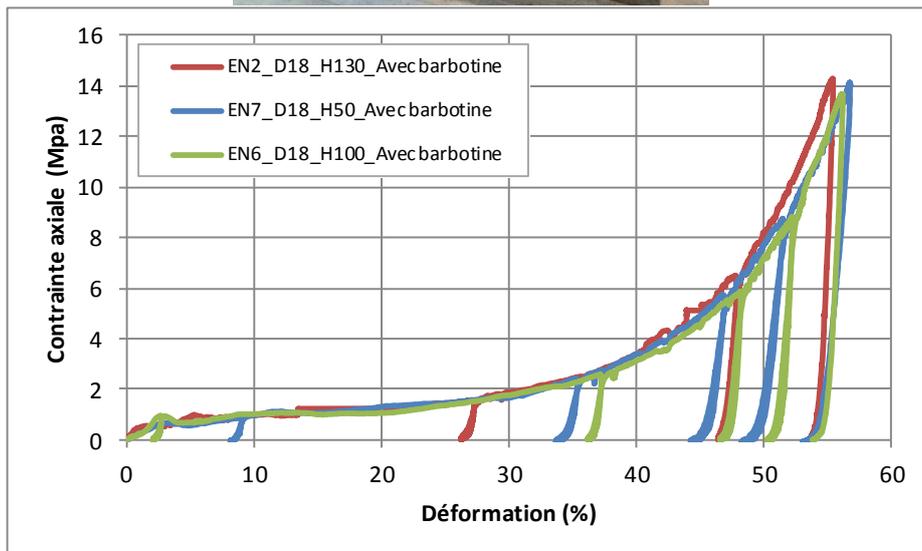


Figure VI-10 : Essais sur échantillon de type voussoirs compressives

La poursuite de mon travail sera la modélisation des efforts sur les soutènements de type compressibles.

## BIBLIOGRAPHIE

- Alonso E.E, Gens A. & Josa A.,** 1990. A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique, Vol. 40, pp 405-430*
- ANDRA** (2011) Analyse des résultats des alvéoles HA phases 1 et 1 bis *Document technique D.RP.AMFS.11.0062 48 pages*
- ANDRA F. Plas & al** (2011) Le comportement (Thermo) hydromécanique des argilites du matériau à l'ouvrage *C.NT.AEAP.1 1 .0026 27 pages*
- ARMAND G.** (201) Nouvelles données sur la caractérisation de l'EDZ dans le laboratoire souterrain *Audition CNE-ANDRA 24-25 mars 2011*
- Baldi G., Hueckel T., and Pellegrini R.,** (1988). Thermal volume changes of mineral-water system in low porosity clays soils. *Can. Geotech. J. 25-4, pp. 807-825*
- Bazant ZP., Chen EP.** (1997) Scaling of structural failure. *Appl. Mech. Rev; 50/:593-627*
- Barnichon J.D, Su K,** 1995. Modélisation des ouvrages d'un stockage (scellements de galeries, scellements de puits, galeries) HAVL argile, Cahier des charges. Edit. *Andra C.CC.ASMG.05.0040.*
- Boutéca M., Sarda J.P., Vincke O., Longuemare P & Bemmer E,** 1999. Réflexion sur l'origine de l'évolution du coefficient de Biot des argilites au cours d'un chargement mécanique. *Journées scientifiques Andra, décembre 1999.*
- Cekerevac C.** (2003). Thermal effects on the mechanical behaviour of saturated clays: an experimental and constitutive study. *PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*
- Chavant C,** 2001. Modèles de comportement THHM, manuel de reference, Code\_Aster.
- Challamel N., Lanos C. & Casandjian C.,** 2005. Strain-based anisotropic damage modelling and unilateral effects. *International journal of Mechanical Sciences 47; pp. 459-473.*
- Chen L., J.F Shao, Q.Z. Zhu & G. Duvieu** (2012) Induced anisotropic damage and plasticity in initially anisotropic sedimentary rocks *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 51 13-23*
- Conil N., Djeran-Maigre I., Cabrillac R., Su K.,** 2004. Poroplastic damage model for claystones. *Applied Clay Science 26: 473-487.*
- Cordebois J.P. and Sidoroff F.,** 1982: "Comportement mécanique des solides anisotropes", Ed. *J.P. Boehler, n°295, Colloques internationaux du CNRS, Grenoble, Editions du CNRS.*
- Coussy O,** 1991. Mécanique des milieux poreux. *Edition technip.*
- Ducoulombier A., Robinet J.C,** 1998. Catsius clay project benchmark 3.2: Febex mock-up test. *Rapport Andra, C.RP OEUG 98-004, 41p*
- Del Olmo, C., Fioravante, V., Gera, F., Hueckel, T., Mayor, J. C. & Pellegrini.,** (1996). Thermomechanical properties of deep argillaceous formations. *Engineering Geology 41, 87-101.*

**Drescher A. & Mroz Z.**, 1997. A refined superior model. *Numerical Models in Geomechanics eds. Pietruszczak & Pande Balkema pp 21-2*

**Eriksson L.G.** (1989). Temperature effects on consolidation properties of sulphide clays. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering 3 2087-2090*

**EGC C.RP.OEUG.06.001.** Complément de caractérisation du gonflement des argilites du Callovo Oxfordien *Rapport ANDRA 35 pages*

**EGC** (2005) Modélisation en modèle 2D plan du comportement de la barrière en bentonite+sable et de la corrosion du chemisage en acier dans les alvéoles *CU Rapport ANDRA C.RP.OEUG.05.007 33 pages*

**EGC** (2006) Simulation numérique du comportement hydromécanique des galeries : excavation, période de ventilation en exploitation et après mise en place du remblai (post fermeture) *Rapport ANDRA C.RP.OEUG.06.003.A 75 pages*

**EGC** (2008) Modélisation des phénomènes de base du couplage hydrique et hydro-mécanique des argilites et de l'argile gonflante *Rapport ANDRA CRP0EUG08005A 82 pages*

**EGC** (2010) Contribution à l'établissement d'un modèle rhéologique THM pour les argilites du Callovo Oxfordien à deux mécanismes plastiques associé à un endommagement anisotrope *Rapport ANDRA CRP0EUG10001A*

**EGC** (2011) Modélisation des phénomènes de base du couplage hydrique et hydro-mécanique des argilites et de l'argile gonflante (UPS4 : étude MPS4/5 tâche 3) *Rapport ANDRA CRP0EUG10005A*

**INERIS** (2008) Site Meuse/Haute-Marne Calculs complémentaires pour la conception de l'expérimentation OHZ (UP GCS) *rapport ANDRA n° D.RP.IINE.08.008*

**INERIS** (2009) Site de Meuse Haute Marne Calculs prédictifs pour la conception de l'expérimentation alvéoles HA *Rapport ANDRA n°D.RP.IINE.09.0002*

**Israelachvili J.N. et Pashley R.M.** (1983). Molecular layering of water at surfaces and origin of repulsive hydration forces. *Nature, 306: 249-250.*

**Lacarrière et al.** (2011). Weibull's theory and a general statistical approach to ciment materiel. *International journal of geomechanics, ASCE/december 2011.*

**Lambe T.W.** (1958). The structure of compacted clay. *Journal soil mech. Fd. Div. Am. Soc. Civ. Eng. 84, SM2*

**Lee et al.** (2002). Cylindre creux et détermination de paramètres de lois de comportement des sols

**Magnan J.P.**, 2000. Cour de Mécanique des sols et des roches, *volume 1. Ecole Nationale des ponts et chaussées.*

**Maleki K.**, 2004. Modélisation numérique du couplage entre l'endommagement et la perméabilité des roches. *Application à l'étude des ouvrages de stockage souterrain. Thèse de doctorat, ENPC.*

**Marina B.**, 2009. Modèle d'endommagement de Mazars, Code\_Aster.

- Mazars J**, 1986. A description of micro and macroscale damage of concrete structures, *Engineering Fracture Mechanics* 25, n° 5/6 p.729-737.
- Mestat P**, 2001. Introduction à la modélisation par éléments finis des ouvrages de géotechnique. *Cours de DEA Modélisation des Sols et des Ouvrages dans leur Environnement. Ecole centrale de Paris.*
- Mir H., Fafard M., Bissonnette B., Dano M.L.**, 2005. Damage Modeling in Random Short Glass Fiber Reinforced Composites Including Permanent Strain and Unilateral Effect. *Journal of Applied Mechanics. Vol.72/249.*
- Mroz Z., Boukpeti N., Drescher A.**, 2003. Constitutive model for static liquefaction. *Geotechnique. International journal of geomechanics, ASCE/decembre 2003.*
- Modaressi A., Abou-bekr N**, 1994. A unified approach to model the behavior of saturated and unsaturated soil. *8ème international conference of the association for computer methods and advances in geomechanics, West Virginia, Mai 1994.*
- Moës N., Dolbow J. & Belytschko T.** (1999) A finite element method for crack growth without remeshing *Int. J. for Numer. Meth. Engn.46 131-150*
- NF PRO 2004 Deliverable (D-N°:2.3.8)** A study of anaerobic corrosion of carbon steel (*final activity report of NRI*)
- Pakzad M**, 1995. Modélisation du comportement hydro-mécanique des argiles gonflantes à faible porosité. *Thèse de doctorat, Université d'Orléans.*
- Picandet V., Khelidj A. and Bastian G., Pakzad M**, 2001. Effect of axial compressive damage on gas permeability of ordinary and high-performance concrete, cement and concrete research 31, 1525-1532.
- Poitier C, Robinet J.C.**, 1996. Etude du comportement thermohydromécanique des matériaux argileux de barrière ouvragée. *Rapport Andra B RP OEUG 96.002*
- Poitier C, Chiffolleau S.** 1999. Mont Terry project determination of the hydromechanical characteristics of the opalinus clay. *Rapport Andra BRPO.EUG99.001 40pp.*
- Powers T.C, Copeland L.E, Hayes J.C & Mann H.M**, 1954. Permeability of Portland cement paste. *J. Amer. Concr. Inst., 51, 3, 285-298.*
- Robinet J. C., Pakzad M., Plas F.**, 1994. Un modèle rhéologique pour les argiles gonflantes. *Revue Française de Géotechnique, N° 67, Paris, pp 57-67.*
- Robinet J.C., Poitier C., Julien A & Plas F**, 1998. Evaluation of a constitutive model for expansive and non-expansive clay. *5th Int. workshop on key issues in waste isolation research Barcelone.*
- Robinet Jean-Charles**, 2008. *Minéralogie, porosité et diffusion des solutés dans l'argilite du Callovo-Oxfordien de Bure (Meuse, Haute-Marne, France) de l'échelle centimétrique à micrométrique, Thèse de docteur, Université de Poitiers.*
- Shuai F. et Fredlund D.G.** (1997). Model for the simulation of swelling pressure measurements on expansive soils. *Can. Geotech. J. 35 pp 90-114.*
- Sun A., Matsuoka H., Yao Y.P. & Ichihara W.**, 2000. An elasto-plastic model for unsaturated soil in three-dimensional stresses. *Soil and Foundations, Vol. 40, n°3, 29-42.*

**Supartono F Sidoroff F**, 1985. Anisotropic damage modelling for brittle elastic materials. Archives of Mechanics 37(4-5), 521-534.

## ANNEXE A : EVOLUTION DE LA POROSITE

L'évolution de la porosité du matériau est définie par  $n = \frac{\Omega_p}{\Omega}$

Avec

$\Omega_p$  : Volume des pores

$\Omega$  : Volume totale

Ainsi :

$$dn = \frac{\Omega d\Omega_p - \Omega_p d\Omega}{\Omega^2}$$

Donc :

$$\frac{dn}{n} = \frac{\Omega d\Omega_p - \Omega_p d\Omega}{\Omega^2} \frac{\Omega}{\Omega_p} = \frac{d\Omega_p}{\Omega_p} - \frac{d\Omega}{\Omega}$$

Or, les variation du volume sont du aux variations de  $\sigma_m$  et de  $P_{pore}$  [cf. Shao 1998] et s'exprime par les relations suivantes :

$$\frac{d\Omega_p}{\Omega_p} = \frac{1}{n} \left( \frac{1}{K_T} - \frac{1}{K_S} \right) (d\sigma_m + dP_{pore}) - \frac{1}{K_S} dP_{pore}$$

et

$$\frac{d\Omega}{\Omega} = \frac{1}{K_T} (d\sigma_m + dP_{pore}) - \frac{1}{K_S} dP_{pore}$$

Avec  $\sigma_m$  est la contrainte moyenne  $\sigma_m = \frac{\sigma_{kk}}{3}$

Donc :

$$\frac{dn}{n} = \frac{1}{n} \left( \frac{1}{K_T} - \frac{1}{K_S} \right) (d\sigma_m + dP_{pore}) - \frac{1}{K_S} (d\sigma_m + dP_{pore})$$

Evaluation de  $\frac{1}{K_T} - \frac{1}{K_S}$

La définition du coefficient du Biot donne :

$$b = 1 - \frac{K_T}{K_S} \text{ donc, } \frac{K_T}{K_S} = 1 - b \Rightarrow K_T = (1 - b)K_S$$

Ainsi :

$$\frac{1}{K_T} - \frac{1}{K_S} = \frac{1 - (1-b)}{(1-b)K_S} = \frac{b}{(1-b)K_S}$$

Donc l'équation de la variation de porosité de devient :

$$\frac{dn}{n} = \frac{1}{n} \left( \frac{b-n}{(1-b)K_S} \right) (d\sigma_m + dP_{pore})$$

De plus avec (voir B.Gamirit et F.Shao) :

$$P_{pore} + \frac{\sigma_{kk}}{3} = \left( \frac{P_{pore}}{K_S} + \varepsilon_v - \varepsilon^p - \varepsilon_v(s) - \varepsilon_{v\theta} \right) K_T$$

D'où :

$$\frac{\sigma_{kk}}{3} = \left( \frac{P_{pore}}{K_S} + \varepsilon_v - \varepsilon^p - \varepsilon_v(s) - \varepsilon_{v\theta} \right) K_T - P_{pore}$$

Donc :

$$\frac{\dot{\sigma}_{kk}}{3} = \left( \frac{\dot{P}_{pore}}{K_S} + \dot{\varepsilon}_v - \dot{\varepsilon}^p - \dot{\varepsilon}_v(s) - \dot{\varepsilon}_{v\theta} \right) K_T - \dot{P}_{pore}$$

En remplaçant l'expression  $\dot{\sigma}_m$ , on va obtenir :

$$\frac{\dot{n}}{n} = \left( \frac{b-n}{n(1-b)K_S} \right) \left( \frac{\dot{P}_{pore}}{K_S} + \dot{\varepsilon}_v - \dot{\varepsilon}^p - \dot{\varepsilon}_v(s) - \dot{\varepsilon}_{v\theta} \right) K_T$$

Nous remplaçons  $K_T$  par son expression en fonction de b et de  $K_S$

$$\frac{\dot{n}}{n} = \left( \frac{b-n}{n(1-b)K_S} \right) \left( \frac{\dot{P}_{pore}}{K_S} + \dot{\varepsilon}_v - \dot{\varepsilon}^p - \dot{\varepsilon}_v(s) - \dot{\varepsilon}_{v\theta} \right) (1-b)K_S$$

Après simplification:

$$\frac{\dot{n}}{n} = \left( \frac{b-n}{n} \right) \left( \frac{\dot{P}_{pore}}{K_S} + \dot{\varepsilon}_v - \dot{\varepsilon}^p - \dot{\varepsilon}_v(s) - \dot{\varepsilon}_{v\theta} \right) = \left( \frac{b-n}{nK_S} \right) \dot{P}_{pore} + \left( \frac{b-n}{n} \right) \left( \dot{\varepsilon}_v - \dot{\varepsilon}^p - \dot{\varepsilon}_v(s) - \dot{\varepsilon}_{v\theta} \right)$$

Il est alors possible d'exprimer  $\dot{n}$  :

$$\dot{n} = \left( \frac{b-n}{K_S} \right) \dot{P}_{pore} + (b-n) \left( \dot{\varepsilon}_v - \dot{\varepsilon}^p - \dot{\varepsilon}_v(s) - \dot{\varepsilon}_{v\theta} \right)$$

## ANNEXE B : EVALUATION DES COEFFICIENTS DU TENSEUR DE BIOT

J. Ch Robinet a mis en évidence une anisotropie de structure notamment au niveau de la phase carbonatée dont l'élongation des ellipsoïdes de calcite est dans le plan de la sédimentation. Cette anisotropie de formation produit, lors des décharges hydromécaniques, la création d'un endommagement anisotrope. Figure B- 1 montre que les déformations axiales et radiales sont différentes dans un rapport de 2 (la déformation axiale est plus grande que la déformation radiale) au cours d'un essai de désorption à volume libre sur des échantillons carottés.

Les essais de désorption à volume libre, réalisés sans contrainte extérieure, produisent des déformations de retrait permettant ainsi de figer l'endommagement et le coefficient de Biot issu du prélèvement. Par ailleurs les pressions de consolidation respectivement de 300MPa pour le domaine de diagenèse et de 30 MPa pour le domaine dit de prélèvement nous assure que les déformations de retrait sont situées dans le domaine élastique associé à la la surface de charge  $F_D$  de prélèvement (sous réserve que la pression d'eau équivalente n'atteigne pas la pression de consolidation de 30MPa). Dans une telle configuration l'évolution des contraintes de contact correspond à la variation des pressions d'eau équivalentes pondérée du tenseur de Biot:  $d\sigma_{ij} = d\sigma_{ij}^{c'} + B_{ij} \cdot dp_w^{equ} = 0$ ,  $\sigma_{ij}^{c'} = -B_{ij} \cdot p_w^{equ} + cst$ .

La détermination des pressions d'eau équivalentes et des coefficients d'endommagement induit par le prélèvement correspond à la résolution du système suivant dont les déformations sont connues.

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} \left[ \frac{1}{(1-D_1)^2} - \frac{2\nu}{(1-D_1)(1-D_2)} \right] \cdot B_1 \cdot p_w^{equ}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} \left[ \frac{1}{(1-D_2)^2} - \frac{2\nu}{(1-D_1)(1-D_2)} \right] \cdot B_2 \cdot p_w^{equ}$$

$$p_w^{equ} = - \frac{P_{cap}}{1 + \frac{P_{cap}}{35}}$$

$$B_h = B_H = 0.388 \cdot D_v + 0.612$$

$$B_v = 0.765 \cdot D_h + 0.235$$

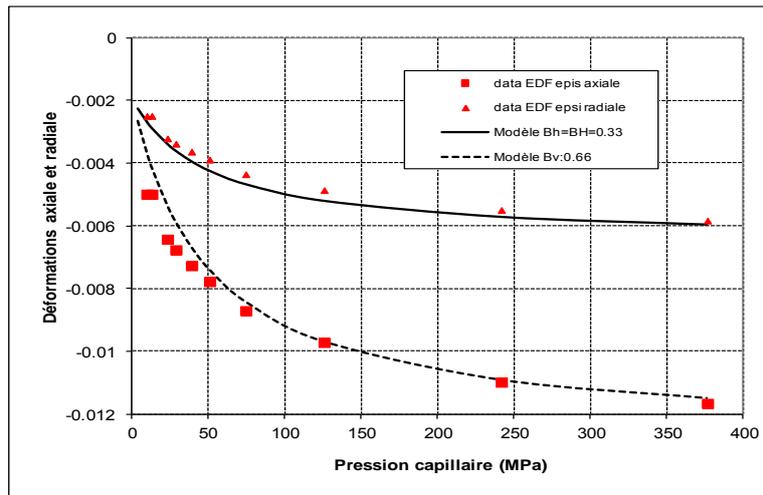


Figure B- 1 : Déformations axiales et radiales résultant d'un essai de désorption à volume libre

## ANNEXE C : EVALUATION DE LA PRESSION DE CONSOLIDATION APPARENTE DE L'ARGILITE ET CALIBRATION DE LA SURFACE DE DIAGENESE

La principale difficulté pour évaluer la pression de consolidation de l'argilite en place à partir des échantillons carottés est qu'ils sont tous endommagés par la décharge mécanique. Del Olmo & Huckel (1996) sur des argilites Espagnoles ont montré que la pression de consolidation augmente avec le pourcentage de carbonates :

$$p_c' = p_{co}' \exp \left\{ \frac{(e_0 - e_{10} \cdot \exp(-\chi C))}{\Lambda_0 \cdot \exp(-\xi \cdot C)} \right\}$$

Avec les valeurs consignées dans Tableau C- 1, la pression de consolidation de l'argilite passe de 10 MPa à 300MPa (valeur de la pression de consolidation apparente vierge pour des échantillons consolidés sous la contrainte in situ à 510m de profondeur) avec 20 % de calcite

$e_0$ initial	$e_{10}$ e susp. Argilite	C% carbonate	$p_{co}'$ (MPa)	$\chi$	$\xi$	$\Lambda_0$
0.265	0.265	0.2	10	3.3	8.43	0.203

Tableau C- 1 : Valeurs des paramètres de l'évolution de la pression de consolidation apparente (source Del Olmo & al 1996)

Afin de confirmer la pression de consolidation apparente effective de 300MPa (relation Del Olmo & al), une comparaison des comportements de trois matériaux a été réalisée sur l'argilite massive issue du prélèvement à la profondeur 510m, l'argilite remaniée consolidée à 40MPa et l'argilite remaniée consolidée sous 300MPa (cf. Figure C- 1, Figure C- 2, Figure C- 3). On constate :

- Un comportement contrainte - déformation identique entre l'argilite remaniée et l'argilite massive possédant la même macro porosité.
- Un comportement plus ductile pour l'argilite remaniée dont la macro porosité est plus grand que l'argilite massive.
- Une augmentation de la rigidité avec la diminution des macros pores

On constate que l'argilite remaniée et consolidée sous 300 MPa permet de reproduire le comportement de l'argilite massive issu d'un carottage.

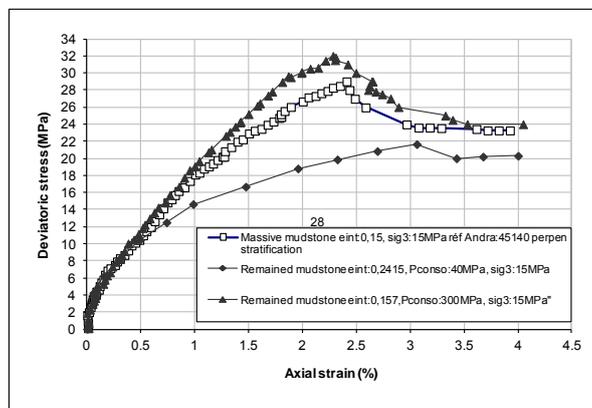


Figure C- 1 : Comparaison du comportement sur des chemins triaxiaux de compression des échantillons d'argilite remaniée par rapport à une argilite massive

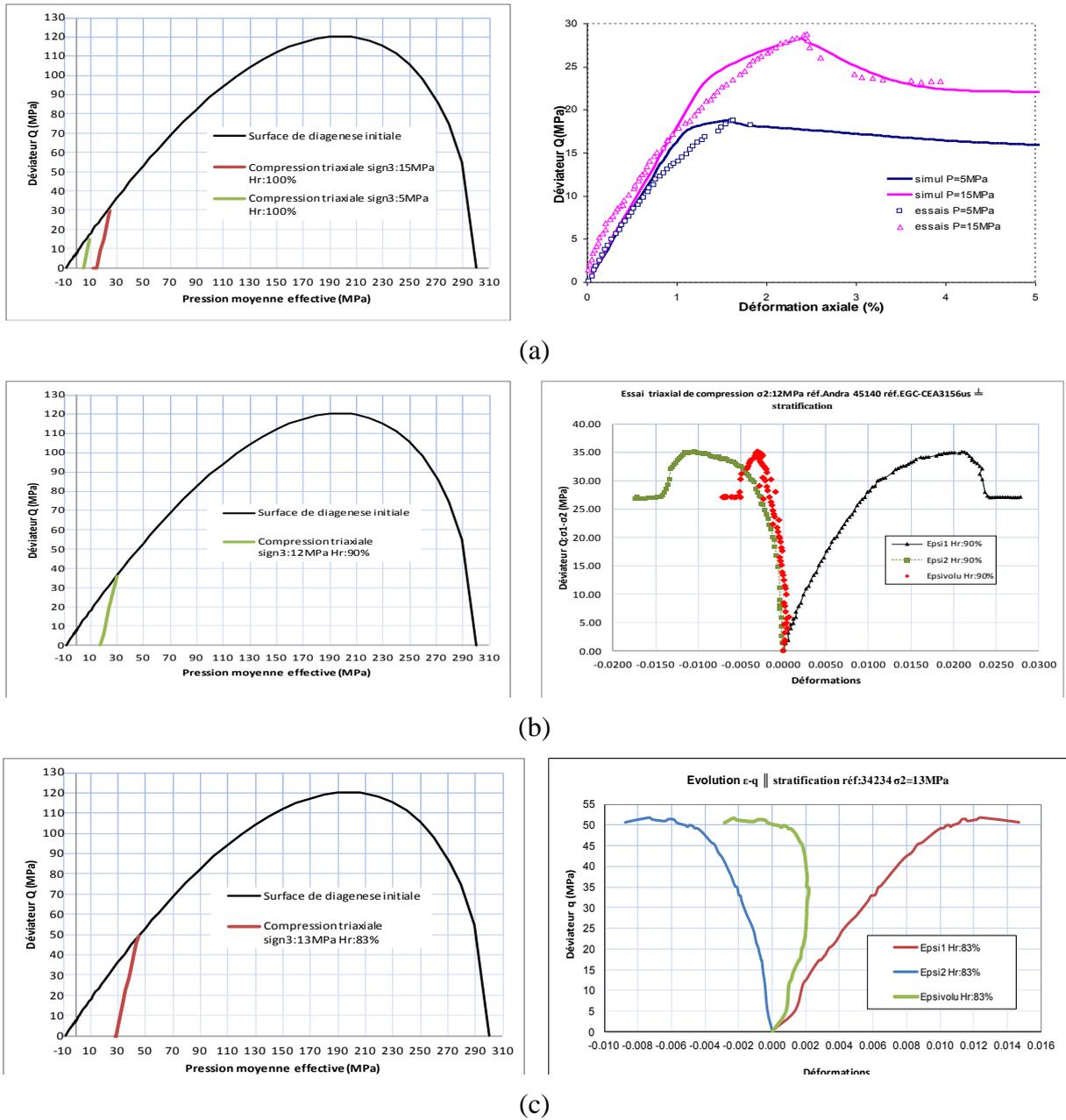


Figure C- 2 : Calibration de la surface de diagenèse par des essais de compression triaxiale : (a) Hr : 100% (saturé), (b) Hr : 90% et Hr : 83%

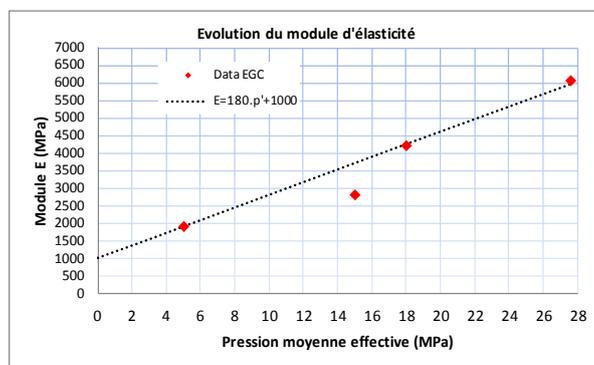


Figure C- 3 : Evolution des modules d'élasticité initiaux