



HAL
open science

Contribution à l'étude de la dessiccation des argiles : analyse simultanée des champs de déformation et de contrainte

Ahmad El Hajjar

► **To cite this version:**

Ahmad El Hajjar. Contribution à l'étude de la dessiccation des argiles : analyse simultanée des champs de déformation et de contrainte. Génie civil. Normandie Université, 2020. Français. NNT : 2020NORMLH20 . tel-03847904

HAL Id: tel-03847904

<https://theses.hal.science/tel-03847904v1>

Submitted on 10 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Normandie Université

THESE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité Génie Civil

Préparée au sein du Laboratoire Ondes et Milieux Complexes

**Contribution à l'étude de la dessiccation des argiles :
Analyse simultanée des champs de déformation et de contrainte**

Présentée et soutenue par

Ahmad EL HAJJAR

**Thèse soutenue publiquement le 06/11/2020
devant le jury composé de**

M. Philippe COSENZA	Professeur à l'Université de Poitiers, France	Rapporteur
M. Isam SHAHROUR	Professeur à l'Université Lille I, France	Rapporteur
M. Jean-Marie FLEUREAU	Professeur à l'Ecole Centrale Paris (Centrale-Supélec), France	Examineur
Mme Mahdia HATTAB	Professeur à l'Université de Lorraine, France	Examineur
Mme Nadia SAIYOURI	Professeur à l'Université de Bordeaux, France	Examineur
Mme Anne PANTET	Professeur à l'Université Le Havre Normandie, France	Examineur
M. Tariq OUAHBI	Maître de conférences à l'Université Le Havre Normandie, France	Co-encadrant de thèse
M. Saïd TAIBI	Professeur à l'Université Le Havre Normandie, France	Directeur de thèse

Thèse dirigée par Saïd TAIBI et co-encadrée par Tariq OUAHBI, laboratoire LOMC CNRS UMR 6294



**La splendeur de la science et de la sagesse
disparaît lorsqu'on cherche à en faire du profit**

Yahya Ar-Razi

[830-872]

Ce modeste travail est dédié :

À la mémoire de mes grands-parents

À ma mère et mon père

À ma sœur et mon frère

À tous ceux qui me sont chers

Remerciements

Après avoir franchi trois années d'études de doctorat, parsemées de joies et de déceptions, de réussites et de défaites, il m'est un agréable devoir de témoigner mes plus sincères remerciements et mon entière gratitude envers des personnes, sans lesquelles, ce travail serait encore au stade de vœu.

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse Mr. Saïd Taïbi et mon co-encadrant Mr. Tariq Ouahbi de m'avoir fait confiance et de m'avoir orienté, encouragé et conseillé durant toute la période de ce travail de recherche, tout en me laissant une grande liberté. Je suis profondément reconnaissant de leur bonne écoute, leur investissement permanent, ainsi que de leur rigueur intellectuelle qui ont été prépondérants pour l'aboutissement de cette thèse. J'ai beaucoup apprécié de travailler à leurs côtés tant sur le plan scientifique que sur le plan humain.

Je remercie également notre directeur de laboratoire Mr. Innocent Mutabazi, puis Mr. François Marin pour leur accueil et leur soutien. Un grand merci à Claude Houssin et Mathieu Beaujard, techniciens du laboratoire pour la qualité de l'assistance technique et leur aide précieuse dans la conception de mes dispositifs expérimentaux. Mes vifs remerciements s'adressent à ma prédécesseur au laboratoire dans ce sujet de recherche Joanna Eid pour son partage et son entière disponibilité. Je remercie aussi l'ensemble du personnel du laboratoire LOMC que j'ai cotoyés, je cite en particulier Benoit Duchemin, Saber Imanzadeh, Jean Marc Kanema, Mohamed Amami, Nasredine Ahfir, Abdelah Alem, Ioan Schneider, Ahmed Benamar, Olivier Crumeyrolle, Bernard Bécue, Carole Leguen et Séverine Fauvel. De même, je remercie la région Normandie d'avoir financé ce travail de recherche.

J'adresse ensuite mes sincères remerciements à Mr. Philippe Cosenza et Mr. Isam Shahrour d'avoir accepté de rapporter ce mémoire et de m'apporter certainement des commentaires et critiques très instructifs pour l'amélioration et le renforcement de ce thème de recherche. Je remercie grandement Mme Anne Pantet qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse et également pour ses remarques et suggestions très enrichissantes. De même, je remercie vivement Mr. Jean-Marie Fleureau, Mme Mahdia Hattab et Mme Nadia Saiyouri d'avoir examiné mon travail et évalué son apport scientifique. Mes remerciements distingués s'adressent finalement à Mr. Fadi Hage Chehade d'avoir accepté d'assister à mon jury de thèse en tant qu'invité. Je suis très reconnaissant de vos conseils pertinents, de vos idées d'amélioration et des discussions fructueuses qui m'ont beaucoup aidé à améliorer la qualité de ce travail.

Le moment est venu désormais pour saluer tous mes collègues et amis qui m'ont offert une ambiance de travail très chaleureuse et conviviale. Je vous remercie du fond du cœur pour la bonne humeur, l'entrain et les moments de distraction qui ont rendu ces années de thèse particulièrement agréables. Mes collègues de bureau : Valentin, Abdessamad, Mélanie, Boubacar, Ziad, Ellynn, Sixtine, Hassan, Hrishikesh, Paul, Antoine, je n'oublierai jamais les moments de joie et les éclats de rire qu'on a partagés ensemble. Merci aussi à tous les doctorants que j'ai côtoyés pendant cette thèse : Abdillah, Abdelkader, Bachar, Daher, Firas, Mohamad Oueidat, Hoan, Ichrak, Emérance, Benjamin, Nihad, Safa, Ragav, Camille, Jonathan, Nicolas, Cheikh, Sandor, Harminder, Tassadit, Balahid, Andry, Mostafa, Hanane, Meriem, Mohamad Zaidi, Alaa, Oussama, Touria, Lyacine, Salima, Kamel, Michal...

Enfin, j'adresse toute mon affection à l'ensemble de ma famille, et en particulier, ma mère Nawal, mon père Talal, ma sœur Rasha et mon frère Mohamad, qui n'ont rien épargné pour m'aider à réaliser mes rêves. Je vous remercie énormément de m'avoir guidé, soutenu et ensoleillé sans relâche. C'est avec vos encouragements que j'ai pu accomplir tout cela. Une pensée également à mes grands-parents qui n'auront pu voir ce résultat.

Résumé

La terre crue, matériau utilisé dans la construction depuis des millénaires, présente actuellement une alternative intéressante aux matériaux onéreux et énergivores. Dans les conditions climatiques et économiques actuelles, ce matériau connaît un regain d'intérêt tant pour ses caractéristiques écologiques que pour ses propriétés thermo-hygroscopiques très performantes. Néanmoins, le matériau « terre crue » présente une vulnérabilité liée à la fissuration due aux déformations de retrait provoquées par la dessiccation. L'objectif de ce travail de thèse est de contribuer à une meilleure compréhension des mécanismes d'apparition et de propagation des fissures dans les matériaux argileux sous sollicitations hydriques. Dans ce contexte, une étude expérimentale et phénoménologique du retrait libre d'une part, du retrait empêché d'autre part est réalisée, afin de caractériser les déformations de retrait et l'amorce de la fissuration, en relation avec l'état de contrainte interne généré par dessiccation dans les sols argileux. Ceci a nécessité le développement d'un dispositif expérimental prototype adapté à la dessiccation des sols argileux et appelé DIC-CRT (**D**igital **I**mage **C**orrelation - **C**lay **R**ing **T**est). Il combine trois techniques expérimentales : la corrélation d'images numériques (DIC) l'essai de retrait empêché à l'anneau (CRT) ; la tensiométrie pour le suivi de la succion durant le processus de dessiccation. Différentes conditions aux limites, géométriques (forme et épaisseur des éprouvettes...), mécaniques (rugosité du support, retrait empêché...) et hydriques (hygrométrie ambiante) sont prospectées. Des paramètres pertinents pour quantifier les efforts internes et l'intensité des fissures dans les matériaux sont identifiés. Par ailleurs, l'effet de renforts à base de fibres végétales sur la cinétique de déformations, l'amorce et l'intensité de la fissuration sont prospectés.

Mots-clés : sols argileux ; retrait ; déformation ; succion ; fissuration par dessiccation ; Digital Image Correlation ; Clay Ring Test.

Abstract

Raw earth, a material that has been used in construction for thousands of years, currently provides an interesting alternative to expensive and power-consuming materials. The current climatic and economic conditions have led to a renewed interest in this material, both for its ecological characteristics and for its high-performance thermo-hygroscopic properties. Nevertheless, the "raw earth" material presents a vulnerability related to cracking due to shrinkage strains induced by desiccation. The aim of this thesis research is to contribute to a better insight into crack appearance and propagation mechanisms in clayey materials subjected to hydric solicitations. In this context, an experimental and phenomenological study of both free desiccation and retained desiccation is carried out in order to characterize the shrinkage strains and the crack initiation, related to the internal stresses state induced by desiccation in clayey soils. Therefore, a prototype experimental device adapted to the desiccation of clayey soils and called DIC-CRT (Digital Image Correlation - Clay Ring Test), is developed. It combines three experimental techniques: Digital Image Correlation (DIC), Clay Ring Test (CRT); and tensiometry to measure suction during the drying process. Several boundary conditions, geometrical (specimen shape and thickness...), mechanical (support roughness, restrained shrinkage...) and hydric (ambient humidity) are prospected. Relevant parameters to quantify the internal stresses and the cracks intensity in the materials are defined. In addition, the effect of plant-based reinforcements on deformation kinetics, crack initiation and intensity are prospected.

Keywords: clayey soil; shrinkage; strain; suction; desiccation cracking; Digital Image Correlation; Clay Ring Test.

Table de Matière

LISTE DES FIGURES.....	XI
LISTE DES TABLEAUX	XVII
LISTE DES EQUATIONS	XIX
GLOSSAIRE.....	XXI
INTRODUCTION GENERALE.....	1
PARTIE -A- SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	5
Chapitre I : Caractéristiques des sols argileux.....	11
I.1. Les argiles	11
I.1.1. Généralités.....	11
I.1.2. Formation des argiles	11
I.1.3. Organisation texturale des phyllosilicates	12
I.1.3.1. Feuillet.....	12
I.1.3.2. Particule	12
I.1.3.3. Agrégat	13
I.1.3.4. Espaces poreux	13
I.1.4. Structure des feuillets	13
I.1.4.1. Couche tétraédrique	13
I.1.4.2. Couche octaédrique	14
I.1.4.3. Espace interfoliaire.....	15
I.1.5. Différentes familles des phyllosilicates	15
I.1.5.1. Les phyllosilicates TO ou 1/1.....	16
I.1.5.2. Les phyllosilicates TOT ou 2/1	17
I.1.5.3. Les phyllosilicates TOT:O ou 2/1/1	17
I.2. Effet microscopique de l'eau sur les argiles.....	18
I.2.1. Types des eaux dans les argiles	18
I.2.2. Forces attractives et forces répulsives	18
I.2.2.1. Liaisons hydrogène.....	19
I.2.2.2. Forces d'attraction de Van der Waals.....	19
I.2.2.3. Hydratation des cations échangeables	19
I.2.2.4. Hydratation par osmose.....	19
I.2.3. Propriétés colloïdales des argiles.....	20
I.2.3.1. Théorie de la double couche électrique	20
I.2.3.2. Théorie DLVO	21

I.3. Effet macroscopique de l'eau sur les argiles.....	22
I.3.1. Tension de surface.....	22
I.3.2. Phénomène de mouillage.....	22
I.3.3. Classification des sols non saturés en fonction de leur état hydrique.....	24
I.3.3.1. Phase liquide discontinue (classe 1).....	24
I.3.3.2. Phase gazeuse discontinue (classe 2).....	25
I.3.3.3. Phases liquide et gazeuse continues (classe 3).....	26
I.3.3.4. Cas particuliers des sols structurés en agrégats (classe 4).....	26
I.4. Chemins de dessiccation/imbibition des sols fins.....	26
I.4.1. Cycles de dessiccation/imbibition : phénomène d'hystérésis.....	26
I.4.1.1. Plan succion-indice des vides.....	26
I.4.1.2. Plan succion-teneur en eau.....	29
I.4.2. Représentation globale des chemins de dessiccation/imbibition des pâtes d'argiles saturées.....	30
I.4.2.1. Chemins de dessiccation.....	30
I.4.2.2. Chemins d'imbibition d'une pâte d'argile préalablement séchée.....	31
I.5. Mécanisme de la fissuration des argiles par dessiccation.....	33
I.5.1. Initiation et propagation des fissures.....	33
I.5.1.1. Fissures unidirectionnelles.....	33
I.5.1.2. Fissures bidirectionnelles.....	35
I.5.1.3. Mesure de la profondeur des fissures.....	35
I.5.2. Energie de la rupture.....	36
I.5.2.1. Modes d'ouverture des fissures.....	36
I.5.2.2. Prédiction de l'initiation des fissures.....	37
I.5.2.3. Approches énergétiques.....	37
I.5.2.3.1. Critère de Griffith.....	37
I.5.2.3.2. Apports de G. R. Irwin.....	39
I.5.2.3.3. Intégrale-J.....	39
Chapitre II : Caractérisation de la fissuration.....	41
II.1. Techniques de caractérisation de la fissuration.....	41
II.1.1. Techniques de corrélation d'images.....	41
II.1.1.1. DIC.....	41
II.1.1.2. PIV.....	44
II.1.2. Autres techniques de caractérisation non destructives.....	45
II.1.2.1. Impulsions ultrasoniques.....	46
II.1.2.2. Laser.....	46
II.1.2.3. Tomographie par rayons X.....	47
II.1.2.4. Microscope optique.....	49
II.1.2.5. Méthode de résistivité électrique.....	50
II.1.3. Techniques de caractérisation mécanique.....	51
II.1.3.1. Essai à l'anneau (Ring-Test).....	51

II.1.3.2. <i>Éprouvettes de traction compactes</i>	55
II.1.3.3. <i>Essai brésilien</i>	56
II.1.3.4. <i>Essai de traction simple</i>	58
II.2. Modélisation de la fissuration	60
II.2.1. Modélisation analytique	60
II.2.2. Modélisation numérique.....	62
II.3. Quelques procédés de réduction de la fissuration par dessiccation	63
II.3.1. Renfort à l'aide de fibres végétales et synthétiques	63
II.3.2. Traitement à l'aide d'adjuvants.....	65
II.3.3. Traitement à l'aide de la bio-calcification.....	65
II.3.4. Amendement à l'aide d'une fraction granulaire de sable	68
Synthèse et conclusion de l'état de l'art	69
PARTIE -B- ETUDE DE LA FISSURATION : RETRAIT LIBRE ET EMPECHE	71
Chapitre III : Retrait et fissuration des argiles sous retrait libre	75
III.1. Matériaux et méthodes	75
III.1.1. Matériaux	75
III.1.1.1. <i>Kaolinite</i>	75
III.1.1.2. <i>Montmorillonite</i>	77
III.1.2. Dispositif expérimental.....	81
III.1.3. Technique DIC (Digital Image Correlation)	82
III.1.3.1. <i>Paramètres de la technique DIC</i>	84
III.1.3.2. <i>Calibration de la technique DIC</i>	87
III.1.4. Conditions aux limites	89
III.2. Essais préliminaires	90
III.2.1. Mise en œuvre.....	90
III.2.2. Cinétique de dessiccation.....	91
III.2.3. Analyse préliminaire de l'effet des supports.....	92
III.2.4. Effet de l'aspect moucheté.....	94
III.3. Effet des conditions aux limites	96
III.3.1. Cinétique de dessiccation.....	97
III.3.2. Analyse de la fissuration.....	98
III.3.3. Analyse du champ de déformation pré-fissuration	103
III.3.3.1. <i>Cas de la kaolinite</i>	103
III.3.3.2. <i>Cas de la montmorillonite</i>	107
III.3.3.2.1. <i>Base rugueuse</i>	107
III.3.3.2.2. <i>Base lisse</i>	110
III.3.4. Stéréo-corrélation (3D).....	115
III.4. Conclusion	116

Chapitre IV : Retrait empêché : Essai à l’anneau ASTM	119
IV.1. Matériaux et méthodes.....	119
IV.1.1. Matériaux.....	119
IV.1.2. Méthodes	120
IV.1.2.1. Essai à l’anneau : Dispositif Ring-Test ASTM C1581	120
IV.1.2.2. Interprétation de l’essai : Modèle analytique	121
IV.2. Programme expérimental et mise en œuvre.....	123
IV.2.1. Mortier de ciment	123
IV.2.2. Kaolinite P300	124
IV.2.3. Mélanges sable-kaolinite P300	124
IV.3. Résultats et discussions	125
IV.3.1. Mortier de ciment	125
IV.3.1.1. Retrait empêché.....	125
IV.3.1.2. Essais mécaniques.....	128
IV.3.2. Kaolinite P300	130
IV.3.2.1. Dessiccation et déformations de retrait.....	130
IV.3.2.2. Initiation et propagation de la fissuration.....	133
IV.3.2.3. Répartition de la teneur en eau finale	134
IV.3.3. Mélanges Sable-Kaolinite P300	135
IV.4. Conclusion.....	139
PARTIE -C- DEVELOPPEMENT D’UN DISPOSITIF PROTOTYPE DIC-CRT	141
Chapitre V : Conception d’un essai à l’anneau prototype adapté aux argiles : DIC-CRT....	143
V.1. Mise au point du dispositif DIC-CRT	145
V.1.1. Dimensionnement du dispositif	145
V.1.1.1. Géométrie de l’échantillon	145
V.1.1.2. Géométrie et type de l’anneau intérieur	146
V.1.1.3. Description du dispositif DIC-CRT	148
V.1.2. Sélection du système d’extensométrie	150
V.1.2.1. Caractéristiques des jauges d’extensométrie.....	151
V.1.2.1.1. Système de codage des jauges d’extensométrie	151
V.1.2.1.2. Pont de Wheatstone	151
V.1.2.1.3. Compensation de l’effet thermique	154
V.1.2.2. Caractéristiques du conditionneur	154
V.1.2.2.1. Connectique des câbles.....	154
V.1.2.2.2. Réglage du gain	155
V.1.3. Calibration des jauges KFW	156
V.1.3.1. Etalonnage avec une sollicitation radiale isotrope	156
V.1.3.2. Dérive des jauges KFW.....	158
V.1.4. Re-sélection des jauges d’extensométrie	159

V.1.5. Calibration des jauges KFGS	160
V.1.5.1. Dérive des jauges KFGS.....	160
V.1.5.2. Etalonnage à l'aide d'une contrainte isotrope	161
V.1.5.3. Etalonnage à l'aide d'un essai de compression diamétrale	163
V.2. Mesure de la succion par tensiométrie.....	166
V.2.1. Développement d'un tensiomètre adapté au dispositif DIC-CRT	166
V.2.2. Calibration du tensiomètre	167
V.2.2.1. Test d'étalonnage	167
V.2.2.1.1. Pression positive	167
V.2.2.1.2. Pression négative	167
V.2.2.1.3. Stabilité du tensiomètre	168
V.2.2.2. Evaluation du temps de réponse	169
V.3. Conclusion	171
Chapitre VI : Etude du retrait empêché à l'aide du dispositif DIC-CRT	173
VI.1. Essai de retrait empêché sur la kaolinite	173
VI.1.1. Mise en œuvre	174
VI.1.2. Évolution de la teneur en eau et de la succion durant la dessiccation.....	175
VI.1.3. Déformations mesurées par la technique CRT	178
VI.1.4. Analyse du retrait et de la fissuration	180
VI.1.5. Déformations mesurées par la technique DIC	181
VI.1.5.1. Déformations dans le plan (2D).....	181
VI.1.5.2. Stéréo-corrélation (3D).....	187
VI.1.6. Corrélations entre les techniques DIC et CRT	191
VI.2. Effet des conditions aux limites et de l'état hydrique initial sur le retrait et la fissuration des argiles	193
VI.2.1. Cinétique de séchage	193
VI.2.2. Déformations mesurées par la technique CRT	194
VI.2.3. Analyse du retrait et de la fissuration	196
VI.2.4. Déformations mesurées par la technique DIC	197
VI.2.4.1. Déformations dans le plan (2D).....	197
VI.2.4.2. Stéréo-corrélation (3D).....	199
VI.2.5. Corrélations entre les techniques DIC et CRT	200
VI.3. Effet des renforts sur le retrait et la fissuration des argiles	205
VI.3.1. Matériaux des renforts	205
VI.3.1.1. Treillis en acier	205
VI.3.1.2. Fibres végétales.....	205
VI.3.2. Protocole de mise en œuvre	206
VI.3.3. Cinétique de séchage	207
VI.3.4. Déformations mesurées par la technique CRT	208

VI.3.5. Analyse du retrait et de la fissuration	211
VI.3.6. Déformations mesurées par la technique DIC	213
VI.3.7. Corrélation entre les techniques DIC et CRT	217
VI.4. Effet de l'humidité relative ambiante sur le retrait et la fissuration des argiles	220
VI.4.1. Méthodes	220
VI.4.1.1. Méthode de contrôle de l'humidité relative ambiante	220
VI.4.1.2. Relation succion - humidité relative	222
VI.4.1.3. Ré-calibration de la technique DIC suite à la présence de l'interface en verre.....	223
VI.4.2. Effet de l'humidité relative ambiante sur la cinétique de séchage	224
VI.4.3. Déformations mesurées par la technique CRT	225
VI.4.4. Analyse du retrait et de la fissuration	229
VI.4.5. Déformations mesurées par la technique DIC	230
VI.5. Discussion : Contraintes mécaniques et succion.....	232
VI.5.1. Estimation de la contrainte totale dans l'argile	232
VI.5.2. Comparaison des contraintes DIC-CRT et ASTM Ring-Test.....	234
VI.5.3. Comparaison avec les résultats de la littérature	235
VI.5.4. Analyse de l'évolution des contraintes totales et de la succion dans l'argile au cours de la dessiccation.....	238
VI.6. Conclusion.....	240
CONCLUSION GENERALE	243
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	247
ANNEXES.....	267
Annexe 1.....	269
Annexe 2.....	271
Annexe 3.....	273
Annexe 4.....	275
Annexe 5.....	277

Liste des Figures

Figure 1: Organisation texturale d'une smectite [Touret, 1990].	12
Figure 2: (A) Tétraèdre (SiO_4^{4-}) ; (B) vue en 3D d'une couche tétraédrique; (C) vue selon les directions a, b et c [Caner, 2011].	14
Figure 3: Structure de la couche octaédrique : (a) couche dioctaédrique ; (b) couche trioctaédrique [Hubert, 2008].	14
Figure 4: Structure cristalline : (a) d'une kaolinite [Jaradat, 2017] ; (b) d'une montmorillonite [Gautier, 2008].	16
Figure 5: Evolution du potentiel électrique et distribution des cations dans la double couche diffuse,	21
Figure 6: Section d'une aiguille flottant à la surface de l'eau.	22
Figure 7: Schéma de principe de (a) l'angle de contact, et de (b) l'angle de glissement, d'une goutte de liquide.	23
Figure 8: Variation du rayon du ménisque dans un sol granulaire non saturé.	24
Figure 9: Classification des sols en fonction de leur degré d'humidité et de leur granulométrie [Taibi, 1994].	24
Figure 10: Phase liquide discontinue [Taibi, 2007].	25
Figure 11: Caractéristiques de la courbe du retrait d'un sol naturel.	27
Figure 12: Comparaison des chemins de compression œdométrique et isotrope (en fonction de $p' = p - u_w$) et du chemin de drainage NC (en fonction de $-u_w$) dans le domaine saturé pour l'argile jaune P300 [Taibi, 1994].	28
Figure 13: Courbes de rétention d'un limon [Péron, 2008].	28
Figure 14: Courbes de rétention (a) d'une argile verte [Yigzaw, 2009] ; et (b) d'un limon silteux [Chauhan, 2019].	30
Figure 15: Photo MEB d'une montmorillonite à une humidité relative de 90 % [Maison, 2008].	31
Figure 16: Premier cycle de dessiccation-imbibition sur l'argile jaune initialement préparée sous forme de pâte à $w_i = 1.5 w_L$ [Indarto, 1991].	32
Figure 17: (a) Evolution de la largeur des fissures au cours du temps de séchage [Lecocq, 2003] ; (b) Schéma descriptif de la progression des fissures dans un essai en bande [Amarasiri, 2011] ; (c) Aspect final d'un essai en H [Avila, 2013].	34
Figure 18: Motif (a) orthogonal ; (b) non orthogonale ; des fissures par dessiccation [Corte, 1960].	35
Figure 19: Schéma descriptif de la morphologie du réseau des fissures en Z [Sanchez, 2013].	36
Figure 20: Modes d'ouverture des fissures.	36
Figure 21: (A) Plaque infinie chargée par une contrainte σ ;	38
Figure 22: Contour de l'intégrale-J autour de la pointe de la fissure	40
Figure 23: Orientation des champs de déformations et de déplacements aux extrémités des fissures en (a) mode I ; (b) modes mixtes I et II ; (c) modes mixtes I et III [Wei, 2014].	42
Figure 24: Champ de déplacements et de déformations lors du séchage d'un échantillon de limon naturel [Eid, 2015].	43
Figure 25: Evolution de la déformation ϵ_{xx} au cours du séchage dans des échantillons soumis à des différentes succions imposées [Ameur, 2016].	44
Figure 26: Maillage de PIV utilisé pour calculer les champs de déformation dans un essai en bande [Costa, 2010].	45
Figure 27: (a) Principe de l'essai d'impulsions ultrasoniques ; (b) Phases observées lors du chargement uniaxial [Wang, 2015].	46
Figure 28: Etude de la fissuration par balayage de la surface à l'aide d'un laser [Sanchez, 2013].	47
Figure 29: L'évolution des paramètres géométriques moyens des fissures dans la direction longitudinale pendant la dessiccation [Tang, 2019].	49
Figure 30: Initiation d'une fissure au fond d'un défaut de surface lors de la dessiccation [Shin, 2011].	49
Figure 31: Comparaison des images de fissures de dessiccation et de résistivité électrique à différents moments du processus de séchage [Tang, 2018].	51
Figure 32: Distribution des contraintes dans le cas d'un anneau circulaire et un anneau elliptique [Dong, 2014].	52

Figure 33: Distribution des contraintes résiduelles dans le Ring-Test en fonction de la direction de séchage [Moon, 2006a].	53
Figure 34: Comparaison entre les contraintes mécaniques mesurées par le Ring-Test et celles calculées selon le modèle de.	54
Figure 35: Comparaison entre les contraintes de traction (circonférentielles) et de compression (radiales) analytiques et expérimentales dans l'essai Ring-Test [Shannon, 2015].	55
Figure 36: Eprouvette de traction compacte réalisée sur une argile [Avila, 2004].	56
Figure 37: Méthodes de chargement dans l'essai brésilien (a) [ASTM, 1984] ; (b) [ISRM, 1978] ; d'après [Stirling, 2013].	57
Figure 38: Etats finals des éprouvettes de marnes durant l'essai brésilien [Andrianatrehina, 2016].	58
Figure 39(a) : Dispositif pour mesurer la résistance à la traction simple d'un sol [Avila, 2004].	59
Figure 40: Représentation schématique du modèle proposé par Kodikara et Choi [Kodikara, 2006].	61
Figure 41: Comportement mécanique des sols renforcés et non renforcé lors d'un essai de traction directe [Chebbi, 2020].	64
Figure 42: Evolution du Crack Ratio lors de la dessiccation des limons avec et sans renforcement en fibres de lin [Eid, 2015].	65
Figure 43: Les différents types d'injections des bactéries dans le sol [Filet, 2012].	66
Figure 44: Microphotographies d'un nœud d'intersection de fissures d'un échantillon traité à la MICP : (a) après le traitement préliminaire ; (b) après le premier cycle de traitement ; (c) après le troisième cycle ; (d) après le cinquième cycle ; (e) cristaux de CaCO ₃ sur les lèvres de la fissure [Liu, 2020].	67
Figure 45: Diffractogramme de la kaolinite P300 ; K: kaolinite et I: illite.	76
Figure 46: Observation au MEB de la kaolinite P300 [Hammad, 2010].	76
Figure 47: Courbes granulométriques de la kaolinite P300 et de la montmorillonite grecque [Hammad, 2010].	77
Figure 48(b): Diffractogramme DRX de la montmorillonite grecque ($65^\circ < \text{angle } 2\theta < 80^\circ$) ; S : Smectite.	78
Figure 49: Spectre infrarouge de la montmorillonite grecque à l'état de poudre [Souli, 2004].	78
Figure 50: Observation au MEB de la montmorillonite grecque [Hammad, 2010].	79
Figure 51: Premier cycle de dessiccation-imbibition sur la montmorillonite grecque initialement préparée	80
Figure 52: Schéma descriptif du dispositif expérimental.	81
Figure 53: Distribution granulométrique de la poudre de PVC utilisée pour réaliser l'aspect moucheté des échantillons étudiés	82
Figure 54: Déformation d'un motif [Jones, 2018].	83
Figure 55: Dispositif utilisé dans la calibration de la technique DIC.	87
Figure 56: Ecarts entre les déplacements mesurés et les déplacements imposés suivant les axes X, Y et Z.	88
Figure 57: Essais préliminaires de retrait libre.	90
Figure 58: Vue de dessus de l'état initial de l'échantillon A8 :	91
Figure 59: Evolution de la teneur en eau pendant la dessiccation.	91
Figure 60: Etat final après dessiccation complète des échantillons A1, A2, A3, A7 et A8 sur un support en Téflon.	93
Figure 61: Etat final après dessiccation complète des échantillons A4 et A5.	94
Figure 62: Fusion des points noirs de la peinture aérosol au cours du séchage dans l'échantillon A6.	95
Figure 63: Zones décorrélées lors du traitement d'images de l'échantillon A7.	96
Figure 64: Essais de retrait libre traitant l'effet des conditions aux limites et de l'épaisseur des échantillons.	96
Figure 65(a): Evolution de la teneur en eau des échantillons de kaolinite pendant la dessiccation.	97
Figure 66: Etat final des échantillons de kaolinite après dessiccation.	99
Figure 67: Analyse du retrait global et du réseau des fissures. Exemple du cas de l'échantillon B1.	100
Figure 68(a): Etat final des échantillons de montmorillonite ayant une épaisseur de 8 mm (après dessiccation).	102
Figure 69: Champ de déformation dans l'échantillon B1 lors de l'initiation de la première fissure :	104
Figure 70: Champ de déformations tangentielles ϵ_{xy} dans l'échantillon B1 lors de l'initiation de la première fissure.	104
Figure 71: Evolution de la déformation locale dans l'échantillon B1 au cours du séchage.	105
Figure 72(a): Evolution des déformations locales dans l'échantillon B1 au cours du séchage.	106

Figure 73: Champ de déformation dans l'échantillon B5 lors de l'initiation de la première fissure :	107
Figure 74: (a) Orientation des déformations principales majeures ; (b) Orientation des vecteurs de déplacement ; dans la zone d'initiation de la première fissure dans l'échantillon B5.....	108
Figure 75: Evolution de la déformation locale dans l'échantillon B5 au cours du séchage.....	108
Figure 76(a): Evolution des déformations locales dans l'échantillon B5 au cours du séchage.....	109
Figure 77: Champ de déformations de cisaillement dans l'échantillon B7 lors de l'apparition des deux premières fissures..	111
Figure 78: Champ du déplacement dans la direction X dans l'échantillon B9 lors de l'apparition de la première fissure.	112
Figure 79: (a) Champ de déformations principales majeures; (b) Orientation des déformations principales majeures; dans l'EchB12.	112
Figure 80: (a) Champ de déformations principales mineures; (b) Orientation des déformations principales mineures; dans l'EchB12.	113
Figure 81: Déformations locales aux extrémités de la fissure BC dans l'EchB12.	114
Figure 82: (a) Champ de déformations verticales ; (b) Champ de déformations principales mineures ;	115
Figure 83: (a) Champ de déformations verticales ; (b) Champ de déformations principales mineures ;	116
Figure 84 : Schéma descriptif du dispositif Ring-Test ASTM C1581.....	120
Figure 85: Vue de surface du Ring-Test montrant la méthodologie utilisée dans le calcul analytique.....	121
Figure 86: Un élément de l'anneau en béton présentant l'état de contraintes dans le plan (x,y) en coordonnées polaires.....	123
Figure 87: Vue du dessus du Ring-Test (a) après la mise en œuvre du matériau ; (b) après le décoffrage.....	124
Figure 88: Essais de retrait empêché traitant l'effet de la teneur en eau initiale et de l'amendement de l'argile à l'aide d'une fraction granulaire de sable.	125
Figure 89: Vue du dessus (a) après la mise en œuvre du mortier ; (b) après la fissuration de l'échantillon C1.....	125
Figure 90: Evolution de la déformation circonférentielle de l'anneau en acier au cours du séchage.....	126
Figure 91: Comparaison des contraintes de traction entre l'échantillon C1 et les résultats de [Haouas, 2007].....	127
Figure 92: Evolution des (a) contraintes circonférentielles ; (b) contraintes radiales ; en fonction du rayon du dispositif	128
Figure 93(a): Résultats des essais de compression simple réalisés sur le mortier.....	129
Figure 94: (a) Evolution de la déformation circonférentielle de l'anneau en acier lors de la mise en œuvre du matériau.	131
Figure 95: Evolution des contraintes de traction au cours du séchage. Exemple du cas de l'échantillon C3.	132
Figure 96: Initiation et propagation des fissures dans l'échantillon C3.	133
Figure 97: (a) Etat final de l'échantillon C3 ; (b) Répartition de la teneur en eau finale (en %) dans l'échantillon C3.....	134
Figure 98: (a) Evolution des déformations dans l'anneau en acier au cours du séchage pour les échantillons de « 100K 0S ».	135
Figure 99: (a) Evolution des déformations dans l'anneau en acier au cours du séchage pour une teneur en eau initiale de 1.1w _L	138
Figure 100: (a) Simulation numérique des déformations circonférentielles induites par les déformations de retrait des matériaux argileux pour trois types de matériaux.	147
Figure 101(a): Schéma descriptif du dispositif expérimental DIC-CRT (vue générale).....	149
Figure 102: Structure d'une jauge de déformation.....	150
Figure 103: (a) Pont de Wheatstone	152
Figure 104: (a) Face avant et (b) Face arrière ; du conditionneur VISHAY 2120A.	155
Figure 105: Déformation circonférentielle théorique de l'anneau métallique en fonction d'une pression d'interface fictive.	156
Figure 106: Déformations mesurées par les jauges d'extensométrie KFW suite à des incréments de 100 kPa et 200 kPa.	157
Figure 107: Déformations mesurées par les jauges d'extensométrie KFW pour un essai à vide.....	158
Figure 108: (a) Vue globale des anneaux portant les jauges actives et passives ;.....	160
Figure 109: Déformations mesurées par les jauges d'extensométrie KFGS pour un essai à vide.	161
Figure 110: (a) Vue du dessus de la chambre à air enfermée dans une boîte cylindrique en PVC ;	161

Figure 111: Déformations mesurées par les jauges KFGS suite à des incréments de 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa et 200 kPa..	162
Figure 112: Répartition des contraintes théoriques (a) σ_{xx} et (b) σ_{yy} dans l'anneau métallique pour un chargement de 10 N.	164
Figure 113: (a) Déformations des jauges d'extensométrie lors du premier test d'étalonnage dans lequel les jauges J1 et J3 sont placées suivant les génératrices de l'anneau.....	165
Figure 114(a): Schéma descriptif du tensiomètre développé.....	166
Figure 115: (a) Etalonnage du tensiomètre à l'aide d'une pression interstitielle positive.....	167
Figure 116: Mesures du tensiomètre sur un échantillon d'argile sèche.....	170
Figure 117: Etapes de mise en œuvre de l'échantillon D1.....	175
Figure 118: (a) Evolution de la teneur en eau de l'échantillon D1 au cours du séchage.....	176
Figure 119: Évolution de la succion au cours du séchage : Mesures des tensiomètres et valeurs déduites des courbes de rétention (SWRC).....	177
Figure 120(a): Déformations de l'anneau métallique dans l'échantillon D1 pendant le séchage.....	179
Figure 121: Vue de dessus de l'échantillon D1 à l'état final.....	181
Figure 122: Schéma descriptif des déformations libre, élastique et résiduelle dans l'échantillon étudié.....	182
Figure 123: (A) Visualisation des déformations principales majeures dans l'échantillon D1.....	183
Figure 124(a): Evolution des déformations circonférentielles dans l'échantillon D1 en fonction du rayon.....	185
Figure 125(a): Directions des déformations principales majeures une heure après la fissuration de l'échantillon D1.....	186
Figure 126(a): Visualisation des déformations verticales dans l'échantillon D1 à la fin de l'expérience.....	188
Figure 127(b): Evolution des déformations principales majeures (ϵ_1), principales mineures (ϵ_2) et verticales (ϵ_z) moyennes au cours du séchage dans l'échantillon D1.....	190
Figure 128: Déformation circonférentielle dans l'échantillon D1 lors de l'initiation de la première fissure.....	192
Figure 129: Essais de retrait empêché traitant l'effet des conditions aux limites et de la teneur eau en initiale.....	193
Figure 130: Evolution de la teneur en eau des échantillons D1 à D5 au cours du séchage.....	194
Figure 131: Déformations de l'anneau métallique dans l'échantillon D5 pendant le séchage.....	195
Figure 132: Densité de retrait global et densité de fissuration des échantillons D1 à D5 à la fin de la dessiccation.....	196
Figure 133(a): Visualisation des déformations principales majeures dans l'échantillon D5 à la fin de la dessiccation.....	198
Figure 134: Comparaison entre l'évolution des déformations principales majeures (ϵ_1), principales mineures (ϵ_2).....	199
Figure 135: Comparaison entre l'évolution de l'indice des vides dans les échantillons D1 et D5 déterminé à l'aide de la technique DIC, et celui déduit des courbes de rétention du matériau SWRC.....	200
Figure 136: (a) Evolution des déformations circonférentielles mesurées par la technique CRT dans l'échantillon D5.....	202
Figure 137: Comparaison entre les déformations circonférentielles maximales déterminées par la technique DIC et celles déterminées par la technique CRT.....	204
Figure 138: Essais de retrait empêché traitant l'effet du renfort par treillis en acier et par fibres de lin.....	205
Figure 139: Evolution de la teneur en eau des échantillons avec et sans renforts au cours du séchage.....	208
Figure 140(a): Déformations de l'anneau métallique dans l'échantillon E7 pendant la mise en œuvre de l'argile.....	209
Figure 141: Schéma des fissures à la fin du processus de séchage. Exemple du cas de l'échantillon E7.....	211
Figure 142: Densité de retrait global et densité de fissuration des échantillons étudiés à la fin de la dessiccation.....	213
Figure 143(a): Évolution des déformations circonférentielles à la fin de la dessiccation, au voisinage immédiat de l'anneau métallique, en fonction de l'angle θ du contour de l'échantillon.....	214
Figure 144(a): Vue de dessus de l'échantillon E2 à l'état final.....	216
Figure 145: (a) Évolution de la déformation circonférentielle maximale (DIC) dans l'Ech D1 en fonction de la teneur en eau.....	218
Figure 146: Pente de la déformation CRT et pente de la déformation DIC lors de la fissuration des échantillons avec et sans renfort.....	219
Figure 147: Essais de retrait empêché traitant l'effet de l'humidité relative ambiante.....	220

Figure 148: Vue de dessus de l'enceinte hermétique et des solutions salines permettant de contrôler l'humidité relative ambiante.	221
Figure 149: Evolution de la teneur en eau des échantillons F5 et F6 en fonction du temps de séchage, sous des humidités relatives contrôlées par la technique d'équilibre de vapeur.	222
Figure 150: Ecarts entre les déplacements mesurés et les déplacements imposés suivant les axes X, Y et Z.	224
Figure 151: Evolution de la teneur en eau des échantillons étudiés au cours du séchage.	225
Figure 152(a): Déformations de l'anneau métallique dans l'échantillon F1 pendant le séchage.	227
Figure 153: Densité de retrait global et densité de fissuration des échantillons étudiés à la fin de la dessiccation.	229
Figure 154: Comparaison entre l'évolution des déformations principales majeures (ϵ_1), principales mineures (ϵ_2) et.....	231
Figure 155: Evolution des contraintes circonférentielles à l'interface argile/métal au cours de la dessiccation.	233
Figure 156: Evolution de la contrainte maximale de traction en fonction de la cinétique de séchage.	234
Figure 157: Comparaison entre les contraintes mécaniques moyennes estimées dans les échantillons C3, D1 et D2.....	235
Figure 158(a): Comparaison entre les contraintes mécaniques moyennes estimées dans les échantillons C3, D1 et D2 et ...	236
Figure 159: Comparaison entre l'évolution des contraintes totales et de la succion dans l'échantillon D1 au cours de la dessiccation.	239

Liste des Tableaux

Tableau 1: Différentes familles des phyllosilicates [Caner, 2011].	15
Tableau 2: Caractéristiques géotechniques de la montmorillonite grecque et de la kaolinite jaune [Fleureau, 1993].	75
Tableau 3: Paramètres du matériel de corrélation d'images numériques.	85
Tableau 4: Paramètres de corrélation d'images numériques en 2D.	86
Tableau 5: Paramètres de corrélation d'images numériques en 3D.	86
Tableau 6: Caractéristiques du papier Téflon [Approflon, 2010].	89
Tableau 7: Densité de retrait global (GSR) des échantillons de kaolinite.	100
Tableau 8: Densité de retrait global (GSR) des échantillons de montmorillonite.	101
Tableau 9: Différents modes de fissuration observés dans le Chapitre 3.	117
Tableau 10: Proportions massiques du mortier de ciment.	119
Tableau 11: Etude comparative entre les déformations théorique et expérimentale pour des incréments de 200 et 100 kPa.	158
Tableau 12: Propriétés mécaniques des fibres végétales de lin [Eid, 2015].	206
Tableau 13: Description des échantillons renforcés.	207
Tableau 14: Humidités relatives et succions correspondantes.	223
Tableau 15: Caractéristiques géotechniques des sols étudiés par Tang & Graham [Tang, 2000], Vesga & Vallejo [Vesga, 2006], Abou Najm et al. [Abou Najm, 2009] et Lu et al. [Lu, 2007].	237

Liste des Equations

(1).....	22
(2).....	23
(3).....	25
(4).....	25
(5).....	29
(6).....	38
(7).....	38
(8).....	38
(9).....	39
(10).....	39
(11).....	39
(12).....	82
(13).....	99
(14).....	122
(15).....	122
(16).....	122
(17).....	122
(18).....	122
(19).....	128
(20).....	128
(21).....	128
(22).....	150
(23).....	150
(24).....	152
(25).....	154
(26).....	155
(27).....	163
(28).....	163
(29).....	180
(30).....	180
(31).....	222

Glossaire

Lettres latines :

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

ASTM: American Society for Testing Materials

BEM: Boundary Element Method

BET : Théorie Brunauer, Emmett et Teller

CEC : Capacité d'Echange Cationique

cm CE : centimètre Colonne d'Eau

CR: Crack Ratio

Cr: Crack

CRT: Clay Ring Test

DEM: Discrete Element Method

DIC: Digital Image Correlation

DRX : Diffraction des Rayons X

e : indice des vides

E : module de Young

E_{if} : espace interfoliaire

f_{ck} : résistance à la compression du béton

FDM: Finite Difference Method

FEM: Finite Element Method

GSR: Global Shrinkage Ratio

G-strain : déformation mesurée dans l'anneau métallique

HR : Humidité Relative

I_p : indice de plasticité

k_w : perméabilité du sol à l'eau

k_a : perméabilité du sol à l'air

KFGS: Kyowa General-purpose Foil Strain gages

KFW: Kyowa Waterproof Foil strain gages

LEFM: Linear Elastic Fracture Mechanics

MEB : Microscope Electronique à Balayage

MICP: Microbiologically Induced Calcite Precipitation

MMC : Mécanique des Milieux Continus

PIV: Particle Image Velocimetry

P_{int} : pression d'interface fictive

P_{in} : porosité intra-particulaire

P_{ip} : porosité inter-particulaire

P_{ia} : porosité inter-agrégat

p_c : pression capillaire

S_r : degré de saturation

S-strain : déformation mesurée dans l'échantillon de sol

SWRC: Soil Water Retention Curve

$-u_w$: succion

U_e : énergie élastique

U_s : énergie dissipée

U_l : énergie libre

U_p : énergie plastique

w : teneur en eau

w_L : limite de liquidité

w_p : limite de plasticité

Lettres grecques :

γ_{lv} : tension de surface liquide-vapeur

γ_{sl} : tension de surface solide-liquide

γ_{sv} : tension de surface solide-vapeur

γ_s : poids volumique des grains solides

γ_w : poids volumique de l'eau

ϵ_{xx} : composante normale de la déformation dans la direction x

ϵ_{yy} : composante normale de la déformation dans la direction y

ϵ_{zz} : composante normale de la déformation dans la direction z

ϵ_{xy} : déformation de cisaillement (ou distorsion angulaire)

ϵ_1 : déformation principale majeure

ϵ_2 : déformation principale mineure

$\epsilon_{\theta\theta}$: déformation circonférentielle

ϵ_{rr} : déformation radiale

$\epsilon_{r\theta}$: déformation de cisaillement (ou distorsion angulaire)

ϵ_v : déformation volumique

ζ : potentiel zêta

θ_a : angle de contact avancé

θ_r : angle de contact reculé

θ_{rd} : la teneur en eau volumétrique résiduelle

θ_{st} : la teneur en eau volumétrique de saturation

ν : coefficient de Poisson

$\sigma_{\theta\theta}$: contrainte circonférentielle

σ_{rr} : contrainte radiale

$\sigma_{r\theta}$: contrainte de cisaillement

Introduction générale

Dans notre société actuelle, les enjeux environnementaux et les défis écologiques prennent une acuité croissante. L'humanité prend conscience que les ressources naturelles et non renouvelables s'épuisent et qu'elles ne dureront pas éternellement. Dans le domaine de la construction, cela implique l'existence d'un besoin primaire de matériaux plus conviviaux pour l'environnement. Dans ce contexte, les éco-matériaux à base de terre crue constituent l'une des perspectives de recherche prometteuses pour l'avenir des matériaux de construction.

La construction en terre, souvent sous-estimée comme technique de construction, ne doit pas masquer le fait qu'aujourd'hui encore plus d'un tiers de la population mondiale réside dans des maisons en terre. De plus, le marché des bâtiments en terre, universellement répandu sur tous les continents habités, évolue rapidement dans des nombreux pays du monde. A titre d'exemple, en Australie, il représente 20 % du marché des nouvelles constructions [Anger, 2009]. Cette technique de construction présente des performances avantageuses, lui offrant un succès incontestable, tel que sa faible consommation en énergie grise, sa disponibilité quasi-immédiate, son inertie thermique, sa bonne isolation phonique, ainsi que ses propriétés hygro-thermiques.

La terre crue contient des sols argileux, qui se caractérisent par une variation de volume conséquente lorsqu'ils sont soumis à une succion importante. Lors de la dessiccation, définie comme la perte d'eau par évaporation, le sol argileux se désature et une variation de volume se produit tant que la teneur en eau du sol reste supérieure à la limite de retrait. Ce changement de volume entraîne un retrait du matériau. Un retrait conséquent est susceptible d'endommager l'ouvrage à cause des fissures qui s'amorcent et se propagent une fois que les contraintes mécaniques internes, dues à la succion, dépassent la résistance mécanique du matériau. La fissuration a des conséquences sur les propriétés hydrauliques, mécaniques et thermiques de l'ouvrage, notamment en ce qui concerne la capacité de rétention d'eau, la perméabilité, les transferts hygro-thermiques et la résistance mécanique.

Des nombreux chercheurs se sont penchés dans la littérature sur l'étude des phénomènes de retrait et de fissuration dans les sols fins argileux. Ces travaux s'intéressent à la compréhension des mécanismes qui régissent ces phénomènes, notamment à l'origine de la fissuration dans le matériau, ainsi qu'à sa propagation à travers l'analyse de plusieurs paramètres tels que : la morphologie des fissures, la densité de fissuration et leur connectivité.

L'objectif principal de cette thèse est de tenter de caractériser les mécanismes d'apparition et de propagation des fissures dans les matériaux argileux ; tout d'abord en essayant de comprendre quelles sont les mécanismes qui sont à l'origine de ce phénomène, puis de quantifier les efforts internes qui sont à l'origine de cette fissuration pour tenter soit de les prévenir, soit de les minimiser. Les travaux décrits dans ce manuscrit constituent une modeste contribution aux études et recherches visant à prospecter ce sujet assez complexe.

Pour rendre compte du travail effectué, le contenu de ce manuscrit de thèse est structuré en trois parties :

- la **première partie** présente une synthèse bibliographique succincte et est composée de deux chapitres. Le **Chapitre I** est dédié à la description de la constitution minéralogique et de l'organisation texturale des sols argileux. Compte tenu de cette description, les interactions entre l'eau et la matrice argileuse sont abordées tant à l'échelle microscopique que macroscopique. De même, nous présentons dans ce chapitre les chemins de dessiccation/imbibition des pâtes d'argiles saturées, ainsi que les mécanismes de la fissuration par dessiccation dans les argiles. Le **Chapitre II** contient une synthèse des différentes méthodes expérimentales et théoriques utilisées dans la littérature pour caractériser le retrait et la fissuration.
- la **deuxième partie** est une étude expérimentale comprenant deux chapitres. Le **Chapitre III** présente des essais de retrait libre réalisées sur une argile gonflante et une autre non gonflante. Dans ces essais, nous avons utilisé la technique de corrélation d'images numériques (DIC) pour suivre l'état de déformations au sein du matériau durant le séchage, et jusqu'à l'apparition de la fissuration provoquant sa rupture. Le **Chapitre IV** présente une série d'essais de retrait empêché réalisés à l'aide du dispositif Ring-Test standard ASTM C1581. Le but de ces essais est d'estimer l'état de contraintes dans le matériau durant sa dessiccation, afin de déterminer sa résistance mécanique ultime.
- la **troisième partie** est consacrée au développement d'un dispositif expérimental prototype appelé DIC-CRT. Ce dispositif vise à combiner deux techniques expérimentales : la corrélation d'images numériques (DIC : Digital Image Correlation) et l'essai à l'anneau dans les argiles (CRT : Clay Ring Test), afin d'évaluer simultanément les déformations et les contraintes qui se développent au sein du matériau tout au long du processus de dessiccation. De plus, nous avons équipé ce dispositif de tensiomètres permettant de suivre l'évolution de la succion pendant le séchage. Cette partie est également composée de deux

chapitres. Le **Chapitre V** est dédié au dimensionnement du dispositif DIC-CRT, ainsi qu'à son instrumentation et sa calibration (jauges d'extensométrie, tensiomètres, ...). Dans le **Chapitre VI**, nous présentons les résultats expérimentaux des essais de retrait empêché réalisés à l'aide du dispositif DIC-CRT. Ce chapitre est structuré en cinq volets. Le premier volet correspond à l'analyse et l'interprétation d'un essai de référence, réalisé sur la kaolinite initialement préparée à $w = 1.5 w_L$ sous forme de boue. Dans le deuxième volet, nous étudions l'effet des conditions aux limites (rugosité des supports) et de l'état hydrique initial de l'échantillon sur son comportement mécanique lors de la dessiccation. Dans le troisième volet, nous présentons l'effet des renforts sur l'initiation et la propagation des fissures dans l'échantillon. Dans le quatrième volet, nous étudions l'effet des conditions aux limites hygrométriques sur la cinétique de séchage et le comportement mécanique du matériau argileux associé. Dans le cinquième volet, nous discutons les contraintes mécaniques dues à la succion qui se développent dans le matériau pendant la dessiccation.

Ce manuscrit se termine par une **conclusion générale** qui récapitule les principaux résultats et apports de ce travail. Elle propose par ailleurs certaines perspectives et pistes d'études, pour mieux rendre compte des phénomènes complexes mis en jeu, notamment en vue de leur modélisation.

Partie -A-

Synthèse Bibliographique

SOMMAIRE DE LA PARTIE -A-

Chapitre I : Caractéristiques des sols argileux.....	11
I.1. Les argiles	11
I.1.1. Généralités.....	11
I.1.2. Formation des argiles	11
I.1.3. Organisation texturale des phyllosilicates	12
I.1.3.1. Feuillet.....	12
I.1.3.2. Particule	12
I.1.3.3. Agrégat	13
I.1.3.4. Espaces poreux	13
I.1.4. Structure des feuillets	13
I.1.4.1. Couche tétraédrique	13
I.1.4.2. Couche octaédrique	14
I.1.4.3. Espace interfoliaire.....	15
I.1.5. Différentes familles des phyllosilicates	15
I.1.5.1. Les phyllosilicates TO ou 1/1.....	16
I.1.5.2. Les phyllosilicates TOT ou 2/1	17
I.1.5.3. Les phyllosilicates TOT:O ou 2/1/1	17
I.2. Effet microscopique de l'eau sur les argiles.....	18
I.2.1. Types des eaux dans les argiles	18
I.2.2. Forces attractives et forces répulsives	18
I.2.2.1. Liaisons hydrogène.....	19
I.2.2.2. Forces d'attraction de Van der Waals.....	19
I.2.2.3. Hydratation des cations échangeables	19
I.2.2.4. Hydratation par osmose.....	19
I.2.3. Propriétés colloïdales des argiles.....	20
I.2.3.1. Théorie de la double couche électrique	20
I.2.3.2. Théorie DLVO	21
I.3. Effet macroscopique de l'eau sur les argiles.....	22
I.3.1. Tension de surface.....	22
I.3.2. Phénomène de mouillage.....	22
I.3.3. Classification des sols non saturés en fonction de leur état hydrique	24
I.3.3.1. Phase liquide discontinue (classe 1).....	24
I.3.3.2. Phase gazeuse discontinue (classe 2)	25
I.3.3.3. Phases liquide et gazeuse continues (classe 3).....	26
I.3.3.4. Cas particuliers des sols structurés en agrégats (classe 4)	26
I.4. Chemins de dessiccation/imbibition des sols fins	26
I.4.1. Cycles de dessiccation/imbibition : phénomène d'hystérésis	26

I.4.1.1. Plan succion-indice des vides	26
I.4.1.2. Plan succion-teneur en eau.....	29
I.4.2. Représentation globale des chemins de dessiccation/imbibition des pâtes d’argiles saturées	30
I.4.2.1. Chemins de dessiccation.....	30
I.4.2.2. Chemins d’imbibition d’une pâte d’argile préalablement séchée.....	31
I.5. Mécanisme de la fissuration des argiles par dessiccation	33
I.5.1. Initiation et propagation des fissures	33
I.5.1.1. Fissures unidirectionnelles	33
I.5.1.2. Fissures bidirectionnelles	35
I.5.1.3. Mesure de la profondeur des fissures	35
I.5.2. Energie de la rupture	36
I.5.2.1. Modes d’ouverture des fissures	36
I.5.2.2. Prédiction de l’initiation des fissures	37
I.5.2.3. Approches énergétiques.....	37
I.5.2.3.1. Critère de Griffith	37
I.5.2.3.2. Apports de G. R. Irwin	39
I.5.2.3.3. Intégrale-J.....	39
Chapitre II : Caractérisation de la fissuration.....	41
II.1. Techniques de caractérisation de la fissuration.....	41
II.1.1. Techniques de corrélation d’images.....	41
II.1.1.1. DIC.....	41
II.1.1.2. PIV.....	44
II.1.2. Autres techniques de caractérisation non destructives	45
II.1.2.1. Impulsions ultrasoniques.....	46
II.1.2.2. Laser.....	46
II.1.2.3. Tomographie par rayons X.....	47
II.1.2.4. Microscope optique	49
II.1.2.5. Méthode de résistivité électrique.....	50
II.1.3. Techniques de caractérisation mécanique	51
II.1.3.1. Essai à l’anneau (Ring-Test).....	51
II.1.3.2. Éprouvettes de traction compactes.....	55
II.1.3.3. Essai brésilien	56
II.1.3.4. Essai de traction simple.....	58
II.2. Modélisation de la fissuration.....	60
II.2.1. Modélisation analytique	60
II.2.2. Modélisation numérique.....	62
II.3. Quelques procédés de réduction de la fissuration par dessiccation	63
II.3.1. Renfort à l’aide de fibres végétales et synthétiques	63
II.3.2. Traitement à l’aide d’adjuvants.....	65
II.3.3. Traitement à l’aide de la bio-calcification.....	65

II.3.4. Amendement à l'aide d'une fraction granulaire de sable	68
Synthèse et conclusion de l'état de l'art	69

Chapitre I : Caractéristiques des sols argileux

I.1. Les argiles

I.1.1. Généralités

En minéralogie, le terme argile désigne un groupe de minéraux de taille généralement inférieure à 2 μm , appartenant à la famille des phyllosilicates plus au moins hydratés. Les minéraux argileux confèrent la plasticité à l'argile et jouent un rôle important dans les propriétés chimiques et physiques des sols, tel que la surface spécifique, l'agrégation et la sorption. Ces minéraux sont les produits de l'altération du matériau parental, grâce à l'occurrence de plusieurs processus pédogénétiques [Wilson, 1999].

I.1.2. Formation des argiles

Les roches à la surface de la planète évoluent au cours du temps afin de se mettre en équilibre avec les conditions qui prédominent le milieu superficiel. Cette évolution, entraînant la formation d'un nouveau matériau, implique une perte de massivité, ainsi qu'un changement dans la constitution minéralogique et la composition chimique [Pedro, 1994]. Il existe trois grands processus de formation des minéraux argileux :

(i) **L'héritage** : ce processus consiste en une altération physique de la roche mère donnant naissance à un minéral primaire ayant les mêmes caractéristiques cristallographiques. En climat froid, l'altération est faible, la composition chimique des minéraux formés est donc similaire à celle de la roche d'origine. C'est le cas des illites et des chlorites. Un climat tempéré provoquera une altération modérée de la roche, entraînant l'obtention des chlorites, des illites, et des vermiculites. Dans le cas d'un climat chaud et humide, l'hydrolyse sera forte. Ainsi, il apparaît des smectites en milieu confiné et de la kaolinite en milieu drainé [Adrienne, 2003].

(ii) **La transformation** : les minéraux argileux subissent des réarrangements de leurs réseaux silicatés qui se font par échange d'ions du feuillet silicaté et de l'espace interfoliaire, avec maintien du type de structure TO (Tétraédrique-Octaédrique) ou TOT (Tétraédrique-Octaédrique-Tétraédrique). Cet échange peut se produire par soustraction d'ions (dégradation) ou par fixation d'ions supplémentaires (aggradation) [Millot, 1964].

(iii) **La néoformation** : il s'agit d'une réorganisation complète de la structure cristalline par précipitation d'ions en solution dans le bassin de sédimentation (potassium, aluminium et

silicium). Ce processus exige un milieu chimique actif, ainsi que des conditions de pression et de température particulières [Millot, 1964]. A titre d'exemple, la néoformation des cendres sédimentées aboutit à la formation des kaolinites ou des illites [Müller, 1961], alors que celle des cendres volcaniques entraîne la formation des montmorillonites [Grim, 1961]. De même, les montmorillonites évoluent rapidement par néoformation en interstratifiés de type montmorillonite-illite, puis en illites [Chamley, 1969].

I.1.3. Organisation texturale des phyllosilicates

La phase solide du minéral argileux peut-être caractérisée à multi-échelle selon trois unités structurales : le feuillet, la particule et l'agrégat [Touret, 1990] (Figure 1).

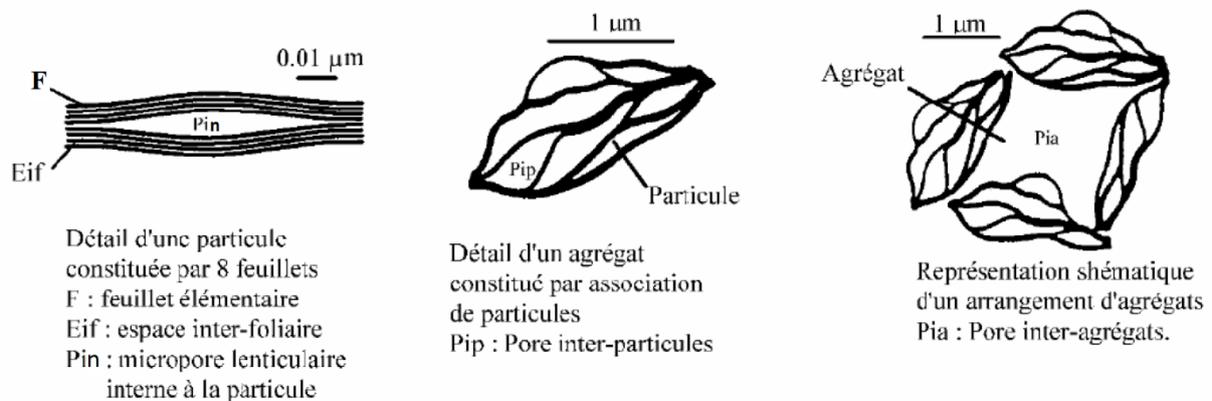


Figure 1: Organisation texturale d'une smectite [Touret, 1990].

I.1.3.1. Feuillet

Les phyllosilicates sont des silicates en feuillets constitués de couches de polyèdres élémentaires. Chaque polyèdre est composé d'un cation central lié par des liaisons intermédiaires ioniques-covalentes aux anions qui l'entourent.

I.1.3.2. Particule

La particule primaire est composée de plusieurs feuillets empilés et parallèles à leurs plans de base. La cohésion au sein de la particule est assurée par des forces électrostatiques attractives entre les feuillets et les ions interfoliaires, de type hydrogène ou Van der Waals [Jolivet, 1994]. L'épaisseur d'une particule varie de 8 à 10 nanomètres. La structure de la particule est dite ordonnée lorsque la distance entre les feuillets est constante, et désordonnée lorsque cette distance est variable, par rapport au plan perpendiculaire au plan des feuillets [Pons, 1980 ; Rhaiem, 1986].

I.1.3.3. Agrégat

L'agrégat est un ensemble de particules primaires orientées dans toutes les directions, et associées par des forces d'attraction ou de répulsion résultantes des interactions inter-particulaires. Lorsque les forces de répulsion dominent, les particules s'orientent parallèlement et la structure est dite dispersée. De même, les dépôts de matière organique peuvent jouer le rôle d'un liant assurant la stabilité de l'agrégat. La taille des agrégats peut varier de 0.1 à 10 microns [Le Pluart, 2004]. L'assemblage de plusieurs agrégats forme un super-agrégat.

I.1.3.4. Espaces poreux

Le type d'empilement des feuillets, des particules et des agrégats permet de décrire trois types différents d'espaces poreux dans les argiles [Mokaya, 1995] (voir Figure 1) :

- (i) La porosité intra-particulaire (P_{in}) correspond au micropore lenticulaire interne à la particule primaire. Ce micropore est dû à un empilement non cohérent des feuillets des argiles gonflantes.
- (ii) La porosité inter-particulaire (P_{ip}) correspond à l'espace poreux entre les particules qui forment un agrégat. Dans le cas des argiles fortement compactées, cet espace peut diminuer jusqu'à atteindre la dimension de l'espace interfoliaire [Pusch, 1982]. La double couche diffuse peut se développer dans ce type de pores. Sa taille est de quelques nanomètres [Keller, 1985].
- (iii) La porosité inter-agrégat (P_{ia}) correspond à l'espace libre formé par l'agglomération de plusieurs agrégats. L'eau peut circuler librement dans cet espace, limitant ainsi les effets électrostatiques de la double couche.

I.1.4. Structure des feuillets

La structure cristalline du feuillet des minéraux argileux consiste en un empilement d'une couche octaédrique et d'une ou deux couches tétraédriques. Ces deux types de couches sont déterminés par la géométrie des polyèdres élémentaires et la coordinance de leurs cations. La liaison entre les couches tétraédrique et octaédrique est assurée par l'intermédiaire des oxygènes apicaux des tétraèdres qui substituent autant d'hydroxyles dans les sommets des octaèdres.

I.1.4.1. Couche tétraédrique

La couche tétraédrique est constituée des tétraèdres TO_4 comportant un cation central (Si^{4+} , Al^{3+} ou Fe^{3+}) coordonné à quatre atomes d'oxygène (Figure 2). La liaison entre les tétraèdres est assurée en partageant trois atomes d'oxygène dits basaux, le quatrième atome d'oxygène dit apical étant libre (voir Figure 4). Ces liaisons permettent d'avoir le long des directions

cristallographiques dans le plan (a) et (b) une charpente hexagonale bidimensionnelle infinie [Brigatti, 2006]. L'épaisseur (c) d'une couche tétraédrique est de l'ordre de 2.12 Å [Caner, 2011].

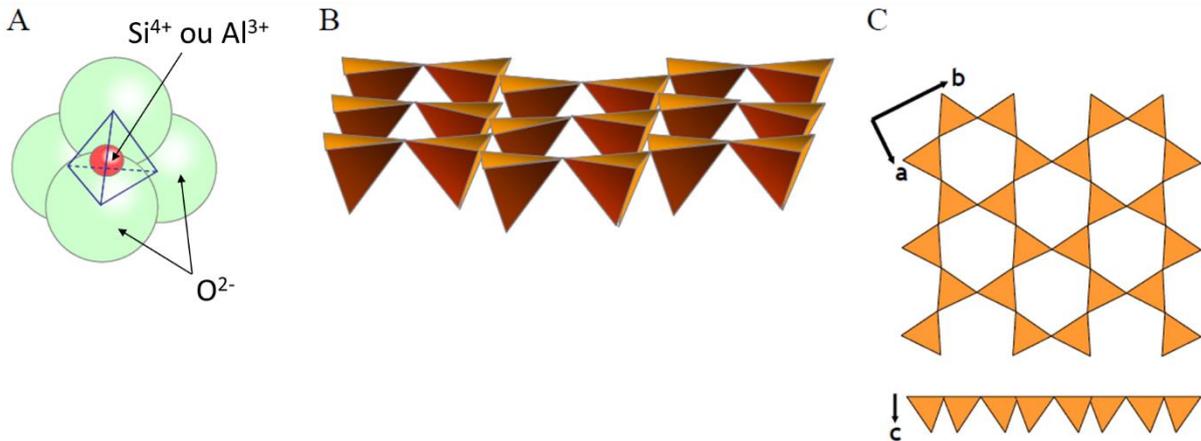


Figure 2: (A) Tétrahédre (SiO_4^{4-}); (B) vue en 3D d'une couche tétraédrique; (C) vue selon les directions a, b et c [Caner, 2011].

I.1.4.2. Couche octaédrique

La couche octaédrique est constituée des octaèdres comportant un cation central trivalent (Al^{3+} ou Fe^{3+}) ou bivalent (Mg^{2+} ou Fe^{2+}) coordonné à six atomes d'oxygène et/ou d'hydroxyles. La liaison entre les octaèdres est assurée en partageant des arêtes (2 sommets) pour former une charpente de symétrie hexagonale (Figures 3 et 4). Lorsque le cation est trivalent, deux octaèdres sur trois sont occupés, le troisième étant vacant. Dans ce cas, chaque anion est partagé entre deux octaèdres voisins. La couche est appelée dioctaédrique. Si le cation est bivalent, tous les sites octaédriques seront occupés. Dans ce cas, chaque anion est partagé entre trois octaèdres voisins. La couche est appelée trioctaédrique. La couche octaédrique possède une symétrie hexagonale. L'épaisseur d'une couche octaédrique dépend du cation occupé [Brigatti, 2006].

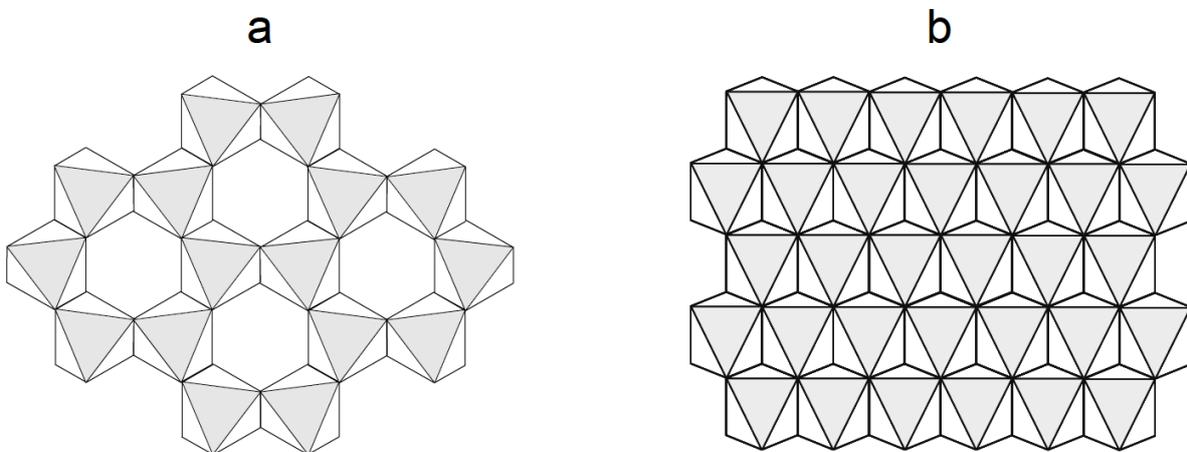


Figure 3: Structure de la couche octaédrique : (a) couche dioctaédrique ; (b) couche trioctaédrique [Hubert, 2008].

I.1.4.3. Espace interfoliaire

L'espace interfoliaire (E_{if}) sépare deux feuillets élémentaires dans une argile (Figures 1 et 4). En cas de déficit de charge électrique, du fait de substitutions isomorphiques dans les couches tétraédriques et/ou octaédriques, cet espace sera occupé par des cations interfoliaires (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Li^+ ...) afin d'assurer la neutralité électrique. Ces cations seront liés par des forces de Van der Waals-ioniques aux oxygènes des couches tétraédriques. Lorsque le déficit de charge est faible, des molécules d'eau peuvent être incorporées dans l'espace interfoliaire aboutissant au gonflement de l'édifice cristallin.

I.1.5. Différentes familles des phyllosilicates

Les familles de phyllosilicates sont discernées par le nombre de couches partagées dans le feuillet élémentaire ainsi que par la manière d'empilement de ces feuillets. Les principaux critères de classification des phyllosilicates sont basés sur les paramètres suivants : la structure du feuillet, sa charge globale et la nature des cations interfoliaires. On peut donc distinguer trois grandes familles des argiles (Tableau 1) :

Type de feuillets	Groupe	Sous-groupe	Espèces
1/1	Kaolinite/ Serpentinite	Kaolinite	Kaolinite, Dickite, Nacrite, Halloysite
		Serpentinite	Chrysotile, Lizardite
2/1	Pyrophyllite/ Talc	Pyrophyllite	Pyrophyllite
		Talc	Talc
	Mica	Mica dioctaédrique	Muscovite, paragonite, Illite
		Mica trioctaédrique	Phlogopite, Biotite
	Smectites	Smectite dioctaédrique	Beidellite, Montmorillonite
		Smectite trioctaédrique	Saponite, Hectorite
2/1/1	Chlorites	Chlorite dioctaédrique	Donbassite Chlinochlore (Mg)
		Chlorite trioctaédrique	Chamosite (Fe) Sudoite

Tableau 1: Différentes familles des phyllosilicates [Caner, 2011].

I.1.5.1. Les phyllosilicates TO ou 1/1

Les feuillets de cette famille consistent en une couche tétraédrique liée à une couche octaédrique. Leurs mailles contiennent quatre octaèdres occupés par des cations Al^{3+} et quatre tétraèdres occupés par des cations Si^{4+} . Ces minéraux appartiennent à la famille des kaolinites dont la composition chimique est $Si_4O_{10}Al_4(OH)_8$.

La structure de **la kaolinite** (Figure 4(a)) a été définie pour la première fois de façon générale par [Pauling, 1930]. Ensuite, elle a été décrite de manière assez détaillée par [Gruner, 1932] et révisée par Brindley et Robinson [Brindley, 1946]. Morphologiquement, la kaolinite se présente sous forme de particules hexagonales composées par des empilements de feuillets. La liaison entre deux feuillets adjacents étant du type « liaison hydrogène » établie entre les oxygènes de la couche tétraédrique et les hydroxyles de la couche octaédrique. Cette liaison est suffisamment forte pour empêcher toute pénétration de molécules d'eau, d'ions minéraux ou de molécules organiques, provoquant le gonflement des feuillets. La charge basale électrique de la kaolinite est neutre, du fait que la charge des anions de la charpente du feuillet est totalement compensée par celle des cations occupant les sites tétraédrique et octaédrique. En revanche, sa charge latérale électrique dépend du pH de la solution. La distance inter-réticulaire (d_{001}) de la kaolinite est de 7.15 Å. Cette distance ne varie pas par effet d'hydratation ou de solvataion à l'éthylène glycol.

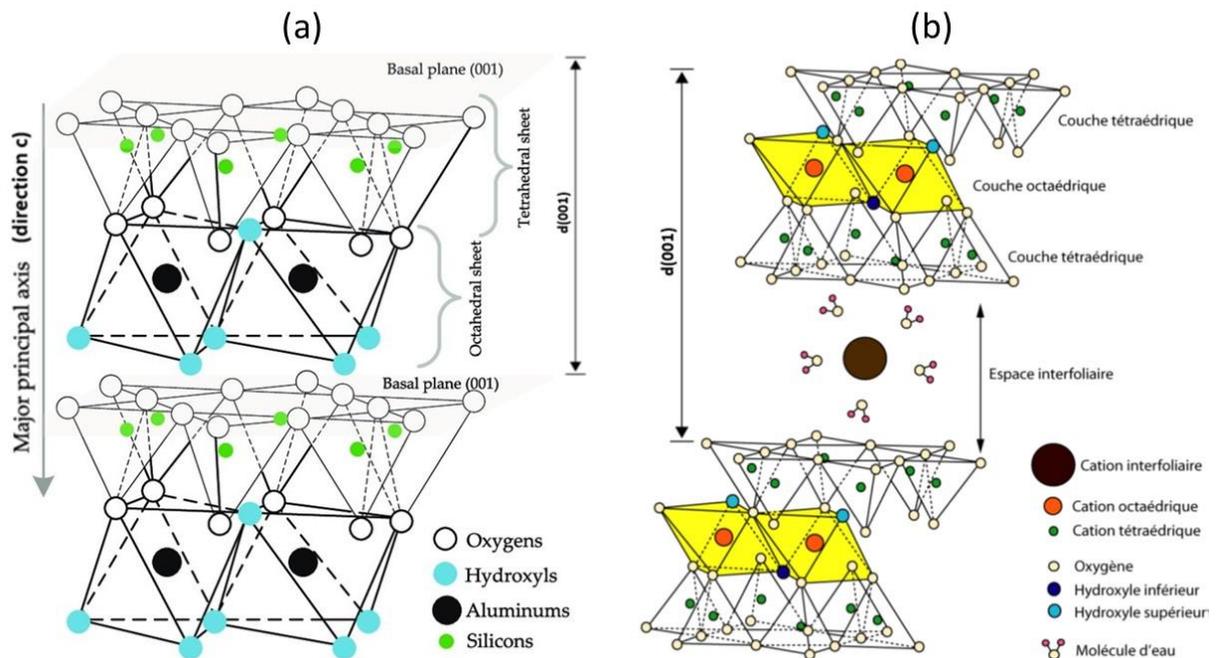


Figure 4: Structure cristalline : (a) d'une kaolinite [Jaradat, 2017] ; (b) d'une montmorillonite [Gautier, 2008].

I.1.5.2. Les phyllosilicates TOT ou 2/1

Les feuillets de cette famille sont constitués de deux couches tétraédriques encadrant une couche octaédrique. Leurs mailles sont formées de six sites octaédriques et huit sites tétraédriques. Les minéraux appartenant à cette famille sont attribués aux groupes de talc, mica et smectite.

La montmorillonite (Figure 4(b)) appartient au sous-groupe des smectites dioctaédriques. La structure de la montmorillonite a été décrite pour la première fois par [Hofmann, 1933] puis modifiée suite aux suggestions de [Marshall, 1935] et [Hendricks, 1942]. C'est un minéral composé de silicate d'aluminium et de magnésium hydraté, de formule $(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2.n\text{H}_2\text{O}$. La montmorillonite sodique possède souvent une couche d'eau interfoliaire et un espacement d'environ 12.5 Å sur l'axe c (correspondant à la direction Z) ; tandis que la montmorillonite calcique possède souvent deux couches d'eau interfoliaire et un espacement d'environ 15.5 Å sur l'axe c. La caractéristique particulière de la montmorillonite est que la faible charge de ses feuillets et leur empilement désordonné facilitent leur écartement et la pénétration des molécules d'eau et des ions échangeables, provoquant l'expansion de l'espace interfoliaire dans la direction c. Cette expansion diminue les interactions moléculaires entre les couches voisines et accorde à cette argile une forte capacité de gonflement [Mustafaev, 1989]. Le déficit de charge global résultant de la substitution d'ions varie de 0.5 à 1.2 par cellule unitaire. La capacité d'échange cationique de la montmorillonite se situe généralement entre 80 et 150 meq/100 g.

I.1.5.3. Les phyllosilicates TOT:O ou 2/1/1

Lorsque le déficit de charge électrique n'est pas compensé par des cations échangeables, une couche octaédrique, de type brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) ou gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$), vient occuper l'espace interfoliaire afin de neutraliser la charge. Une troisième famille de phyllosilicates est alors définie, il s'agit des feuillets TOT:O ou 2/1/1. Le minéral argileux cristallisant dans cette famille correspond au groupe des chlorites. Il présente typiquement une taille d'environ 14 Å selon la direction c [Pauling, 1930].

I.2. Effet microscopique de l'eau sur les argiles

I.2.1. Types des eaux dans les argiles

La surface négative des minéraux argileux permet d'attirer les molécules d'eau grâce à ses dipôles positifs (charge partielle positive des atomes d'hydrogène), ce qui entraîne un changement dans les propriétés hydrodynamiques de l'eau. Cette interaction eau-minéral permet de définir trois types d'organisation des molécules d'eau dans la matrice argileuse [Hueckel, 1992] :

(i) **L'eau libre** qui se situe au niveau des pores inter-agrégats (P_{ia}) (voir Figure 1) et participe à l'écoulement sous l'influence d'un gradient hydraulique. Cette eau nécessite un séchage à une température de 105 °C pour être évacuée.

(ii) **L'eau adsorbée** remplissant les pores inter-particulaires (P_{ip}) et intra-particulaires (P_{in}) dans les agrégats d'argiles, suite à des interactions chimiques et électriques. Cette eau possède une densité et une viscosité supérieures à celles de l'eau libre.

(iii) **L'eau cristalline** qui occupe l'espace interfoliaire (E_{if}) entre les feuillets élémentaires d'argile. A l'état sec, la cohésion entre ces feuillets est assurée par un équilibre entre les forces d'attraction de Van der Waals et les forces électrostatiques entre les feuillets chargés et les cations compensateurs. Cet équilibre sera rompu par l'eau cristalline grâce à l'énergie d'hydratation des cations, ce qui permet d'écarter les feuillets d'argiles et de pénétrer les molécules d'eau dans l'espace interfoliaire. L'ouverture de cette espace dépend de la localisation et la densité de la charge des feuillets, ainsi que de la taille et la valence des cations interfoliaires [Norris, 1954]. Tous ces paramètres gouvernent le gonflement des argiles lors de leur hydratation, ce qui explique la complexité du comportement des argiles. L'eau cristalline nécessite un séchage à une température supérieure à 350 °C pour quitter la matrice argileuse.

I.2.2. Forces attractives et forces répulsives

L'interaction intermoléculaire entre les particules d'argile se manifeste par différentes forces électriques d'attraction et de répulsion dues à plusieurs facteurs complexes. De nombreux chercheurs [Lambe, 1953, 1958, 1960], [Bolt, 1955, 1956], [Rosenqvist, 1955], [Seed, 1961] et [Sridharan, 1970] ont contribué à la compréhension de ces forces électriques et leurs influences sur le comportement mécanique des argiles.

I.2.2.1. Liaisons hydrogène

La liaison hydrogène est une liaison chimique non covalente de type dipôle-dipôle qui se produit lorsqu'un atome d'hydrogène lié à un atome très électronégatif (ayant une forte capacité à attirer les électrons) existe à proximité d'un autre atome électronégatif. La force de liaison de l'hydrogène varie de 4 kJ à 50 kJ par mole de liaisons hydrogène. Dans un minéral argileux, cette liaison s'établit entre la paroi négative de l'oxygène à la surface de l'argile et le pôle positif de l'hydrogène de la molécule d'eau dipolaire. Ces liaisons sont généralement plus fortes que les forces de Van der Waals, mais plus faibles que les liaisons covalentes et ioniques. Lorsqu'une liaison hydrogène s'établit, les deux hétéroatomes (atomes possédant au moins un doublet d'électrons) se trouvent à une distance d'environ 2.5 Å. Les liaisons hydrogène confèrent à l'eau une grande tension superficielle et une grande cohésion intermoléculaire.

I.2.2.2. Forces d'attraction de Van der Waals

Ce sont des forces d'attraction induites par le champ généré par les électrons qui tournent autour du noyau atomique. Elles génèrent une énergie d'attraction qui est inversement proportionnelle à la distance qui sépare les deux feuillets d'argiles. L'interaction de type Van der Waals détermine les propriétés d'adsorption du plan basal dans les minéraux argileux ayant une charge électrique neutre tels que le talc et la pyrophyllite. L'énergie typique de ce type de forces, étant parmi les plus faibles des interactions électriques, varie entre 0.4 et 4 kJ/mol.

I.2.2.3. Hydratation des cations échangeables

L'adsorption des cations est d'autant plus forte que la taille du cation hydraté (son rayon d'hydratation) est petite ou que son degré d'hydratation (le nombre de molécules d'eau qui lui sont associées) est faible. En présence d'eau cristalline dans l'espace interfoliaire, les cations compensateurs s'hydratent complètement, ce qui entraîne des forces répulsives et des couches d'argile en expansion. A titre d'exemple, le rayon ionique du sodium passe de 0.95 Å à 5.6 Å et celui de calcium de 0.99 Å à 9.6 Å.

I.2.2.4. Hydratation par osmose

Le déficit de charge dans les feuillets d'argiles permet aux cations compensateurs d'occuper l'espace interfoliaire afin de neutraliser la charge électrique. Lorsque la concentration des cations devient plus élevée dans l'eau cristalline que dans les eaux libres et adsorbées, il en résulte une migration des molécules d'eaux vers l'espace interfoliaire, entraînant un écartement additionnel de cette espace. Au contraire, une salinité importante dans les eaux libres et adsorbées peut limiter le gonflement du minéral argileux.

1.2.3. Propriétés colloïdales des argiles

La stabilité colloïdale du système eau-argile dépend de la distribution des charges électriques existantes à l'interface entre les molécules d'eau et les particules d'argiles (double couche électrique), ainsi que de la combinaison de la totalité des forces attractives et répulsives dans la particule d'argile (théorie DLVO) [Luckham, 1999].

1.2.3.1. Théorie de la double couche électrique

La distribution de charges électriques et le potentiel à l'interface solide/liquide ont été étudiés pour la première fois par [Gouy, 1910] et [Chapman, 1913]. Ensuite, ce modèle a été amélioré par [Stern, 1924] et [Grahame, 1947]. Suite à ces études, les ions ne sont plus assimilés à des charges ponctuelles et l'électrolyte n'est plus considéré comme un diélectrique homogène.

Lorsqu'une surface solide est en contact avec une solution aqueuse, la formation d'une charge interfaciale provoque un réarrangement des ions libres locaux dans la solution pour former une couche fine chargée près de l'interface. La disposition des charges à l'interface solide-liquide et les ions compensateurs dans le liquide sont généralement appelés double couche électrique (Figure 5). Une fine couche des ions compensateurs s'accroche à la surface solide chargée, formant ainsi une couche d'ions adhérents dite couche de Stern (ou couche dense). L'autre partie des ions forme une couche non attachée à la surface solide appelée couche diffuse. Les ions de la couche de Stern sont immobiles en raison de la forte attraction électrostatique, alors que ceux de la couche diffuse sont mobiles. Notons que ces ions peuvent avoir un mouvement tangentiel à la surface de la couche de Stern sous l'action d'un champ électrique. La limite entre la couche de Stern et la couche diffuse est appelée plan externe d'Helmholtz. Le potentiel électrique de la solution présente une décroissance exponentielle en fonction de la distance x à la particule d'argile. Le potentiel zêta (ζ) est le potentiel électrostatique au niveau du plan de glissement (ou de cisaillement) qui correspond à la frontière entre les cations hydratés de la couche de Stern et ceux de la couche diffuse [Li, 2003]. Ce potentiel représente la mesure de la capacité d'attraction ou de répulsion électrostatique entre les particules d'argiles. Sarkar et al. [Sarkar, 2000] ont utilisé un stabilisateur destiné à réduire le potentiel zêta et donc limiter le retrait/gonflement des argiles. Ce stabilisateur consiste à injecter une solution contenant des ions d'hydrogène (H^+) qui ont pour rôle de remplacer les ions de sodium (Na^+) et de calcium (Ca^{2+}) grâce à leur forte densité de charge et leurs petites tailles, afin de neutraliser plus efficacement les charges négatives à la surface des particules d'argile et d'effondrer la double couche diffuse.

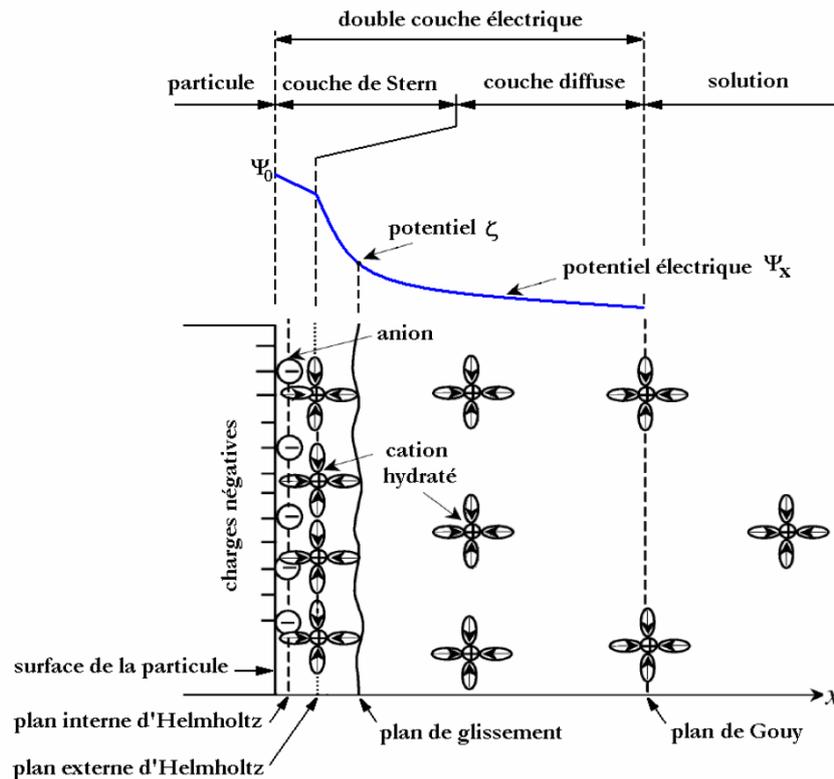


Figure 5: Evolution du potentiel électrique et distribution des cations dans la double couche diffuse, d'après [Güven, 1992] et [Li, 2003] dans [Benchabane, 2006].

1.2.3.2. Théorie DLVO

Une analyse théorique de l'interaction entre les particules colloïdales a été développée par Derjaguin et Landau [Derjaguin, 1941] et Verwey et Overbeek [Verwey, 1948]. La caractéristique fondamentale de la théorie DLVO consiste à déterminer cette interaction par une combinaison de l'énergie de répulsion interparticulaire de la double couche électrique et de l'énergie d'attraction de Van der Waals. La stabilité colloïdale peut s'expliquer par la superposition de ces deux énergies. Le degré de floculation et la stabilité des particules d'argile dépendent de la température du milieu et du degré de contraction de la double couche qui est dominé par la concentration et la valence des ions compensateurs. L'énergie d'attraction de Van der Waals ne dépend pas de la concentration en électrolyte, alors que l'énergie répulsive de la double couche varie d'une manière inversement proportionnelle avec la concentration en électrolyte. Ainsi, pour une force ionique élevée, l'attraction prédomine la répulsion de double couche, ce qui entraîne la coagulation des particules. Au cas contraire, le potentiel répulsif sera supérieur au potentiel attractif, ce qui aboutit à la dispersion des particules d'argile.

I.3. Effet macroscopique de l'eau sur les argiles

I.3.1. Tension de surface

La tension superficielle est la tendance des surfaces liquides à se contracter pour atteindre la surface la plus petite possible, qui correspond à la configuration de plus basse énergie. À la surface libre du liquide en contact avec l'air, les interactions liquide/liquide dues à la cohésion du liquide sont plus importantes que les interactions air/liquide dues à l'adhésion. Ce déséquilibre des forces est associé à un excès d'énergie par unité de surface appelé tension de surface [De Laplace, 1847]. Dans le cas de l'eau, la cohésion entre ses molécules est assurée par les liaisons de Van der Waals et les liaisons hydrogène, ce qui l'acquiert une tension de surface importante égale à 72.75 J/m^2 (à $T = 20^\circ\text{C}$). Cette tension signifie qu'on aura besoin d'une énergie de 72.75 J pour augmenter l'aire de l'interface eau/air ayant une surface initiale d'un mètre carré. Au niveau de la ligne triple correspondant à la ligne de contact des phases solide, liquide et gaz, la tension de surface correspond à la force F_s par unité de longueur (N/m) exercée sur le solide (Figure 6).

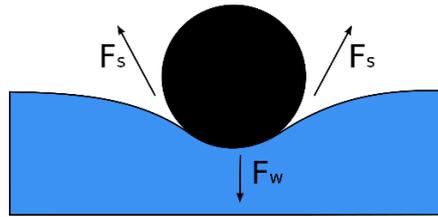


Figure 6: Section d'une aiguille flottant à la surface de l'eau.
 F_w est le poids et F_s sont les forces résultant de la tension superficielle.

I.3.2. Phénomène de mouillage

La mouillabilité d'une surface solide peut être décrite par deux paramètres macroscopiques : l'angle de contact du liquide et l'angle de glissement. Si l'on considère une goutte de liquide sur un substrat solide, l'équilibre thermodynamique des trois phases : solide, liquide et vapeur, détermine la forme d'équilibre de la goutte de liquide et l'angle de contact θ , comme l'illustre la Figure 7(a). La relation entre l'angle de contact à l'équilibre et les trois tensions de surface est donnée par l'équation de Young [Young, 1805] :

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma \cos(\theta) \quad (1)$$

où γ_{sv} et γ_{sl} , et désignent respectivement les tensions de surface solide-vapeur et solide-liquide, et $\gamma = \gamma_{lv}$ est la tension de surface liquide-vapeur. Si $\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma$, l'angle de contact est nul, la surface solide sera recouverte d'une couche liquide uniforme, ce qui correspond à un mouillage total.

En dynamique, l'angle de contact formé devant une ligne de contact avant est appelé angle de contact avancé θ_a , tandis que celui formé derrière une ligne de contact arrière est l'angle de contact reculé θ_r (Figure 7(b)). En général, en raison de la force de gravité et de l'existence de défauts de surface, les angles avancé et reculé ne sont pas identiques, c'est ce que l'on appelle l'hystérésis de l'angle de contact. L'angle de glissement est défini comme l'angle critique par lequel la goutte de liquide commence à glisser sur une surface inclinée, qui dépend de la différence entre l'angle de contact avancé θ_a et l'angle de contact reculé θ_r .

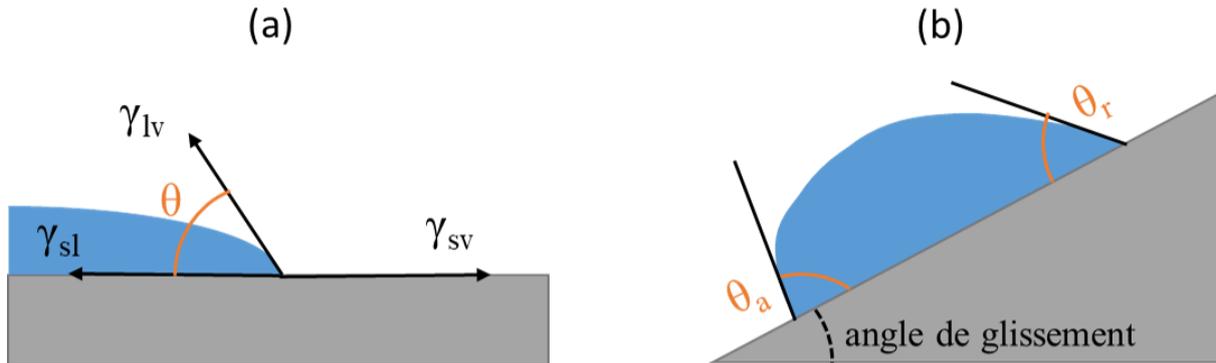


Figure 7: Schéma de principe de (a) l'angle de contact, et de (b) l'angle de glissement, d'une goutte de liquide.

Dans les théories contemporaines de la mécanique des sols non saturés, un sol est souvent considéré comme un simple système triphasé composé d'air interstitiel, d'eau interstitielle et de particules solides granulaires (Figure 8). La succion dans un tel système, définie par la différence de pression entre la pression atmosphérique et la pression interne de l'eau capillaire, provient de la capillarité attribuée aux interactions entre les ménisques air-eau et les particules du sol [Wan, 1995]. La succion matricielle (Ψ_m) est liée à la courbure du ménisque air-eau (R), la tension de surface de l'eau (γ) et l'angle de contact (θ) par la loi de Laplace, qui se simplifie dans l'hypothèse de pores cylindriques et prend l'expression de la loi de Jurin :

$$\Psi_m = 2 \gamma \cos(\theta) / R \quad (2)$$

De même, Wan et al. (1995) ont démontré qu'il existe une corrélation qualitative entre les succions matricielles et les structures des pores intra-particulaires dans les argiles compactées. Ils ont trouvé que les succions calculées à partir des diamètres de "grands pores" (ayant un diamètre variant entre 6 et 138 μm) sont de l'ordre du kiloPascal, alors que les succions à partir des diamètres de "petits pores" (ayant un diamètre variant entre 0.004 et 0.1 μm) sont de l'ordre du mégaPascal.

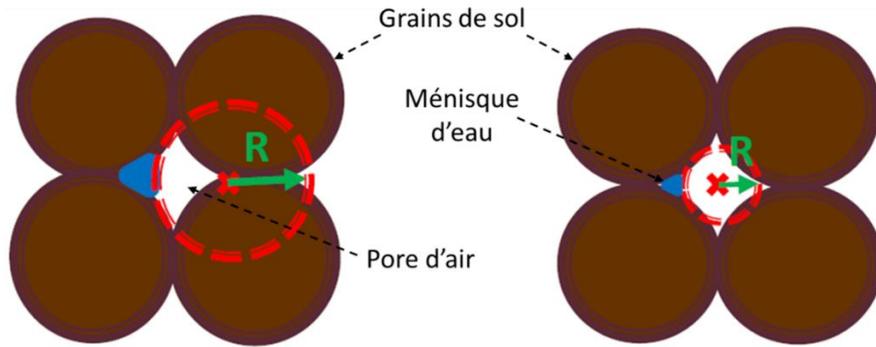


Figure 8: Variation du rayon du ménisque dans un sol granulaire non saturé.

I.3.3. Classification des sols non saturés en fonction de leur état hydrique

Le comportement mécanique des sols non saturés soumis à une succion matricielle (une pression interstitielle négative) dépend de leur état hydrique et de leur mode de mise en œuvre. Dans ce cadre, Taibi [Taibi, 1994] a établi une classification des sols non saturés (Figure 9), en étant considérés comme un milieu triphasique partiellement saturé (grains solides, eau et air). Cette classification dépend de la perméabilité du sol à l'eau (k_w), ainsi que de sa perméabilité à l'air (k_a).

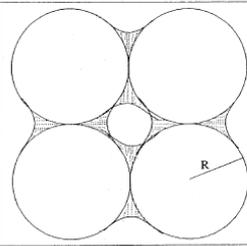
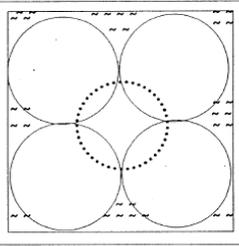
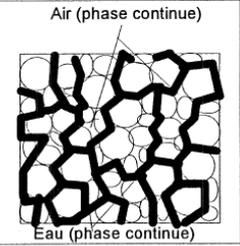
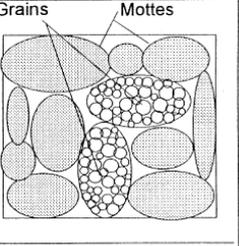
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
				
k_w	=0	≠0	≠0	
k_a	≠0	=0	≠0	

Figure 9: Classification des sols en fonction de leur degré d'humidité et de leur granulométrie [Taibi, 1994].

I.3.3.1. Phase liquide discontinue (classe 1)

Cette classe est caractérisée par une phase d'eau discontinue et une phase d'air continue. Les points de contacts entre les particules du sol sont enrobés par des ménisques, dans lesquelles la pression est négative ($u_w < u_a$). Cette dépression mène les ménisques à exercer sur les particules des forces d'attraction normales aux plans tangents (Figure 10), en empêchant tout changement de volume ou réarrangement des grains. Ces forces d'attraction contribuent à la résistance mécanique du milieu granulaire. Au niveau expérimental, on observe ces conditions lorsque la teneur en eau du matériau est inférieure à la limite de retrait.

Taibi [Taibi, 1994, 2007] a utilisé des billes de verre de même diamètre ($D = 2R$) pour simuler le comportement des grains de sol (Figure 10). En négligeant l'effet de la gravité agissant sur la forme du ménisque et en supposant dans un premier temps les particules indéformables, la force totale F entre deux sphères de rayon R est la somme de deux composantes :

- (a) la composante axiale de la tension de surface (eau-air), notée F_γ (Equation (3)).
- (b) la pression hydrostatique agissant sur la projection axiale de l'aire du ménisque tangent au point de contact des deux sphères, notée F_{pc} (Equation (4)).

$$F_\gamma = \gamma_{lg} (2\pi l) \quad (3)$$

$$F_{pc} = p_c (\pi l^2) \quad (4)$$

Avec : γ_{lg} : tension interfaciale eau-air ($\gamma_{lg} = 7.2.10^{-2}$ N/m à $T = 20^\circ\text{C}$).

p_c : pression capillaire ; d'après la loi de Laplace : $p_c = \gamma_{lg} (1/r - 1/l)$

r, l : rayons de courbures principaux du ménisque supposé torique avec un raccordement tangent aux points de contact avec le solide.

Par conséquent, on aura : $F = F_\gamma + F_{pc} = \gamma_{lg} \pi l (1 + l/r)$

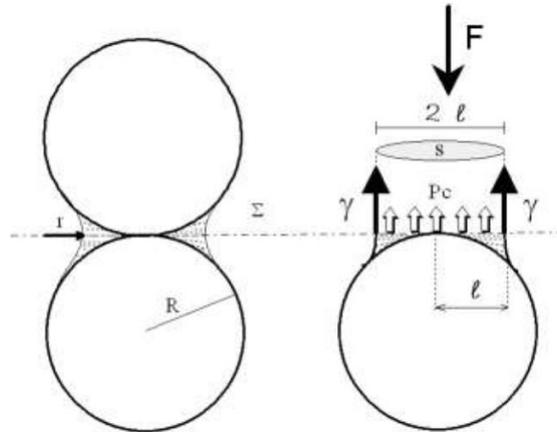


Figure 10: Phase liquide discontinue [Taibi, 2007].

I.3.3.2. Phase gazeuse discontinue (classe 2)

Cette classe représente une phase d'eau continue et une phase d'air discontinue. Des bulles d'air isolées sont formées dans l'eau, sans contact avec les grains, ce qui rend l'eau plus compressible. Selon [Taibi, 1994], la notion de contrainte effective de Terzaghi reste valable dans ce cas, malgré la présence des bulles d'air. Cependant, [Biarez, 1962] a montré que lorsque l'arrangement des grains sphériques est irrégulier, la résultante des forces externes n'est généralement pas perpendiculaire aux plans tangents. Dans ce cas, ces forces peuvent provoquer des déformations volumiques du milieu.

Taibi [Taibi, 1994] a également étudié les chemins de dessiccation/imbibition sur des billes de verre sphériques. Il a démontré que ces chemins dépendent uniquement du diamètre des billes et de leur type d'assemblage. En plus de l'hystérésis des angles de contact entre ces deux chemins, il a constaté l'existence d'une autre hystérésis due à la topologie du réseau poreux.

I.3.3.3. Phases liquide et gazeuse continues (classe 3)

Cette classe correspond expérimentalement au cas des sols réels, dans lesquels les perméabilités à l'eau et l'air ne sont pas nulles. Lorsque la pression de désaturation du sol est atteinte, le degré de saturation décroît fortement, en permettant aux pores remplis d'air de communiquer entre eux, tout en conservant la phase d'eau continue.

I.3.3.4. Cas particuliers des sols structurés en agrégats (classe 4)

Dans un sol argileux, le diamètre des grains (D_{10}) est de l'ordre de quelques dixièmes de microns. Lors de leur humidification, ces grains s'agglomèrent en formant des agrégats (mottes) dont la dimension peut atteindre quelques millimètres. Le compactage de ces mottes leur confère un comportement mécanique complètement différent de celui des sols granulaires (constitués des grains individuels), du fait que chaque motte possède ses propres granulométrie et indice des vides. Néanmoins, si les contraintes exercées par le compactage dépassent la résistance mécanique des mottes, elles seront écrasées et auront la même loi de comportement que les pâtes (grains sédimentant dans l'eau).

I.4. Chemins de dessiccation/imbibition des sols fins

I.4.1. Cycles de dessiccation/imbibition : phénomène d'hystérésis

Le phénomène d'hystérésis dans les sols est dû à plusieurs facteurs tel que le piégeage de l'air, l'effet de l'angle de contact qui fait que l'angle d'imbibition est toujours supérieur à celui du drainage, ainsi que la déformation de la phase solide lors des sollicitations hydriques et la connexion des pores en série "ink bottle", qui empêche le passage d'une bulle d'air sphérique à travers les pores ayant des dimensions inférieures.

I.4.1.1. Plan succion-indice des vides

Les courbes de rétention des sols fins ont été rapportées dans plusieurs travaux. [Haines, 1923] a étudié la dessiccation d'un sol à partir d'un état initial sous forme d'une pâte et a distingué trois phases principales de retrait du sol : retrait normal, résiduel et nul. Le retrait normal se produit lorsque la diminution du volume du sol est égale à la perte d'eau, ce qui correspond à

l'état où l'échantillon est saturé en eau. Le retrait résiduel correspond à la phase d'entrée d'air dans le sol dans laquelle la diminution du volume du sol sera inférieure au volume d'eau perdu. Dans la phase du retrait nul, le volume du sol reste constant au cours du séchage. [Stirk, 1954] a ajouté une quatrième phase de retrait appelée retrait structurel (Figure 11). Cette phase présente des caractéristiques similaires au retrait résiduel (c'est-à-dire une perte d'eau plus importante que le changement de volume). Elle est associée à l'évacuation de l'eau des grands pores.

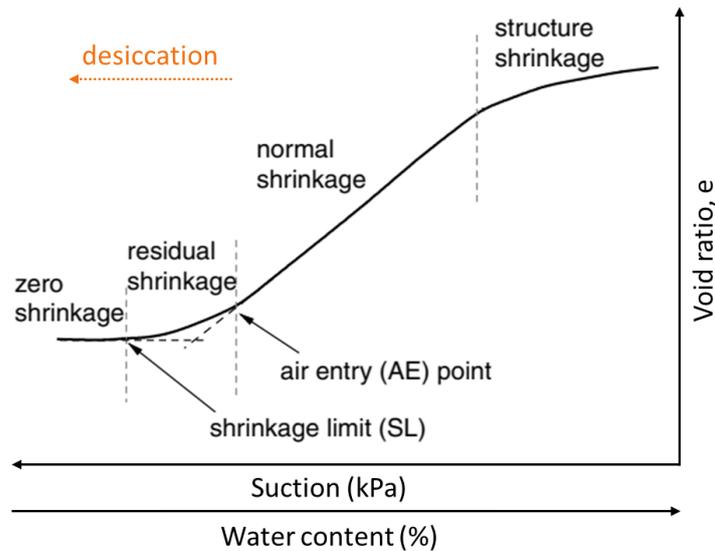


Figure 11: Caractéristiques de la courbe du retrait d'un sol naturel.

[Lambe, 1958] a montré qu'une argile dont les particules sont bien arrangées se rétrécit plus dans la direction perpendiculaire que dans la direction parallèle aux particules. En revanche, une argile dont les particules sont orientées de façon aléatoire se rétrécit uniformément dans toutes les directions. [Gokhale, 1970] a constaté que l'amendement de l'argile avec du sable réduit son retrait global. [Taibi, 1994] a réalisé un chemin de dessiccation normalement consolidé d'un kaolin argileux P300 en partant d'un état très liquide. En comparant ce chemin avec des chemins de compression œdométrique et isotrope NC, dans le plan succion-indice des vides (dessiccation) ou contrainte effective moyenne-indice des vides (œdométrique et isotrope), il a trouvé que les trajectoires sont presque superposées (Figure 12). En effet, tant que le sol reste saturé, le champ de contrainte appliqué à chaque particule est isotrope, grâce à l'eau qui l'englobe. Pour cette raison, la pente de la droite attribuée au chemin de dessiccation dans le plan indice des vides-suction est égale au coefficient de compressibilité C_c .

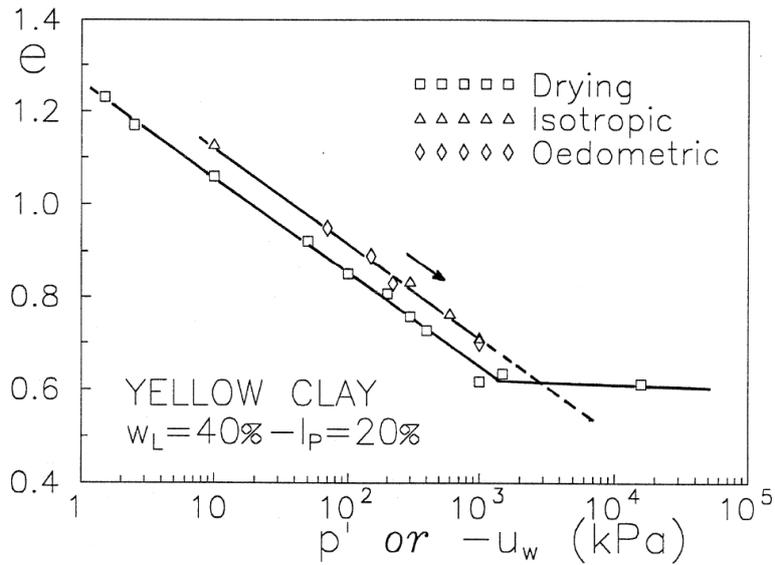


Figure 12: Comparaison des chemins de compression œdométrique et isotrope (en fonction de $p'=p-u_w$) et du chemin de drainage NC (en fonction de $-u_w$) dans le domaine saturation pour l'argile jaune P300 [Taibi, 1994].

[Fleureau, 1993] et [Péron, 2008] ont montré que le retrait par dessiccation de sols remaniés, initialement saturés et normalement consolidés, comprend deux étapes principales (Figure 13). Dans le domaine 1, les déformations peuvent être considérées comme plastiques (généralement irréversibles). Dans ce domaine, l'évolution de la succion est équivalente à l'évolution de la contrainte effective de Terzaghi. Les déformations se produisant lors du premier séchage suivent ensuite la ligne normalement consolidée. Dans le domaine 2, la désaturation du matériau s'accélère et les déformations de retrait seront sensiblement plus faibles et supposées être réversibles.

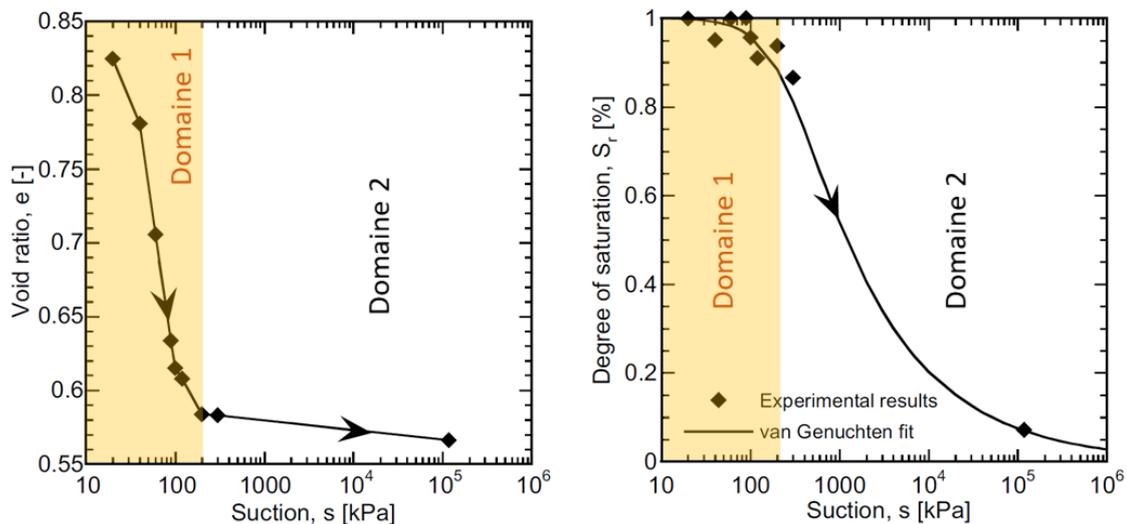


Figure 13: Courbes de rétention d'un limon [Péron, 2008].

I.4.1.2. Plan succion-teneur en eau

La relation constitutive entre la succion du sol et sa teneur en eau est connue historiquement par la courbe de rétention d'eau dans le sol (SWRC, 'Soil Water Retention Curve' en anglais) [Van Genuchten, 1980]. L'ampleur de la succion à une teneur en eau donnée dans un sol peut varier d'un facteur de deux ou plus en fonction de l'hystérésis de mouillage et de séchage. Bresler et al. [Bresler, 1969] ont montré que chaque cinétique de mouillage entraîne une courbe de rétention d'eau différente. L'hystérésis dans le plan succion-teneur en eau augmente en fonction de la cinétique de mouillage. Van Genuchten (1980) a défini un modèle analytique permettant de déterminer la teneur en eau volumétrique du sol en fonction de sa succion :

$$\theta = \theta_{rd} + \frac{(\theta_{st} - \theta_{rd})}{[1 + (\alpha(u_a - u_w))^n]^{(1-1/n)}} \quad (5)$$

Avec :

- θ : la teneur en eau volumétrique du sol à un instant t
- θ_{rd} : la teneur en eau volumétrique résiduelle
- θ_{st} : la teneur en eau volumétrique de saturation
- $1/\alpha$: la pression d'entrée d'air AE dans les pores (voir Figure 11)
- $u_a - u_w$: la succion dans le sol à un instant t
- n : la dimension des pores dans le sol

[Yigzaw, 2009] a étudié les chemins dessiccation/imbibition sur une argile verte (Figure 14(a)). Il a trouvé que la relation succion-teneur en eau est quasi-réversible pour des succions supérieures à 100 MPa. En dessous de cette valeur, les chemins de dessiccation et d'imbibition divergent présentant ainsi un phénomène d'hystérésis qui s'amplifie pour les plus faibles succions pour atteindre 25 % de la teneur en eau maximale. En revanche, [Chauhan, 2019] a montré que les chemins dessiccation/imbibition d'un limon silteux convergent aux deux extrémités humide et sèche de la courbe de rétention (Figure 14(b)). L'hystérésis maximal pour ce limon est de l'ordre de 10 %.

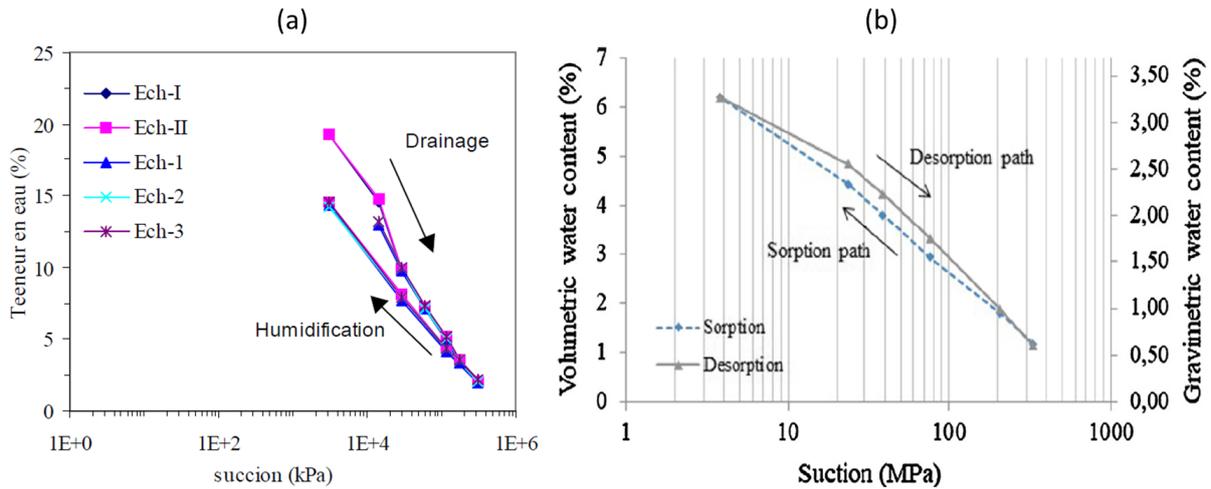


Figure 14: Courbes de rétention (a) d'une argile verte [Yigzaw, 2009] ; et (b) d'un limon silteux [Chauhan, 2019].

I.4.2. Représentation globale des chemins de dessiccation/imbibition des pâtes d'argiles saturées

La Figure 16 représente le premier cycle de dessiccation-imbibition sur une argile (kaolinite P300) initialement préparée sous forme de pâte, à une teneur en eau initiale $w_i = 1.5w_L$ [Indarto, 1991]. Les Figures 16(a) et (c) montrent les variations d'indice des vides et du degré de saturation en fonction de la teneur en eau. Les Figures 16(b), (d) et (e) montrent les variations d'indice des vides, du degré de saturation et de la teneur en eau en fonction de la pression négative de l'eau interstitielle (suction).

I.4.2.1. Chemins de dessiccation

Sur le chemin de dessiccation de la kaolinite P300, le sol suit la ligne de saturation dans le plan (w, e) d'équation : $e = (\gamma_s/\gamma_w)w$, à partir du point initial A et jusqu'au point d'entrée d'air B, qui correspond à une suction de 1.5 MPa. Cet itinéraire se produit tandis que le matériau reste saturé en eau, et correspond à une variation linéaire de l'indice des vides et de la teneur en eau en fonction du logarithme de la suction. Au point d'entrée d'air B qui coïncide avec la limite de retrait conventionnelle, le sol ne se déforme pratiquement plus. En revanche, son degré de saturation décroît très rapidement jusqu'au point C, qui correspond à une suction de 15 MPa. Dans le plan suction-teneur en eau $(-u_w, w)$, cette désaturation se traduit par une chute de la teneur en eau. Ensuite, la désaturation se poursuit légèrement, en parallèle avec la diminution de la teneur en eau, jusqu'à atteindre une suction de 150 MPa au point D.

On remarque que la phase de compressibilité maximale de cette argile se concorde avec le domaine où le matériau est saturé. Par ailleurs, la déformation s'immobilise lors de sa désaturation.

I.4.2.2. Chemins d'imbibition d'une pâte d'argile préalablement séchée

Sur le chemin d'imbibition de cette argile, les comportements volumique et hydrique sont parfaitement réversibles entre le point du départ D et le point C. Dans ce domaine, l'eau commence à former des ménisques entre les particules d'argile (Figure 15). Le mécanisme de variation du rayon de ces ménisques est quasi-réversible lorsque le mouillage par l'eau des particules est parfait. En revanche, dans le cas des sables, l'hystérésis des angles de contact présente une certaine irréversibilité du fait que les particules ne sont pas parfaitement mouillables par l'eau [Fleureau, 1988].

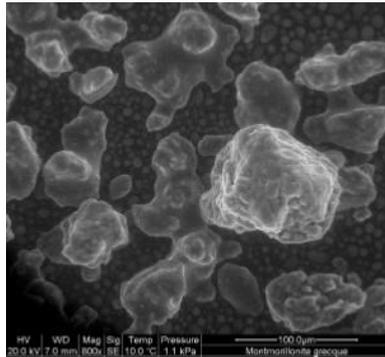


Figure 15: Photo MEB d'une montmorillonite à une humidité relative de 90 % [Maison, 2008].

Dans le domaine qui part du point C au point E, on observe une hystérésis importante du degré de saturation tandis que l'indice des vides reste sensiblement constant. Cette hystérésis résulte de l'effet de la connexion des pores en série "ink bottle" qui empêche le passage d'une bulle d'air sphérique à travers les pores ayant des dimensions inférieures. Il s'agit d'une phase intermédiaire de remplissage des pores les plus gros, dans laquelle la succion de resaturation qui vaut 0.7 MPa est égale à la moitié de la succion de désaturation.

A partir du point E de resaturation, la succion sera équivalente à une contrainte isotrope qui s'applique sur les grains du sol par l'intermédiaire de l'eau interstitielle. Dans cette phase, les forces interparticulaires ne seront plus normales aux plans tangents entre les particules d'argile [Biarez, 1962]. Ces forces provoquent un réarrangement de ces particules une fois que leur obliquité excède l'angle de frottement de la matrice d'argile. D'où, l'hystérésis qui apparaît surtout dans le plan (u_w , e).

La description de ce premier cycle de dessiccation-imbibition de la kaolinite P300 met en évidence la présence de trois phases dans le comportement des argiles remaniées [Fleureau, 1993] :

- (i) un domaine saturé qui présente des déformations plastiques importantes.
- (ii) un domaine intermédiaire dans lequel on observe une irréversibilité du degré de saturation.
- (iii) un domaine non saturé qui présente des déformations élastiques.

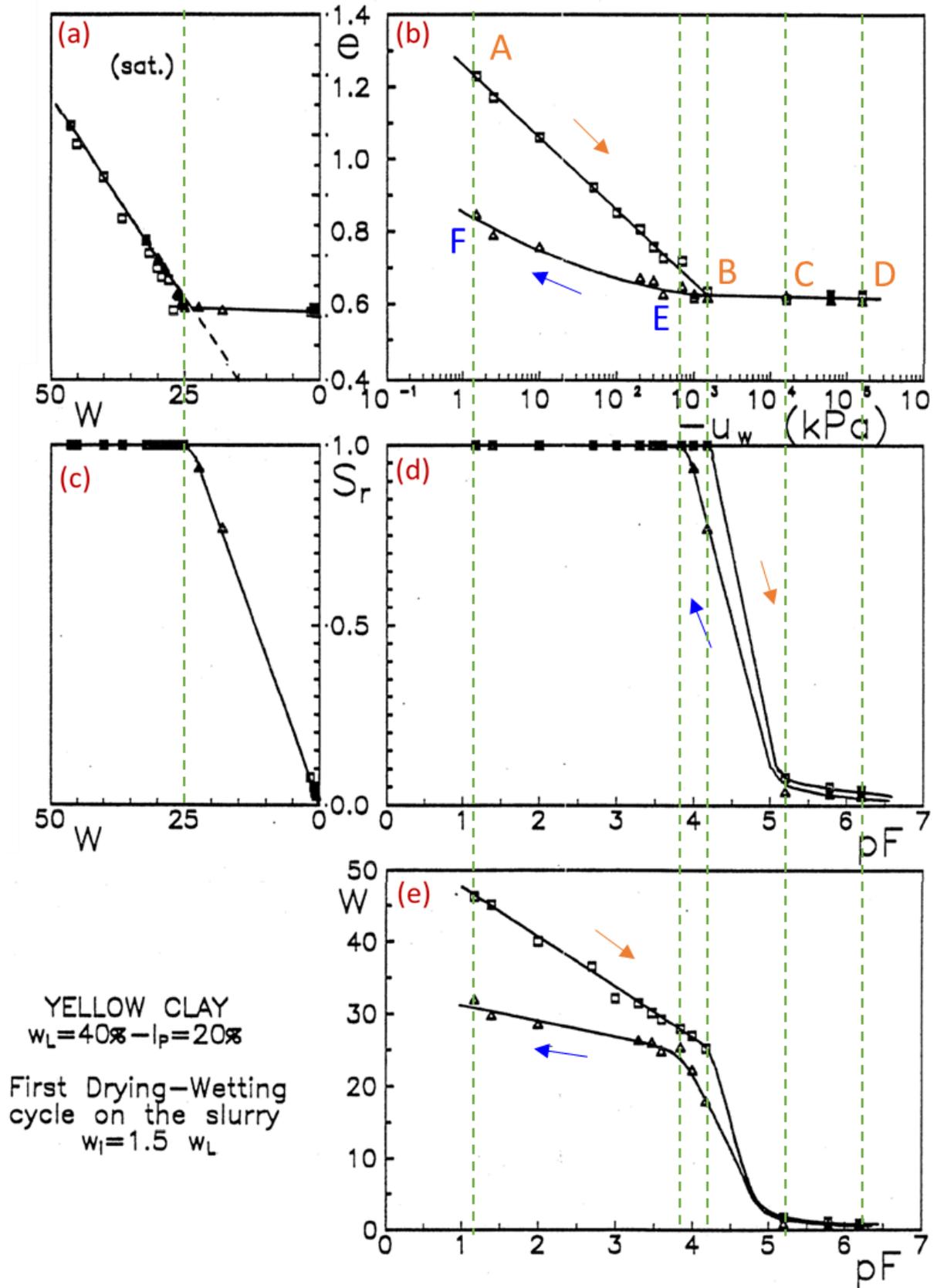


Figure 16: Premier cycle de dessiccation-imbibition sur l'argile jaune initialement préparée sous forme de pâte à $w_i = 1.5 w_L$ [Indarto, 1991].

I.5. Mécanisme de la fissuration des argiles par dessiccation

Lors de la dessiccation, les sols argileux subissent des déformations de retrait dues principalement à la succion générée au sein du matériau. Ces déformations peuvent provoquer la fissuration du matériau une fois qu'il atteint sa résistance mécanique ultime. La fissuration par dessiccation dans les sols est une problématique étudiée par les chercheurs depuis de décennies, qui a des conséquences dans plusieurs domaines. En hydraulique, elle peut affecter la perméabilité du sol en agissant comme un chemin préférentiel d'écoulement. En mécanique des sols, les fissures diminuent la résistance mécanique du sol qui contrôle la performance des ouvrages en terre. Plusieurs recherches ont été réalisées sur la mécanique de la rupture depuis le début du XXe siècle. Par exemple, les études de Kindle [Kindle, 1917, 1923] sont parmi les premiers travaux trouvés dans la littérature sur ce sujet. Il a réalisé des essais de dessiccation sur deux types de boues pour étudier les effets de la cinétique de séchage, la salinité de la boue et sa composition minéralogique. Il a trouvé que les fissures observées lors d'une dessiccation rapide sont plus large que celles observées lors d'une dessiccation lente. De même, il a rapporté qu'un degré élevé de salinité retarde la formation de fissures au cours du séchage. Il a observé également que l'amendement d'une boue argileuse avec de la marne ou du sable permet d'avoir des fissures sous forme des petits polygones.

I.5.1. Initiation et propagation des fissures

L'initiation et la propagation des fissures par dessiccation ont été abordées dans plusieurs études expérimentales. Dans ce cadre, des essais de retrait libre ont été réalisés sur des échantillons rectangulaires, circulaires, en bande et in-situ. La morphologie des fissures dépend de différents facteurs, tel que le type de sol, les dimensions de l'échantillon, les conditions aux limites et les conditions de séchage... En général, l'initiation des fissures se produit dans la surface exposée à l'air qui présente la succion la plus élevée. Ensuite, la concentration des contraintes en bout de fissure entraîne la propagation de ces fissures par extension (dans le plan) et en profondeur. Ainsi, la bifurcation des fissures primaires induit la formation des fissures secondaires et tertiaires [Konrad, 1997 ; Kodikara, 1998].

I.5.1.1. Fissures unidirectionnelles

Différents types d'essais ont été réalisés pour étudier les aspects dynamiques de l'initiation et la propagation des fissures unidirectionnelles dans les argiles. Lecocq et Vandewalle [Lecocq, 2003] ont effectué une étude expérimentale sur des essais de dessiccation en bande (largeur = 7 mm, hauteur = 5 mm et longueur = 200 mm) afin d'imposer la formation des fissures

uniquement dans la direction perpendiculaire à la ligne de plus grande dimension (la longueur). Ils ont trouvé que le taux de propagation de chaque fissure (l'évolution de sa largeur) est une fonction décroissante du temps de séchage. Néanmoins, le taux de propagation cumulé de toutes les fissures demeure constant jusqu'à ce que l'argile atteigne sa limite de retrait (Figure 17(a)). Cette observation met en évidence l'interaction entre les fissures voisines par le fait que l'apparition d'une nouvelle fissure à proximité d'une fissure existante provoque une baisse significative du taux de propagation de la fissure existante.

De même, Amarasiri et al. [Amarasiri, 2011] ont trouvé des résultats similaires sur des essais de dessiccation en bande. La subdivision séquentielle a été le principal mode de développement des fissures observées dans leurs essais (Figure 17(b)). L'initiation de la première fissure était toujours proche du centre de la bande. Kodikara et Choi [Kodikara, 2006] ont présenté un contexte théorique pour ce phénomène basé sur la contrainte maximale qui se développe dans la bande. Selon leur modèle analytique, la contrainte maximale se produit au centre de la bande, ce qui facilite l'initiation de la fissure. Ensuite, une sous-division séquentielle suit, divisant chaque bande fissurée en des bandes plus petites.

Avila et al. [Avila, 2013] ont développé un autre modèle d'essai permettant d'étudier la formation des fissures unidirectionnelles. Cet essai consiste en un moule ayant une forme géométrique en H (Figure 17(c)). La reproductivité des positions des fissures dans ce type d'essai peut être expliquée par la concentration des contraintes dans les zones fissurées.

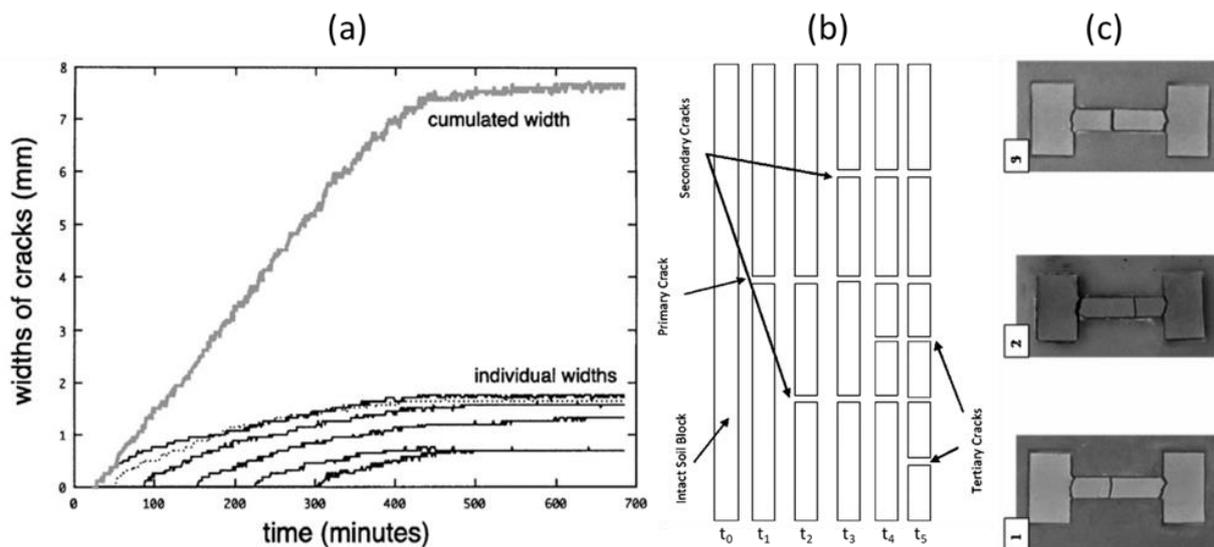


Figure 17: (a) Evolution de la largeur des fissures au cours du temps de séchage [Lecocq, 2003] ; (b) Schéma descriptif de la progression des fissures dans un essai en bande [Amarasiri, 2011] ; (c) Aspect final d'un essai en H [Avila, 2013].

I.5.1.2. Fissures bidirectionnelles

En général, les fissures par dessiccation dans les argiles résultent d'un mélange de motifs orthogonaux et non orthogonaux [Kodikara, 2002]. Les types de fissuration sont identifiés par l'orientation au niveau des intersections. Dans le cas des motifs orthogonaux, les fissures ont tendance à se rencontrer à angle droit. Ce type de fissures correspond aux sols de faible cohésion, ainsi qu'aux cinétiques lentes de dessiccation. L'une des caractéristiques importantes des fissures orthogonales est qu'elles se produisent de manière séquentielle. Les fissures primaires divisent la surface du sol en blocs, puis le séchage ultérieur a tendance à subdiviser ces blocs. La Figure 18(a) illustre un schéma de fissures essentiellement orthogonales observé par Corte et Higashi [Corte, 1960].

Les fissures non orthogonales correspondent aux sols cohésifs, ainsi qu'aux cinétiques rapides de dessiccation des boues d'argiles. Ces fissures créent principalement des intersections à 120° en phase primaire. Contrairement à la tendance séquentielle des fissures orthogonales, les fissures non orthogonales se produisent simultanément et relativement vite. La Figure 18(b) montre un motif de fissures non orthogonal dans une argile [Corte, 1960]. Les fissures hexagonales peuvent être dues à la bifurcation d'une seule fissure en cours de propagation. De même, elles peuvent partir d'un seul point et s'étendre dans trois directions en faisant des angles égaux dans toutes les directions dans le plan de la fissure.

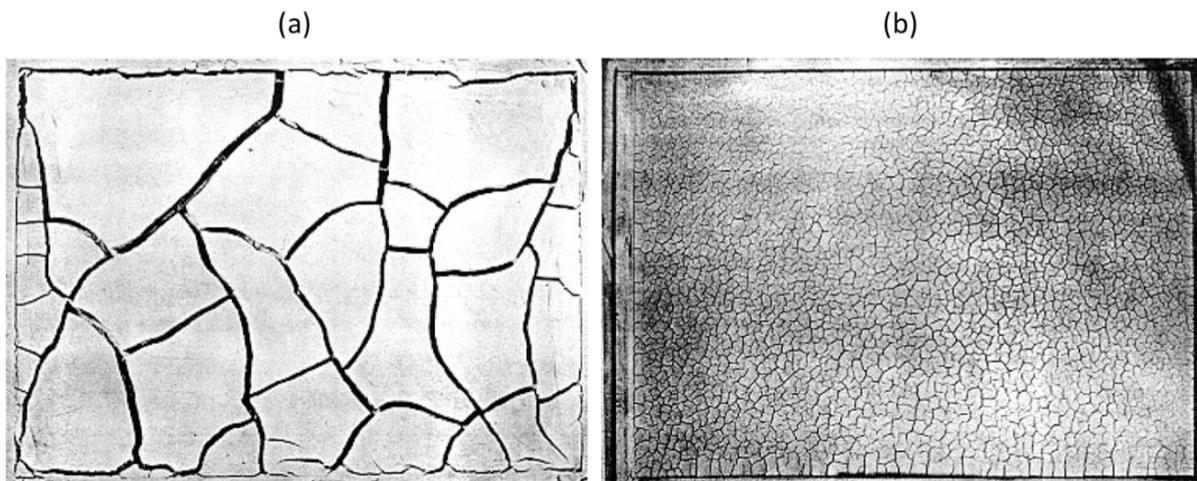


Figure 18: Motif (a) orthogonal ; (b) non orthogonale ; des fissures par dessiccation [Corte, 1960].

I.5.1.3. Mesure de la profondeur des fissures

Récemment, l'analyse des fissures de dessiccation en profondeur est devenue de plus en plus fondamentale, du fait de son apport avantageux sur l'effet des conditions aux limites et du gradient d'humidité dans l'échantillon. Sanchez et al. [Sanchez, 2013] ont couplé un appareil laser de profil 2D avec un contrôleur de mouvement, afin de pouvoir scanner la surface entière

de l'échantillon (Figure 19). Cette technique permet de suivre l'évolution de la morphologie du réseau des fissures pendant la dessiccation.

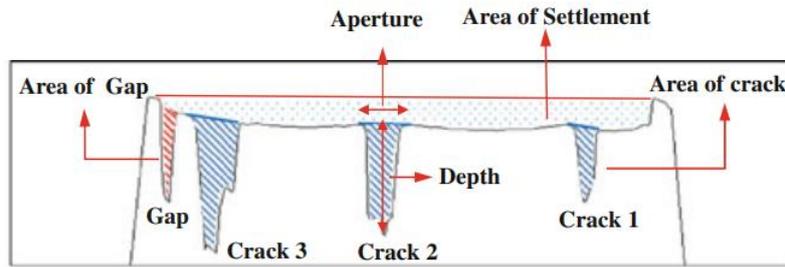


Figure 19: Schéma descriptif de la morphologie du réseau des fissures en Z [Sanchez, 2013].

I.5.2. Energie de la rupture

La rupture des matériaux est définie par la séparation irréversible d'un milieu continu, soumis à des sollicitations, en deux ou plusieurs parties, permettant de créer une surface de discontinuité. La mécanique de la rupture s'intéresse à l'interaction entre la discontinuité et le milieu continu qui l'entoure, afin de caractériser le comportement à la fissuration des structures.

I.5.2.1. Modes d'ouverture des fissures

En mécanique de la rupture, il existe trois modes de fissuration élémentaires [Irwin, 1954] (Figure 20). Le mode I souvent appelé "mode d'ouverture", il résulte des contraintes de traction normales. Dans ce mode, la direction de propagation des fissures est perpendiculaire aux contraintes exercées qui tendent à rompre les liaisons entre les deux bords de la fissure. Le mode II ou "mode de glissement" est provoqué par des contraintes de cisaillement, appliquées parallèlement à la direction de propagation des fissures. Le mode III appelé "mode de déchirement" résulte des contraintes de cisaillement extraplanaires et parallèles à la direction du fond de la fissure. Les fissures observées lors de la dessiccation des sols argileux appartiennent souvent au mode I [Lachenbruch, 1961 ; Amarasiri, 2011]. Néanmoins, certains travaux ont montré que la fissuration par dessiccation peut se produire selon un mode mixte I/II ou I/III [Wei, 2016].

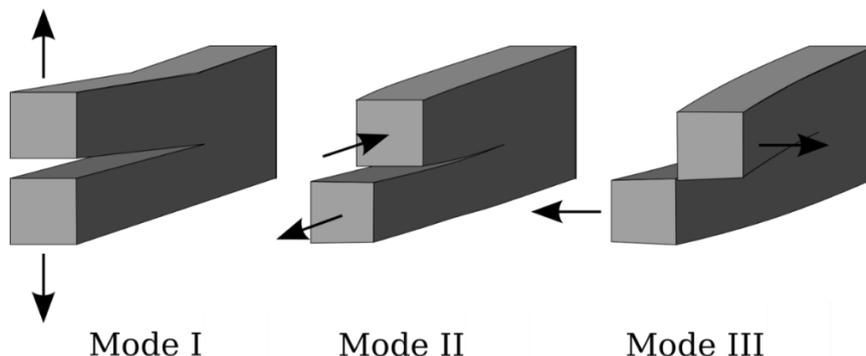


Figure 20: Modes d'ouverture des fissures.

I.5.2.2. Prédiction de l'initiation des fissures

L'initiation de la fissure dans la dessiccation des sols a fait l'objet d'une considération croissante dans les recherches récentes, du fait de sa contribution à la prévention de l'apparition des discontinuités dans les sols. D'après Kodikara et Costa [Kodikara, 2013], l'initiation de la fissure est gouvernée par deux facteurs majeurs : la distribution de la contrainte de traction et de l'énergie de rupture dans le matériau. Le premier facteur est généralement dû aux conditions aux limites qui perturbent le retrait libre du sol et aboutissent à l'apparition de la discontinuité une fois que le matériau atteint sa résistance à la traction. Le deuxième facteur est le résultat d'une hétérogénéité locale dans le matériau. A cause des défauts préexistants dans la structure du sol, le matériau aura besoin de moins d'énergie pour amorcer la fissure, qui cherche l'endroit où l'énergie est minimale pour se propager.

I.5.2.3. Approches énergétiques

Une fois que la fissure est amorcée dans le matériau, sa propagation ultérieure est contrôlée par l'état de contrainte aux bords de la fissure, ainsi que par la dissipation de l'énergie. Plusieurs chercheurs ont tenté d'appliquer les principes de la mécanique linéaire élastique de la rupture (LEFM, 'Linear Elastic Fracture Mechanic' en anglais) pour expliquer la propagation des fissures par dessiccation dans les matériaux granulaires. Cependant, la LEFM, qui correspond aux critères de Griffith, reste mal adaptée au cas des sols plastiques. Par conséquent, d'autres chercheurs ont suggéré l'utilisation des approches élasto-plastiques (EPFM, 'Elastic-Plastic Fracture Mechanic' en anglais), tel que les apports de Irwin et l'intégrale-J établie par Jim Rice, pour prendre en compte la dissipation de l'énergie plastique dans les sols [Irwin, 1957 ; Rice, 1968].

I.5.2.3.1. Critère de Griffith

Griffith [Griffith, 1921] a été le premier à élaborer une approche énergétique basée sur la conservation de l'énergie totale dans une matière solide. En effet, l'énergie totale dans une matière est égale à la somme des énergies cinétique, potentielle, élastique et dissipée. Cette théorie implique que la perte de l'énergie de déformation élastique à l'intérieur d'un corps soumis à une contrainte lorsque la fissure s'étend, est égale à l'énergie dissipée pour créer des nouvelles surfaces aux bords de cette fissure. Ainsi, toute propagation d'une fissure dans un corps induit un transfert d'énergie.

La formulation de Griffith peut être définie en considérant une plaque infinie, ayant un module de Young (E), soumise à une contrainte de traction uniforme (σ) appliquée à l'infini (Figure 21(A)). En se basant sur la théorie de l'analyse des contraintes développée par Inglis [Inglis, 1913], Griffith a démontré que la variation de l'énergie élastique (U_e) due à l'introduction d'une fissure de longueur ($2a$) est donnée par :

$$U_e = \pi \sigma^2 a^2 / E \quad (6)$$

De même, l'énergie dissipée (U_s) permettant de créer les deux nouvelles surfaces aux bords de cette fissure peut être donnée par :

$$U_s = 4 a \gamma_s \quad (7)$$

Avec γ_s est la tension de surface.

D'après Griffith, la rupture de la plaque se produit lorsque la perte de l'énergie de déformation élastique (dU_e/da) devient supérieure à l'accroissement de l'énergie dissipée (dU_s/da) dans le matériau (Figure 21(B)). Autrement dit, la fissure se propage lorsque la contrainte de traction appliquée atteint une valeur critique (σ_c) donnée par :

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2 E \gamma_s}{\pi a}} \quad (8)$$

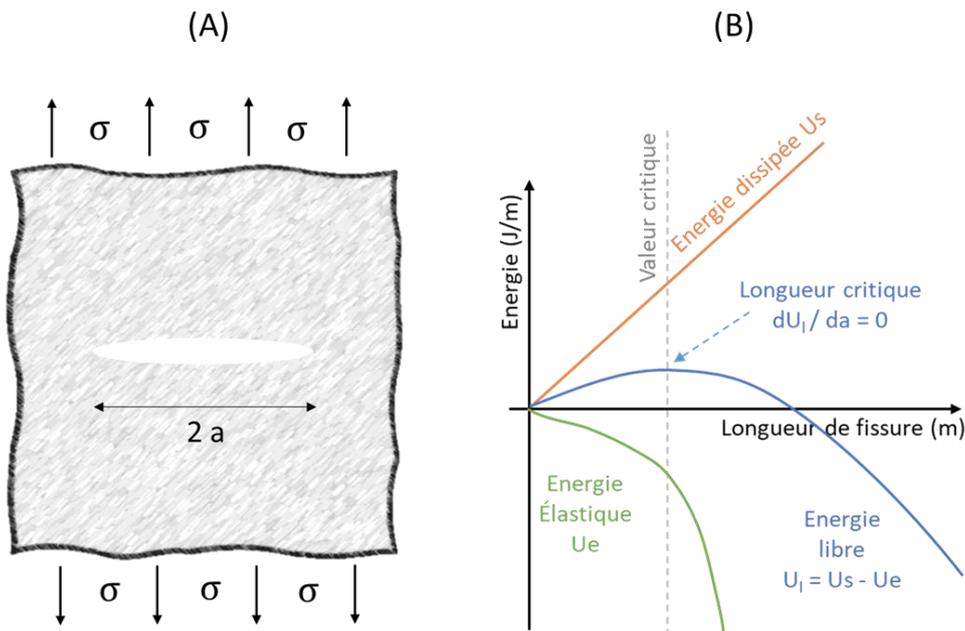


Figure 21: (A) Plaque infinie chargée par une contrainte σ ;
(B) Evolution des énergies lors de l'amorce d'une fissure [Griffith, 1921].

I.5.2.3.2. Apports de G. R. Irwin

Le critère de Griffith convient parfaitement pour étudier la rupture dans un matériau élastique. Son principal défaut est qu'il ne considère que l'énergie de création de surface dans le calcul de l'énergie dissipée (U_s). Ce défaut rend le concept de Griffith irréaliste dans le cas d'un matériau plastique, qui possède une énergie plastique dissipée beaucoup plus importante que l'énergie de surface. Irwin [Irwin, 1957] a fait progresser le critère de Griffith en incluant le terme de l'énergie due à la plastification du matériau (U_p) dans le bilan de l'énergie dissipée. Cet apport implique que la fissure se propage lorsque la répartition des contraintes aux abords du front de la fissure atteint un état critique.

Dans ce cas l'énergie dissipée (U_s) sera donnée par :

$$U_s = 4 a \gamma_s + U_p \quad (9)$$

Par conséquent, la notion modifiée de la contrainte de traction critique provoquant la rupture du matériau peut être écrite comme suit :

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2 E \gamma_s + dU_p/da}{\pi a}} \quad (10)$$

I.5.2.3.3. Intégrale-J

Pour que le critère d'Irwin soit valable, la surface de la zone plastique dans le corps solide doit être inférieure à la surface de la zone discontinue (zone fissurée). De même, le corps solide dans son ensemble doit se comporter de manière approximativement élastique. Ainsi, une approximation plus réaliste du comportement plastique a été introduite par Jim Rice [Rice, 1968] permettant de mieux décrire la répartition des contraintes dans les zones plastifiées. Il a pris en compte le changement d'énergie potentielle pendant la croissance de la fissure pour définir un nouveau paramètre de la rupture mécanique. Ce paramètre, appelé Intégrale-J, représente une intégrale de contour qui peut être évaluée le long de n'importe quel chemin arbitraire entourant la pointe de la fissure (Figure 22), puisqu'elle est indépendante du profil de la fissure. L'intégrale-J fournit une méthode alternative pour déterminer un taux de libération d'énergie pour les cas où les effets de plasticité sont importantes.

Cette intégrale est définie par l'équation ci-dessous :

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds \right) \quad (11)$$

Avec :

Γ : Contour de la pointe de la fissure

W : Energie de déformation élastique calculée par $W = \int_0^\varepsilon \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$

T : Vecteur de traction perpendiculaire au contour Γ donné par $T = n \cdot \sigma$

u : Vecteur de déplacement

ds : Longueur infinitésimale du contour Γ

σ_{ij} et ε_{ij} : tenseurs de contrainte et de déformation

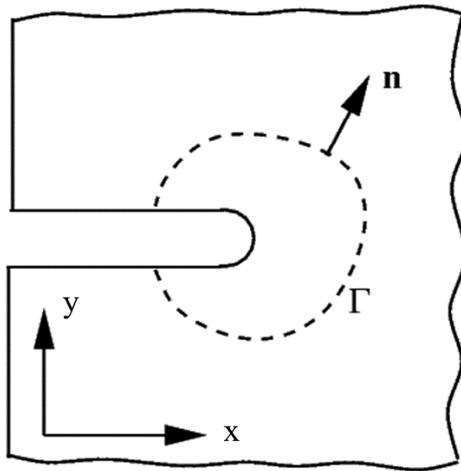


Figure 22: Contour de l'intégrale-J autour de la pointe de la fissure

Chapitre II : Caractérisation de la fissuration

Il existe dans la littérature diverses techniques de laboratoire, visant à caractériser la fissuration par dessiccation dans les matériaux argileux. Ces techniques s'intéressent à l'évolution des déformations de retrait dans le sol pendant le processus de séchage, afin d'étudier les conditions qui conduisent à l'apparition des fissures, ainsi qu'à suivre l'expansion du réseau de fissures dans le matériau. L'objectif étant de comprendre les mécanismes qui sont à l'origine du phénomène de fissuration, pour tenter soit de les prévenir, soit de les minimiser.

II.1. Techniques de caractérisation de la fissuration

II.1.1. Techniques de corrélation d'images

La corrélation d'images est une technique optique qui permet de mesurer les champs de déplacement ou de déformation de manière non destructive. Cette technique consiste à mesurer le déplacement de différents motifs dans la zone étudiée. Elle permet d'identifier la transformation 2D et/ou 3D entre une image numérique de référence et une image déformée, en se basant sur le principe de la conservation du flux optique.

Les premières études utilisant la corrélation d'images étaient basées sur la méthode locale [Peters, 1982]. La méthode, initialement développée par les chercheurs de l'Université de Californie du Sud dans les années 1980, est basée sur l'utilisation de la fonction de corrélation croisée. Chaque image est divisée en imagerie (subsets), dont les positions seront identifiées dans les images déformées en fonction de l'image de référence. La méthode globale, développée pour la première fois en France dans les années 2000, est basée sur un maillage et des fonctions de forme, directement dérivés de la méthode des éléments finis afin d'améliorer la résolution du modèle mathématique [Besnard, 2006]. Cette dernière approche a permis de réduire globalement les résidus de corrélation, et de rendre la corrélation plus uniforme en cherchant un champ de déplacement qui maintient l'échelle de gris dans l'image [Réthoré, 2009].

II.1.1.1. DIC

La corrélation d'images numériques (DIC, 'Digital Image Correlation' en anglais) est l'une des techniques les plus utilisées pour analyser les déformations aboutissant à la fissuration par dessiccation dans les sols. Elle consiste à prendre une série de photos d'un échantillon avec un appareil photo digital fixé sur un statif fixe. A l'aide d'un logiciel de traitement d'images, les photos sont analysées pour créer des champs de contour pour les déplacements et les

déformations. Les échantillons doivent être préparés avec un motif de points aléatoires sur leur surface (aspect moucheté) afin que le logiciel puisse détecter les déplacements des pixels. Pendant l'essai, la caméra prend des photos avant et après déformation, puis le logiciel analyse la différence entre les pixels des différentes photos et les corrèle pour calculer les champs de déformations.

Plusieurs études ont utilisé la technique DIC dans le domaine de la géotechnique. Par exemple, Wei [Wei, 2014, 2020] a utilisé cette technique pour étudier le comportement de deux argiles : une kaolinite et un mélange de kaolinite/montmorillonite, sur des échantillons de forme rectangulaire (300x200x4 mm). Il a constaté que les fissures peuvent se produire en mode d'ouverture pure, en mode d'ouverture/glisement ou en mode d'ouverture/déchirement. En mode d'ouverture pure (mode I), la direction de la fissure est perpendiculaire à celle des déformations principales majeures (Figure 23(a)). Ces déformations en extension restent très importantes dans les zones où l'ouverture de la fissure n'est pas assez suffisante pour les détendre. En mode mixte d'ouverture/glisement (modes I et II), les déformations principales majeures sont parallèles à la direction des fissures (Figure 23(b)). En mode mixte d'ouverture/déchirement (modes I et III), on observe une extension accompagnée d'un décalage vertical (dans la direction z) aux extrémités de la fissure (Figure 23(c)). En outre, il a trouvé que lorsqu'il s'agit d'une rupture par traction, la direction de propagation des fissures est perpendiculaire aux extensions. Alors qu'en présence des efforts de cisaillement à proximité de la fissure, cette direction tend à suivre la déformation principale majeure en avant de l'extrémité de la fissure. Ce phénomène est connu par la bifurcation de la fissure.

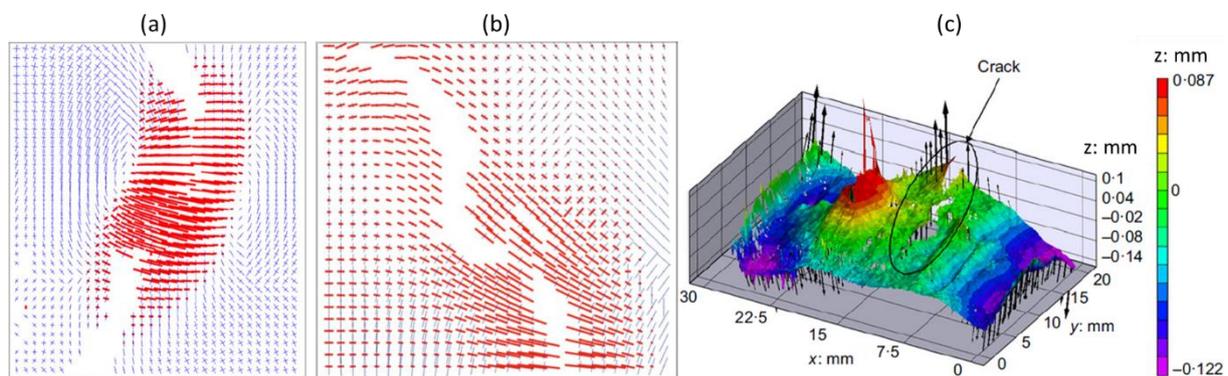


Figure 23: Orientation des champs de déformations et de déplacements aux extrémités des fissures en (a) mode I ; (b) modes mixtes I et II ; (c) modes mixtes I et III [Wei, 2014].

Par ailleurs, Eid et al. [Eid, 2015] ont utilisé le traitement d'image pour analyser le comportement de séchage d'un limon naturel (Figure 24). Ils ont constaté que le séchage du sol sur un support lisse induit un retrait global homogène jusqu'à l'apparition de fissures, malgré

quelques hétérogénéités observées au niveau des champs de déformation locaux. Ces hétérogénéités génèrent des contraintes internes locales provoquant la fissuration du matériau. En outre, les déplacements sur les bords sont plus importants que ceux au centre de l'échantillon, et sont orientés vers le centre. Cette observation montre que lorsque les effets des conditions aux limites sont négligeables pendant la dessiccation, le retrait volumétrique global de l'échantillon entraîne un déplacement centripète homogène.

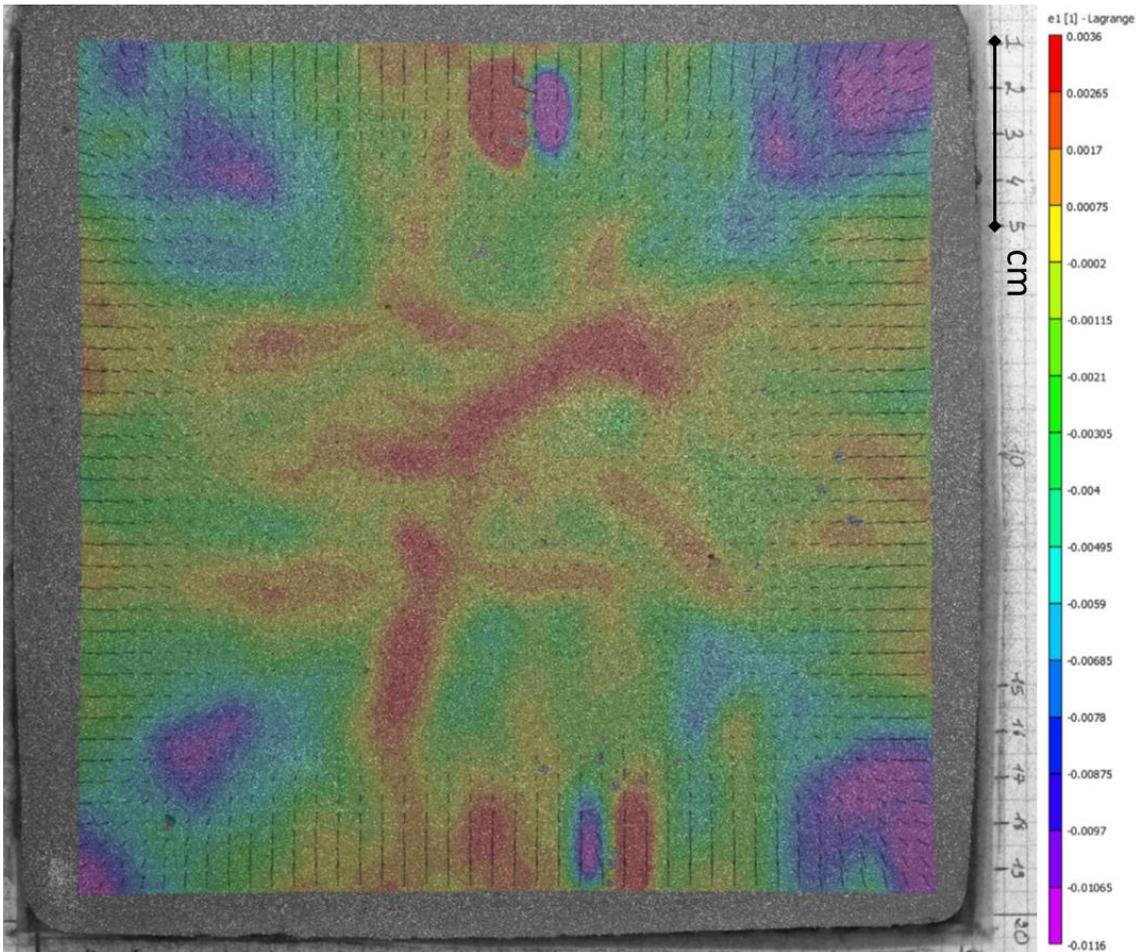


Figure 24: Champ de déplacements et de déformations lors du séchage d'un échantillon de limon naturel [Eid, 2015].

De même, Kanema et al. [Kanema, 2016] ont étudié, par la technique DIC, le comportement du retrait d'un limon naturel amendé avec différents pourcentages volumiques d'agrégats de béton recyclé. Ils ont constaté que l'ajout du superplastifiant réduit l'apparence des fissures en augmentant la déformation globale et en réduisant la déformation locale.

D'autre part, Ameer [Ameer, 2016] a combiné la technique DIC avec un dispositif expérimental de traction indirecte par flexion sur des poutrelles de kaolinite de 35x10x10 mm soumises à différents niveaux de succion (361 MPa, 110 MPa et 38 MPa). Il a trouvé que la déformation

critique est atteinte, dans les trois cas, lorsque la contrainte atteint la résistance maximale en traction de la poutrelle qui dépend de la succion initiale.

En revanche, il a montré que la succion imposée joue un rôle important dans la fissuration par dessiccation des argiles (Figure 25). Pour des fortes succions ($s = 361$ MPa), les fissures se développent plus facilement en mode d'ouverture (mode I) une fois que le matériau atteint sa déformation critique ultime ($\epsilon_{xx} = 2.5$ %). En revanche, pour des succions inférieures ($s = 38$ MPa et $s = 110$ MPa), le matériau se relaxe en allant de l'extension à la compression avant d'atteindre sa déformation critique. Ceci met en évidence l'effet de la cinétique de séchage sur l'apparition des fissures lors de la dessiccation des argiles.

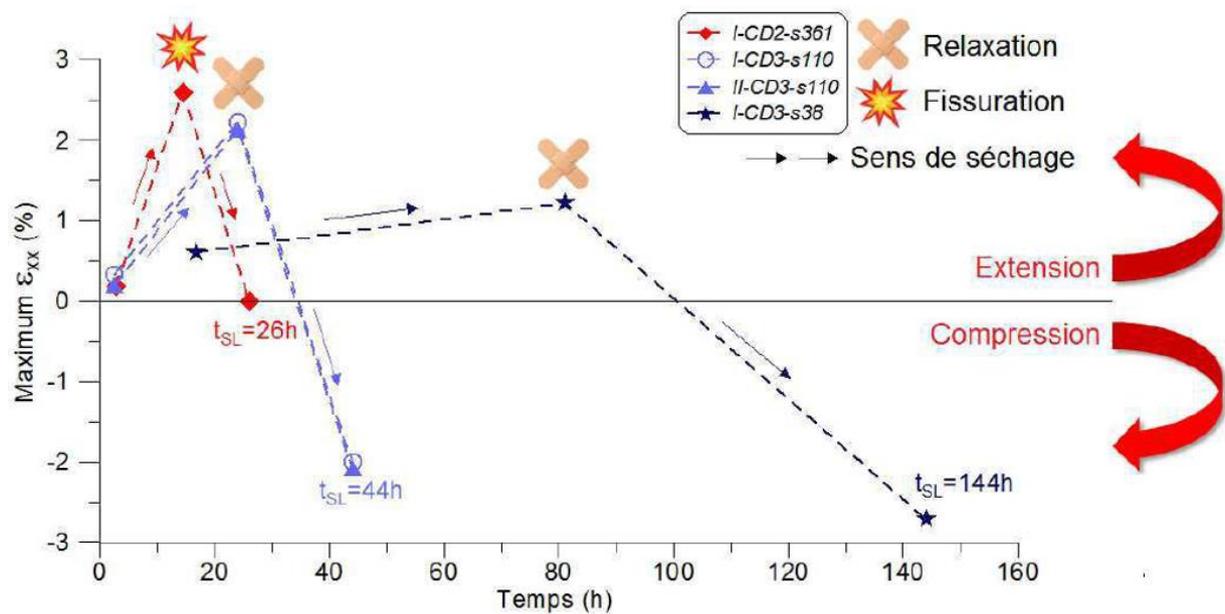


Figure 25: Evolution de la déformation ϵ_{xx} au cours du séchage dans des échantillons soumis à des différentes succions imposées [Ameur, 2016].

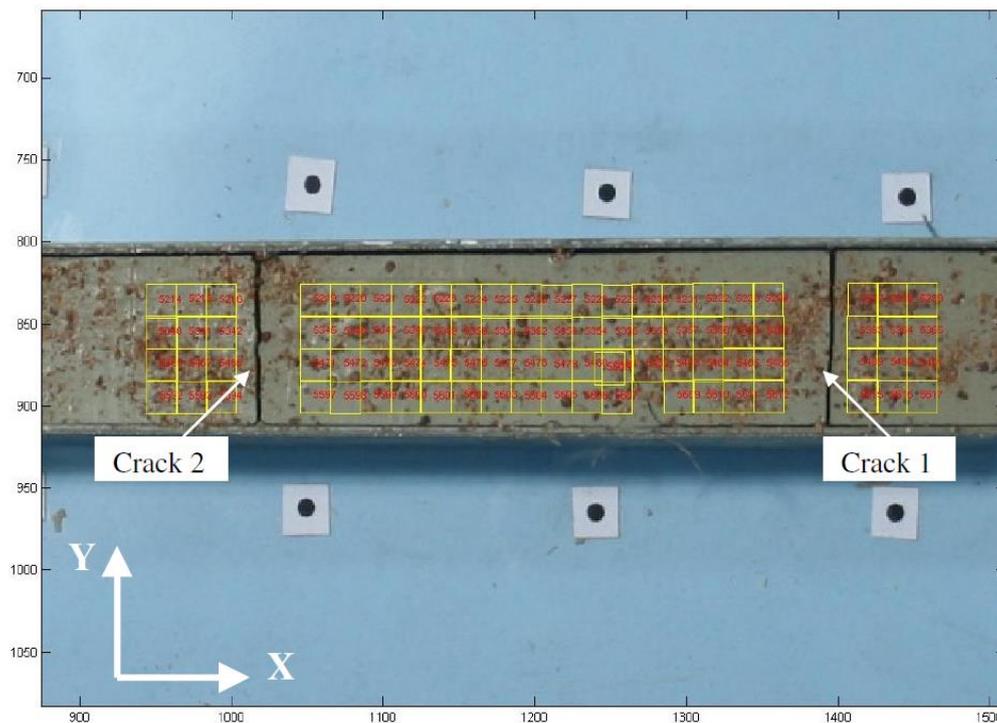
De même, Wang et al. [Wang, 2017] ont utilisé la technique DIC pour étudier le comportement d'un schiste argileux sur des chemins drainage/humidification. Ils ont constaté que l'analyse du champ de déformation permet de prédire de façon fiable l'initiation des fissures de dessiccation à partir des concentrations de déformation en surface.

II.1.1.2. PIV

La vélocimétrie par images de particules (PIV, 'Particle Image Velocimetry' en anglais) est une technique optique dédiée à la mesure de champs de vecteurs vitesse. Le principe fondamental de la PIV est de suivre la texture (c'est-à-dire la variation spatiale de la luminosité) dans un maillage prédéfini à travers une série d'images. Un maillage constitué de motifs carrés est défini dans l'image de référence. Ensuite, le programme compare la texture de ces motifs avec une

deuxième image. Cette technique utilise des images de particules marqueuses pour mesurer les champs de vitesse instantanée en 2D et/ou en 3D. Ces particules sont éclairées par des faisceaux de lumière de courte durée pulsés à des intervalles de temps précis. Le champ vectoriel de vitesse est obtenu en analysant ces images enregistrées pour mesurer les déplacements des particules.

La technique PIV a été utilisée pour la première fois dans la dessiccation des sols par Costa [Costa, 2010]. Grâce à cette technique, il a calculé les champs de déplacement et de déformation dans des essais en bande (Figure 26). Ainsi, il a montré que la formation des fissures unidirectionnelles se fait selon le mode I. De même, il a utilisé la technique PIV pour calculer l'intégrale-J à travers des essais de flexion à trois points et des essais à l'anneau (Ring-Test). L'intégrale-J dans ces essais représente la variation de l'énergie potentielle due à la propagation de la fissure. Il a trouvé que la première fissure s'amorce pour une énergie de l'ordre de 0.7 J/m.



II.1.2. Autres techniques de caractérisation non destructives

En plus des techniques de corrélation d'image, il existe dans la littérature plusieurs autres techniques expérimentales permettant de caractériser la fissuration dans les sols de manière non-destructive.

II.1.2.1. Impulsions ultrasoniques

La technique de mesure de la vitesse des impulsions ultrasoniques est une technique non-destructive permettant d'évaluer les propriétés mécaniques du sol et de caractériser le volume des discontinuités internes dans l'échantillon mesuré. Elle consiste à mesurer le temps de propagation d'une onde ultrasonore à travers un échantillon sur une distance connue. L'énergie vibratoire est introduite dans l'échantillon par un transducteur de transmission, qui est raccordé à une surface. L'impulsion traverse l'élément et sera détectée par un transducteur récepteur, qui est raccordé à la surface opposée. La longueur du trajet direct entre les transducteurs est divisée par le temps de parcours pour obtenir la vitesse de l'impulsion à travers l'échantillon. Wang et Li [Wang, 2015] ont utilisé cette technique pour étudier la propagation des fissures dans des échantillons, formés de mélange de sols et de roches, lors des essais de compression simple (Figure 27(a)). Les résultats des essais ont montré que la résistance à la compression et la vitesse des impulsions ultrasoniques diminuent avec l'augmentation du pourcentage de roche dans l'échantillon. De même, ils ont établi une relation empirique entre la vitesse des impulsions ultrasoniques et la largeur des fissures dans les échantillons. En se basant sur ces deux paramètres, la courbe de contrainte-déformation lors du chargement uniaxial a été divisée en trois phases : la phase linéaire-élastique, la phase d'initiation des fissures, et la phase d'accélération et de propagation des fissures (Figure 27(b)).

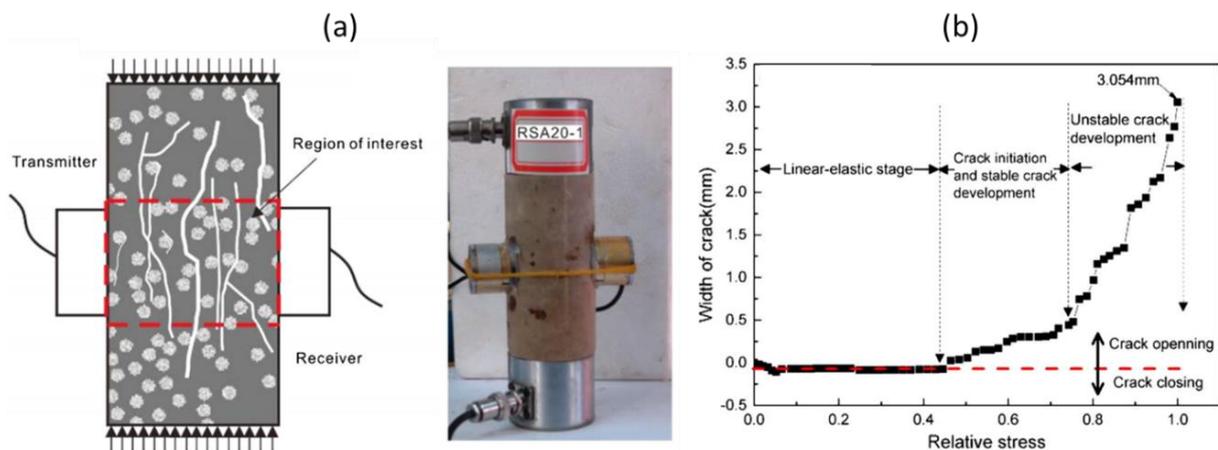


Figure 27: (a) Principe de l'essai d'impulsions ultrasoniques ; (b) Phases observées lors du chargement uniaxial [Wang, 2015].

II.1.2.2. Laser

La technique laser est basée sur le principe de la triangulation pour une acquisition bidimensionnelle d'un profil en hauteur de diverses surfaces ciblées (Figure 28). Une ligne laser est générée par des lentilles spéciales et projetée sur la surface de la cible. Un système optique de haute qualité projette la lumière réfléchie de cette ligne laser sur un capteur matriciel très sensible. Le contrôleur intégré dans la tête du capteur utilise cette image matricielle pour

calculer la position le long de la ligne laser (axe y) et la distance verticale (axe z). Sanchez et al. [Sanchez, 2013] ont utilisé la technique laser pour mesurer la profondeur et la largeur des fissures lors de la dessiccation d'un limon organique (voir paragraphe I.5.1.3 du Chapitre I). Ils ont trouvé que lors de la dessiccation d'un limon organique ($w_L = 54\%$), la profondeur des fissures évolue linéairement en fonction de leur largeur au début du séchage. Ensuite, la profondeur des fissures se stabilise tandis que leur largeur continue à augmenter jusqu'à atteindre la limite de retrait du matériau. De même, ils ont observé que la profondeur des deux premières fissures atteint rapidement sa valeur ultime par rapport aux autres fissures dans l'échantillon.

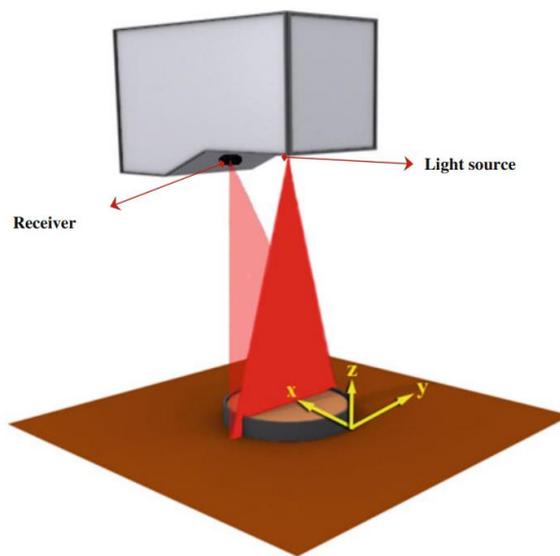


Figure 28: Etude de la fissuration par balayage de la surface à l'aide d'un laser [Sanchez, 2013].

II.1.2.3. Tomographie par rayons X

La tomographie par rayons X est une technique efficace et non destructive, qui fournit une visualisation à haute résolution de la structure interne des matériaux. Cette visualisation permet de restituer le contraste de la densité du matériau, grâce à l'émission de faisceaux de rayons X, à leur pénétration dans l'échantillon suivant plusieurs directions et à la mesure de leur atténuation progressive [Phillips, 1997]. Le premier scanner de tomographie assistée par ordinateur a été réalisé par l'ingénieur en électronique G. N. Hounsfield de la société EMI en 1972. Il a d'abord été introduit dans le domaine de la radiologie médicale, puis appliqué comme nouvelle technique pour étudier d'autres matériaux.

Dans le domaine de la science des sols et de la géologie, Petrovic et al. [Petrovic, 1982] ont mené une étude innovante sur la tomographie par rayons X et ont révélé la relation linéaire entre la densité apparente du sol et l'atténuation des rayons X. Par la suite, les années suivantes

ont connu de nombreuses applications de la tomographie par rayons X dans la caractérisation des matériaux géologiques. Les chercheurs ont d'abord examiné la corrélation entre le niveau d'énergie des rayons X et l'atténuation relative des rayons X traversant les minéraux du sol [Carlson, 2000 ; Van Geet, 2000]. La différence significative entre les rayons X atténués passant à travers les pores du sol et la phase solide permet la quantification de la microstructure des sols poreux à l'aide de la tomographie par rayons X.

Des recherches basées sur la tomographie par rayons X ont été menées pour étudier les caractéristiques volumétriques et géométriques des réseaux des pores dans le sol, telles que le périmètre et la surface des pores [Grevers, 1989], leurs diamètres [Peyton, 1992] et leurs géométries [Gantzer, 2002]. Étant donné la préoccupation croissante quant à l'analyse morphologique des réseaux de fissures, d'autres chercheurs ont étudié la densité des réseaux de fissures et leur connectivité [Perret, 1999] à l'aide de la tomographie par rayons X.

Les fissures s'amorcent, se propagent et se rejoignent dans le sol au cours de divers processus physiques, ce qui donne lieu à un réseau de fissures compliqué. Les caractéristiques d'imagerie de la technique de tomographie par rayons X permettent des descriptions qualitatives des réseaux de fissures, ce qui apporte de nouvelles connaissances sur les changements dans la microstructure du sol et les mécanismes d'endommagement fondamentaux. Bien que la technique de tomographie aux rayons X ait été largement appliquée pour l'étude du comportement mécanique des sols, les études qualitatives et quantitatives intégrées sur les processus de fissuration par dessiccation des sols restent rares.

Tang et al. [Tang, 2019] ont utilisé la tomographie par rayons X pour étudier la fissuration par dessiccation d'un sol argileux compacté. Grâce à une reconstruction tridimensionnelle de l'échantillon étudié, ils ont corrélé l'évolution spatiotemporelle des paramètres géométriques des fissures, tels que la densité de fissuration (Crack Ratio), le nombre de segments de fissures, leur largeur moyenne, leur longueur totale, et leur surface transversale, avec le processus du séchage et du retrait volumique. Ils ont constaté qu'il existe une tendance très similaire entre ces différents paramètres, qui évoluent considérablement au début de la dessiccation puis se stabilisent avec des légères variations (Figure 29). De même, ils ont observé que les fissures s'amorcent d'abord à la surface de l'échantillon et se propagent à la fois latéralement et vers l'intérieur dans une direction quasiment orthogonale à l'interface sol-air. Le chemin de propagation dévie progressivement en raison de l'hétérogénéité de la microstructure du sol et de l'intensité des contraintes locales résultant de l'évaporation induite par la succion capillaire.

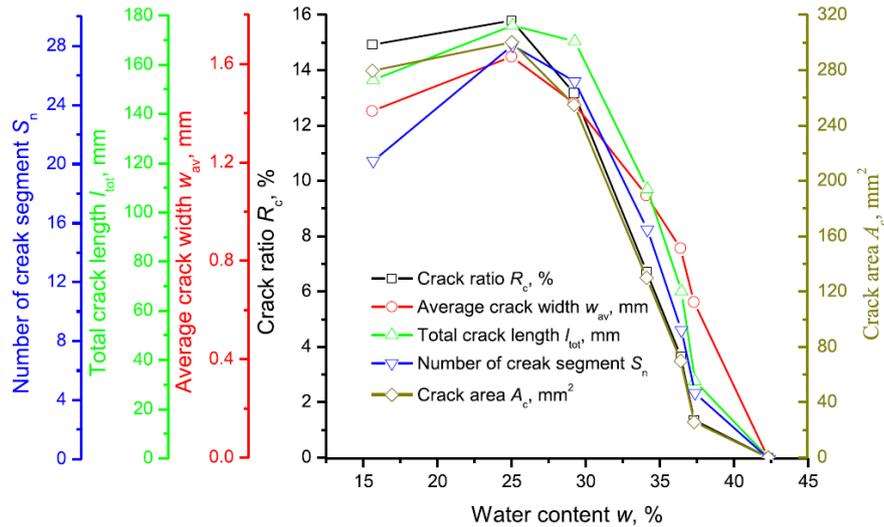


Figure 29: L'évolution des paramètres géométriques moyens des fissures dans la direction longitudinale pendant la dessiccation [Tang, 2019].

II.1.2.4. Microscope optique

Le microscope optique a été utilisé dans plusieurs études pour observer l'initiation et la propagation des fissures lors de la dessiccation des sols. A titre d'exemple, Shin et Santamarina [Shin, 2011] ont montré que l'initiation des fissures dans un sol granulaire aura toujours lieu au niveau des défauts de surface, tels que les cratères de taille submillimétrique, puis se propagera à la fois latéralement et vers le bas (Figure 30). Les inclusions, les grandes anomalies d'agrégats ou les petites caractéristiques topographiques peuvent déclencher la formation de fissures en raison de la distorsion de retrait du milieu environnant.

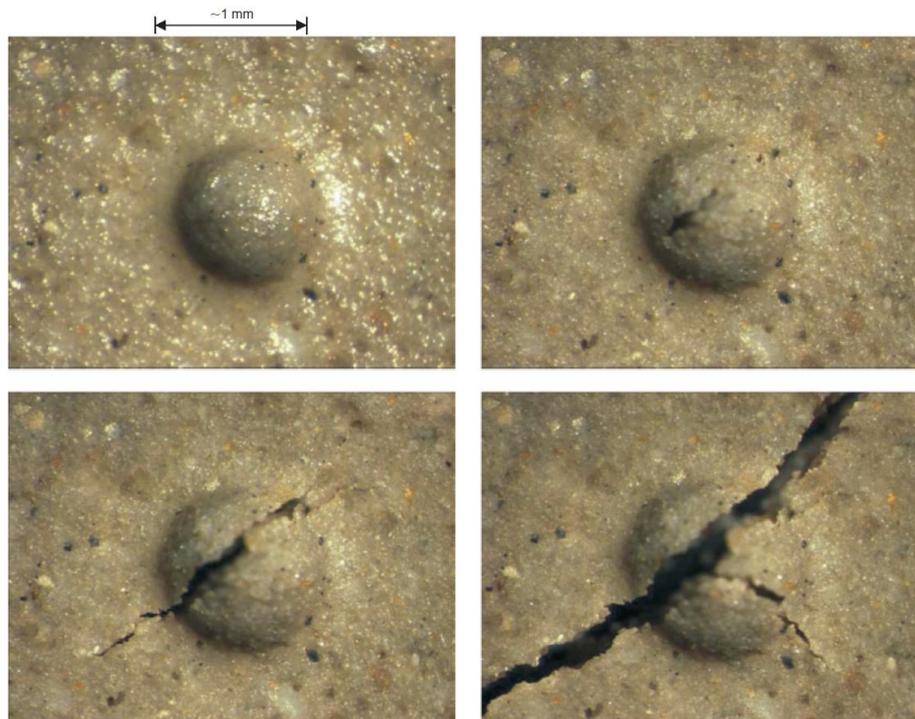


Figure 30: Initiation d'une fissure au fond d'un défaut de surface lors de la dessiccation [Shin, 2011].

II.1.2.5. Méthode de résistivité électrique

La méthode de la résistivité électrique est une approche intéressante pour évaluer les variations spatiotemporelles des propriétés physiques du sol. Elle consiste à quantifier la façon dont le sol résiste au flux électrique. La résistivité électrique est un facteur représentatif de nombreuses propriétés du sol, notamment la nature du solide (minéralogie, morphologie, texture et distribution des particules), la disposition des vides (porosité, tortuosité, connectivité, structure des pores) et les propriétés du fluide (teneur en eau, résistivité électrique, concentration de solutés). L'interaction de ces facteurs détermine le mouvement des anions et des cations sous le champ électrique appliqué, représenté macroscopiquement par la variation de la résistivité électrique du sol. La présence de fissures dans un sol est responsable de la déviation du flux d'ions et d'une perte de potentiel plus importante que celle rencontrée dans un sol intact [Samouëlian, 2004].

Tang et al. [Tang, 2018] ont établi une corrélation physique entre la résistivité électrique apparente et la morphologie des fissures induites par dessiccation dans un sol argileux. Ils ont constaté que pendant le séchage, la résistivité électrique apparente diminue en premier temps, puis augmente lors de la fissuration du matériau. L'évolution de la résistivité électrique apparente dans un sol argileux est dominée par deux facteurs opposés : le premier est dû au retrait volumétrique accompagné d'un réarrangement des particules du sol et d'une concentration plus élevée d'ions dans les fluides des pores, et le deuxième provient de la perte d'eau provoquée par le phénomène d'évaporation. Le premier facteur favorise la conductivité électrique uniquement pendant la phase initiale du séchage, tandis que le second effet domine après l'amorce des fissures de dessiccation. En outre, la présence des fissures donne lieu à une apparition brutale d'anomalies au niveau de la résistivité électrique (Figure 31). La représentation cartographique de la résistivité électrique met en évidence la faible variation des propriétés physiques du sol qui est impossible à visualiser à un stade aussi précoce (de $t = 22$ h à 66.8 h). Des bandes de couleurs différentes délimitent grossièrement les zones soumises à des variations plus importantes de la teneur en eau. Ensuite, la résistivité électrique augmente considérablement avec la formation de la première fissure ($t = 87$ h).

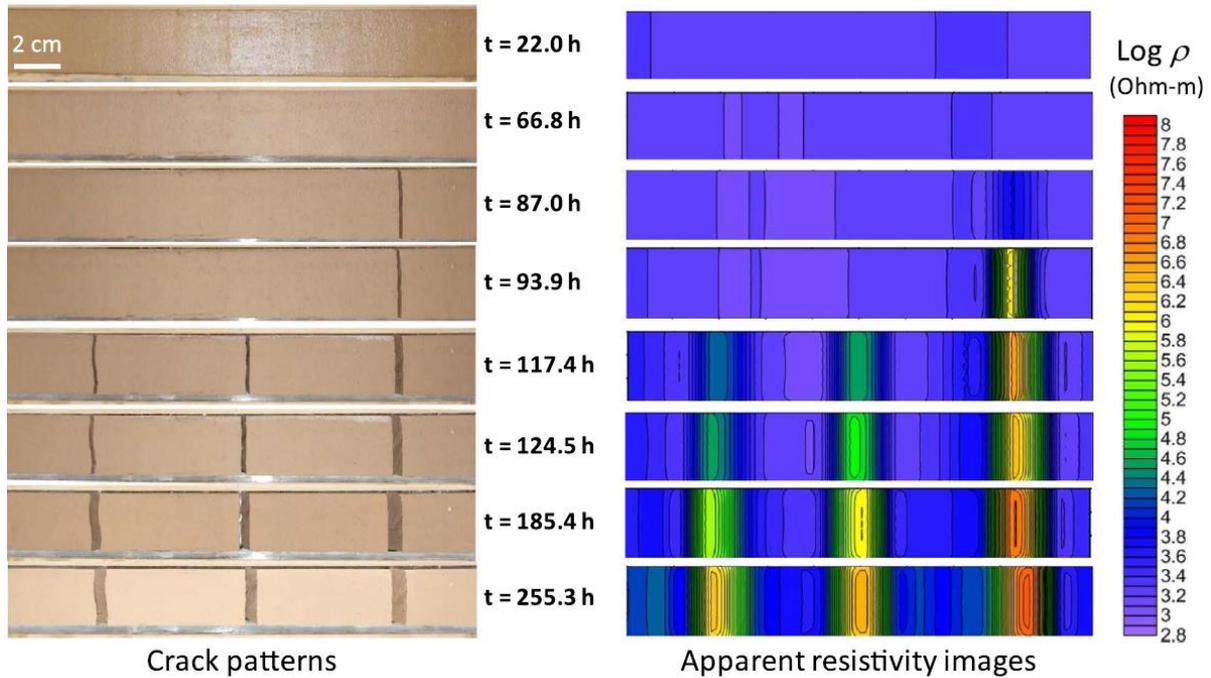


Figure 31: Comparaison des images de fissures de dessiccation et de résistivité électrique à différents moments du processus de séchage [Tang, 2018].

II.1.3. Techniques de caractérisation mécanique

II.1.3.1. Essai à l'anneau (Ring-Test)

L'essai à l'anneau ou le Ring-Test est la méthode expérimentale la plus fréquemment utilisée pour caractériser la fissuration des bétons soumis à un retrait empêché par séchage. Ceci est probablement dû à sa simplicité, à son coût relativement faible et aux principes qui le régissent. Le Ring-Test consiste en un échantillon de béton coulé tout autour d'un anneau métallique. Lors du séchage, le retrait volumique empêché entraîne le développement de contraintes résiduelles qui peuvent provoquer la fissuration de l'échantillon de béton en anneau.

Au cours des dernières années, les chercheurs ont envisagé diverses adaptations du Ring-Test. Par exemple, Malhotra et Zoldners [Malhotra, 1967] ont proposé de réaliser un Ring-Test comme méthode potentielle d'évaluation de la résistance à la traction du béton. Ils ont corrélé la résistance à la traction annulaire du béton (essai Ring-Test) avec les résistances à la compression, à la flexion et à la traction par fendage (essai brésilien). Ils ont montré qu'il existe un degré élevé de corrélation entre ces essais pour différents mélanges de béton.

Swamy et Stavrides [Swamy, 1979] ont proposé un Ring-Test permettant de mesurer la déformation pour évaluer le comportement du béton renforcé de fibres. Carlson et Reading [Carlson, 1988] ont utilisé l'essai à l'anneau pour comparer qualitativement les potentiels de fissuration par retrait de diverses compositions de mortier. Grzybowski et Shah [Grzybowski,

1989] ont utilisé le Ring-Test pour étudier le développement des déformations dans le béton ordinaire et le béton renforcé de fibres en utilisant des jauges de déformation sur la surface du béton pour l'étalonnage d'une approche de modélisation.

Kovler et al. [Kovler, 1993] ont combiné le taux d'empêchement du Ring-Test classique avec l'approche active préconisée par Malhotra [Malhotra, 1967] pour le développement d'un essai avec un anneau central intérieur fabriqué à partir d'un matériau ayant un coefficient de dilatation thermique plus élevé. Dans cet essai, Ils ont utilisé l'anneau pour appliquer une contrainte passive jusqu'à un moment précis où une charge de traction était appliquée à l'anneau en béton introduisant un flux de chaleur dans l'assemblage de l'échantillon. L'approche de Kovler a permis de réduire la durée de l'essai, car l'augmentation de température nécessaire pour provoquer la rupture était liée à la capacité de contrainte supplémentaire potentielle du matériau.

Weiss et Shah [Weiss, 2002] ont utilisé la géométrie de l'anneau pour démontrer l'avantage d'une approche de la mécanique de la rupture permettant de prédire la rupture de l'anneau en béton retenu en fonction de la géométrie. Plus récemment, dans le but d'améliorer la sévérité de l'essai, He et al. [He, 2004] et Dong et al. [Dong, 2014] ont proposé un anneau elliptique pour augmenter la concentration de contrainte fournie par l'anneau (Figure 32).

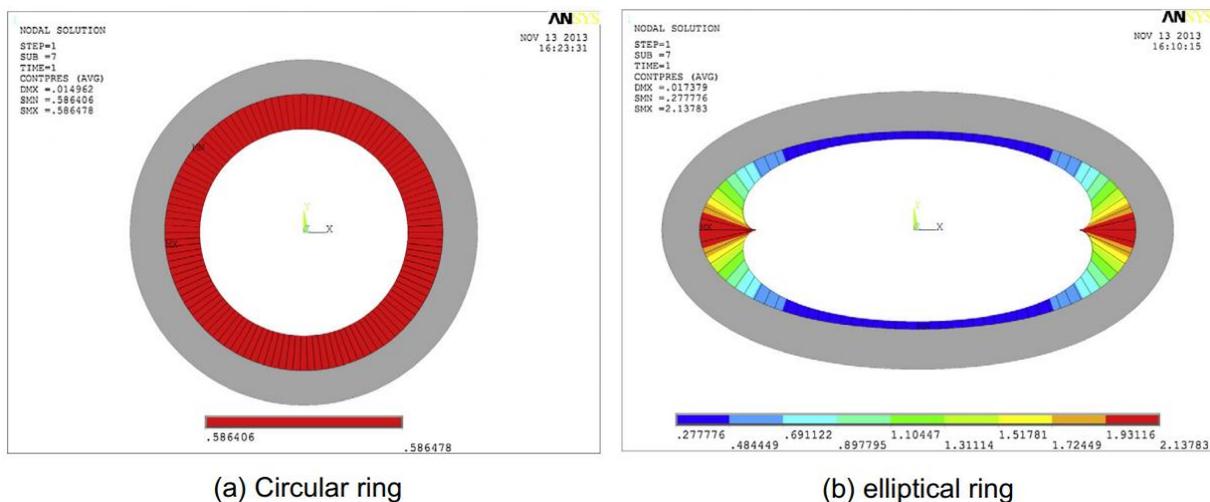


Figure 32: Distribution des contraintes dans le cas d'un anneau circulaire et un anneau elliptique [Dong, 2014].

En revanche, une version normalisée du Ring-Test a été proposée par l'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) et l'American Society for Testing Materials (ASTM) ([AASHTO, 2008], [ASTM, 2016]). La norme ASTM suggère une conception avec respectivement 152.5, 165, 203 et 150 mm comme rayons interne et externe de l'anneau en acier, rayon externe et hauteur de l'échantillon de béton.

Dans le Ring-Test, en fonction des conditions limites imposées, le séchage peut se produire par les surfaces supérieures/inférieures, et/ou par les surfaces circonférentielles. La direction du séchage peut donc jouer un rôle important dans les résultats. Moon et al. [Moon, 2006a] ont étudié l'influence du gradient d'humidité et de la géométrie de l'échantillon sur le taux d'empêchement du Ring-Test (Figure 33). Leurs résultats montrent que, malgré l'influence significative de la direction de séchage sur la distribution des contraintes résiduelles à l'intérieur de l'échantillon, le gradient d'humidité affecte légèrement le taux d'empêchement du Ring-Test. Le taux d'empêchement est défini par la différence entre les déplacements libres et les déplacements empêchés par rapport au déplacement libre. Ceci implique que la même approche analytique peut être appliquée pour estimer le taux d'empêchement pour le séchage par le haut et par le bas ainsi que pour le séchage circonférentiel. Des méthodes analytiques ont été développées pour calculer les contraintes de traction induites dans l'anneau en béton [See, 2003; Hossain, 2004 ; Moon, 2006b]. La plupart de ces méthodes sont basées sur l'équilibre de la pression radiale au niveau de l'interface béton/métal.

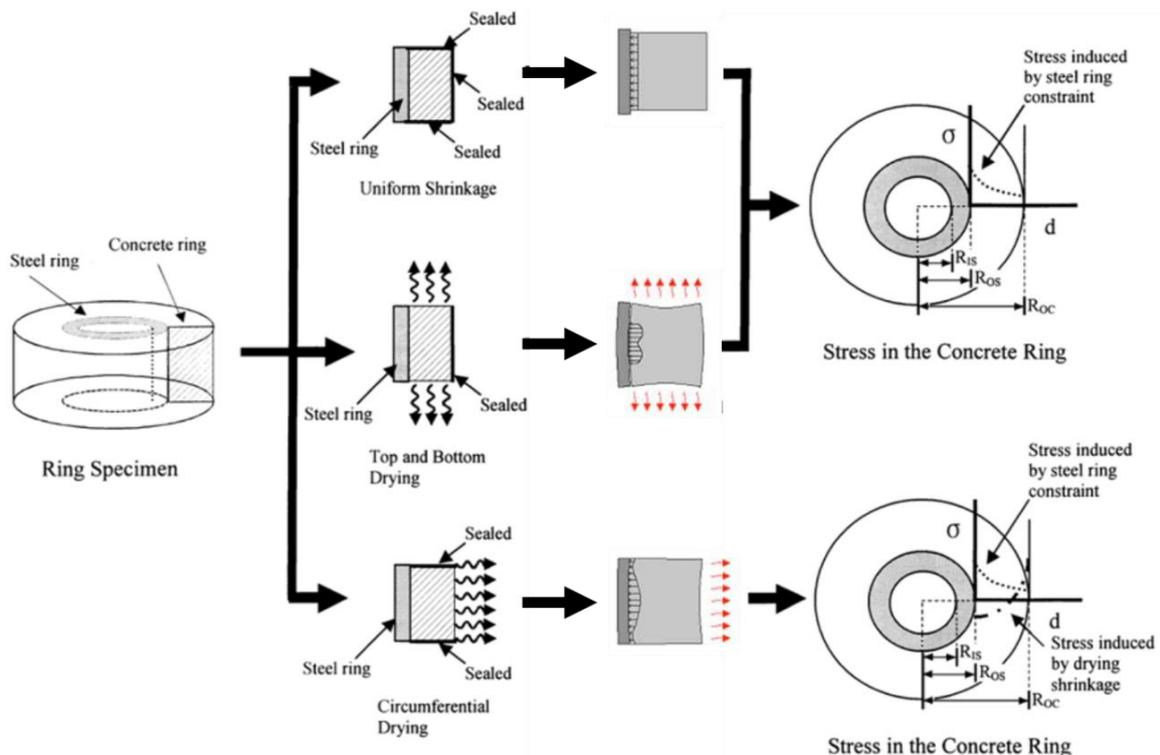


Figure 33: Distribution des contraintes résiduelles dans le Ring-Test en fonction de la direction de séchage [Moon, 2006a].

Le Ring-Test a été largement appliqué aux bétons dans la littérature, tandis que son application aux sols non saturés reste limitée. Abou Najm et al. [Abou Najm, 2009], Costa [Costa, 2010], Amarasiri et al. [Amarasiri, 2014] et Shannon et al. [Shannon, 2015] ont étendu l'application du Ring-Test pour les sols non saturés.

Abou Najm et al. [Abou Najm, 2009] ont étudié l'évolution des contraintes mécaniques dans les sols non saturés pendant la dessiccation. Une comparaison entre les contraintes mécaniques mesurées par le Ring-Test et celles calculées selon le modèle analytique de Van Genuchten (1980) basé sur les courbes de rétention d'eau dans le sol (voir paragraphe I.4.1.2 du Chapitre I) a montré une grande divergence (Figure 34). Par conséquent, ils ont constaté que la succion n'est pas le seul facteur contribuant à la contrainte interne du sol.

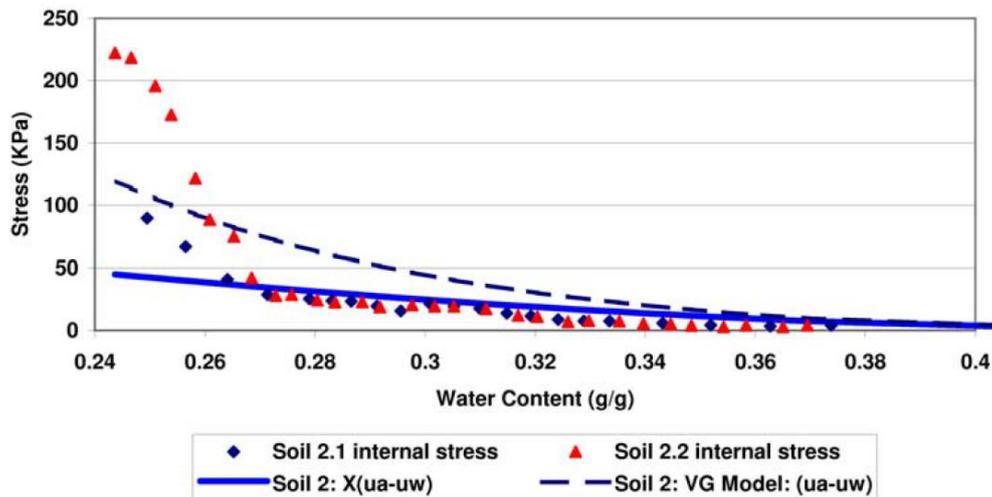


Figure 34: Comparaison entre les contraintes mécaniques mesurées par le Ring-Test et celles calculées selon le modèle de Van Genuchten (1980) [Abou Najm, 2009].

Costa [Costa, 2010] a présenté une méthodologie innovante permettant d'étudier la mécanique de la rupture dans les sols à partir de l'essai Ring-Test. La zone d'apparition de la première fissure a été sélectionnée pour calculer l'intégrale-J qui représente la variation de l'énergie potentielle due à la propagation de la fissure. L'analyse de l'énergie dans cette zone a été faite à partir du moment d'apparition de la première fissure et jusqu'à l'apparition de la deuxième, car l'interaction des fissures peut affecter les champs de déformation dans l'échantillon. Il a trouvé que la première fissure s'amorce pour une énergie de l'ordre de 0.7 J/m puis se propage avec une énergie de 0.5 J/m.

Amarasiri et al. [Amarasiri, 2014] ont comparé les résultats du Ring-Test dans les sols avec des modèles numériques basés sur la méthode des éléments discrets. Le modèle a été validé sur une argile de type kaolinite, puis comparé aux résultats de leurs essais et à d'autres provenant de la littérature. Ils ont conclu que le Ring-Test peut être une méthode intéressante pour caractériser la fissuration par dessiccation dans les sols. Shannon et al. [Shannon, 2015] ont étudié le comportement mécanique de quatre sols argileux ayant différents potentiels de retrait avec le Ring-Test. Ils ont trouvé que les résultats obtenus pour deux types de kaolin concordent relativement bien avec un modèle analytique élastique non linéaire proposé (Figure 35).

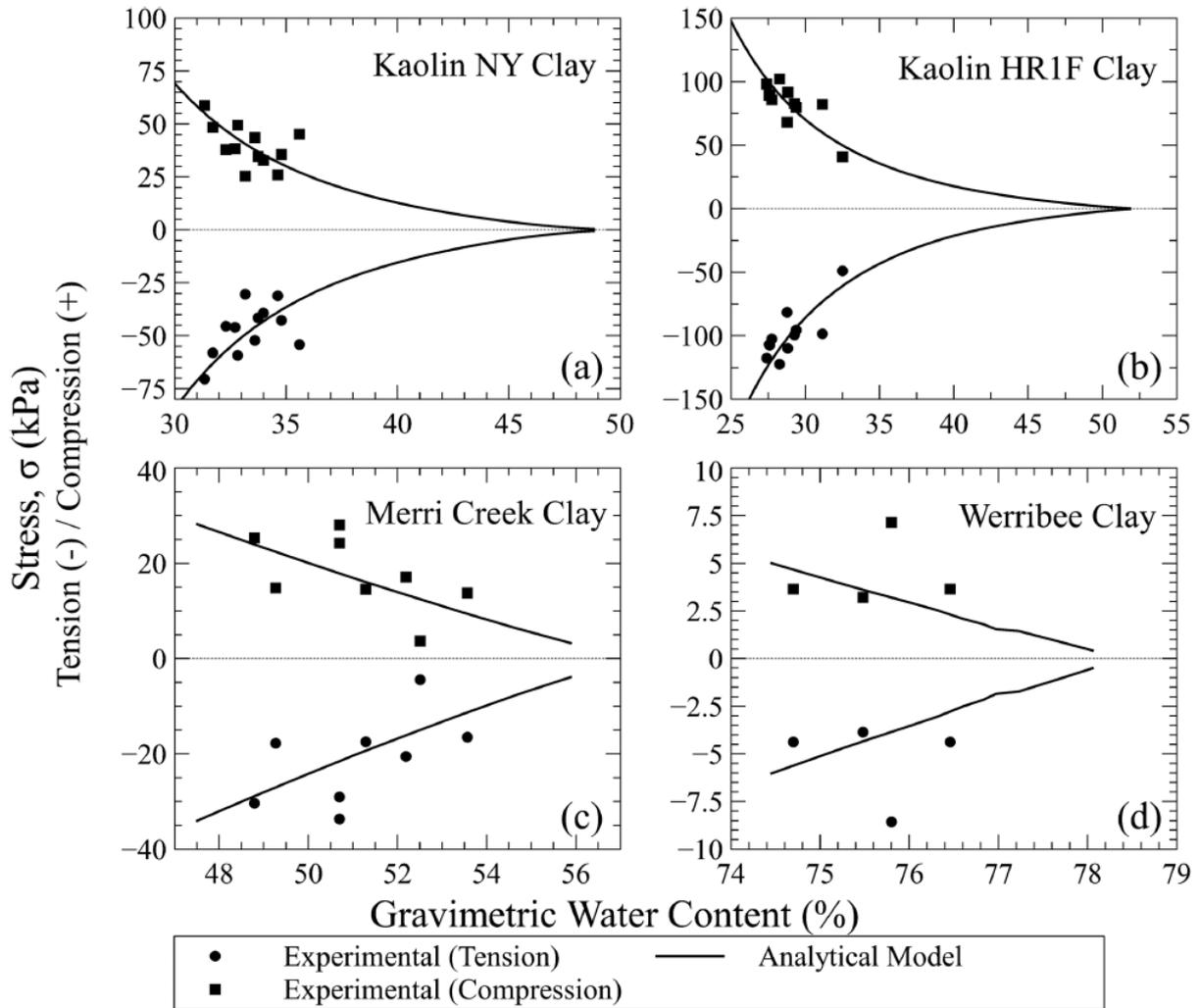


Figure 35: Comparaison entre les contraintes de traction (circonférentielles) et de compression (radiales) analytiques et expérimentales dans l'essai Ring-Test [Shannon, 2015].

II.1.3.2. Éprouvettes de traction compactes

La méthode des éprouvettes de traction compactes ('Compact Tension specimens' en anglais) consiste à réaliser un essai de traction sur une éprouvette entaillée et préfissurée au fond de l'entaille. Elle permet de créer une fissuration dans une zone précise d'une éprouvette et suivre la propagation de la fissure. Cette méthode, utilisée classiquement dans la mécanique de la rupture pour les matériaux métalliques, a été étendue par Avila [Avila, 2004] pour le cas des sols argileux (Figure 36) puis par Bompard [Bompard, 2010] pour le cas des Grès. La propagation de la fissure dans ces essais se fait en mode d'ouverture (mode I).

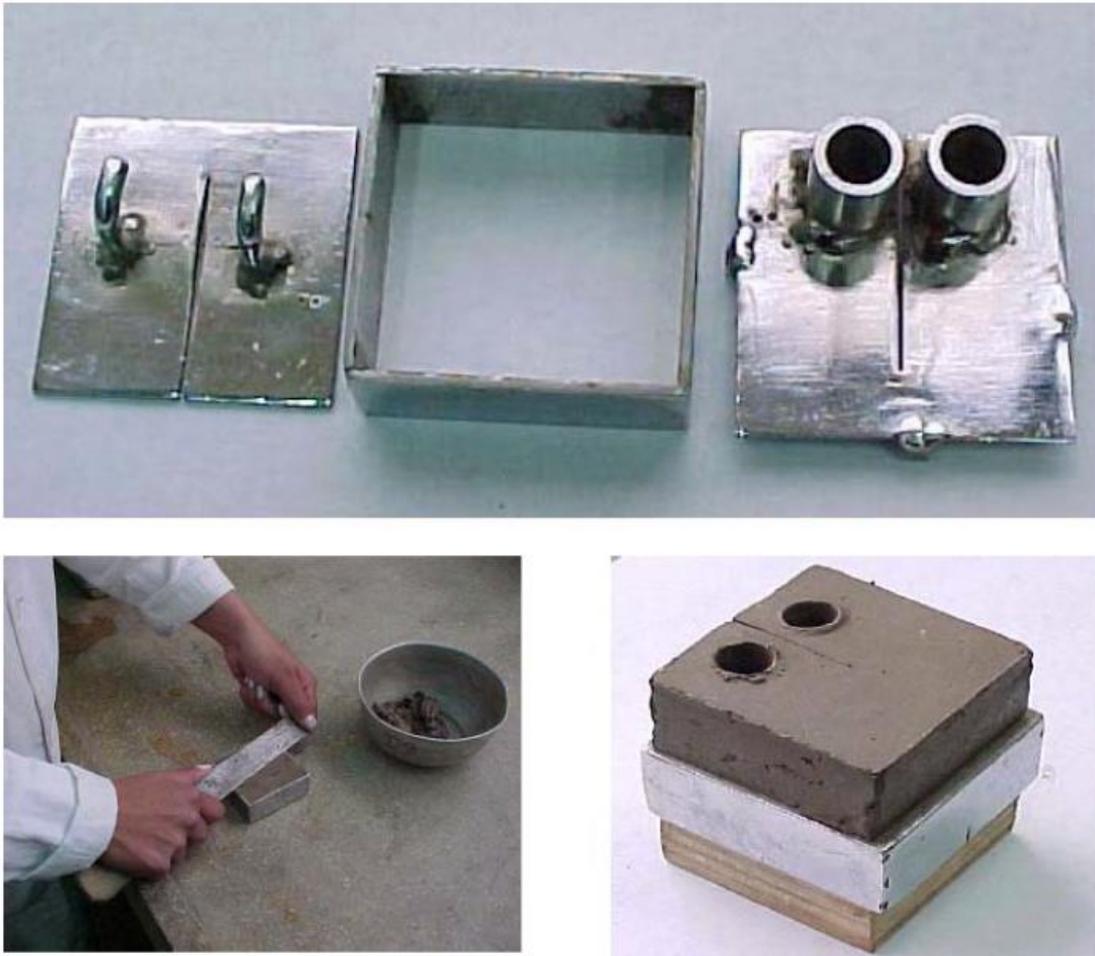


Figure 36: Eprouvette de traction compacte réalisée sur une argile [Avila, 2004].

II.1.3.3. Essai brésilien

L'essai brésilien (ou essai de fendage) est un essai de traction indirecte qui a été développé en parallèle par Carneiro [Carneiro, 1953] et Akazawa [Akazawa, 1953]. C'est un essai de compression diamétrale d'un échantillon cylindrique de dimensions normalisées sous une presse par des forces uniformément réparties le long des deux génératrices opposées. Il repose sur l'hypothèse d'une élasticité linéaire biaxiale. La rupture de l'échantillon est supposée au centre du disque, où la contrainte tangentielle dépasse la résistance à la traction uniaxiale sous l'application d'une contrainte de compression radiale [Fairhurst, 1964].

Il existe deux normes principales en mécanique des roches pour la mise en œuvre de l'essai brésilien [ISRM, 1978 ; ASTM, 1984]. Ces normes diffèrent à plusieurs égards en ce qui concerne les dimensions recommandées des échantillons et le taux de chargement, ainsi que la manière dont les plateaux de chargement entrent en contact avec la circonférence de l'échantillon (Figure 37).

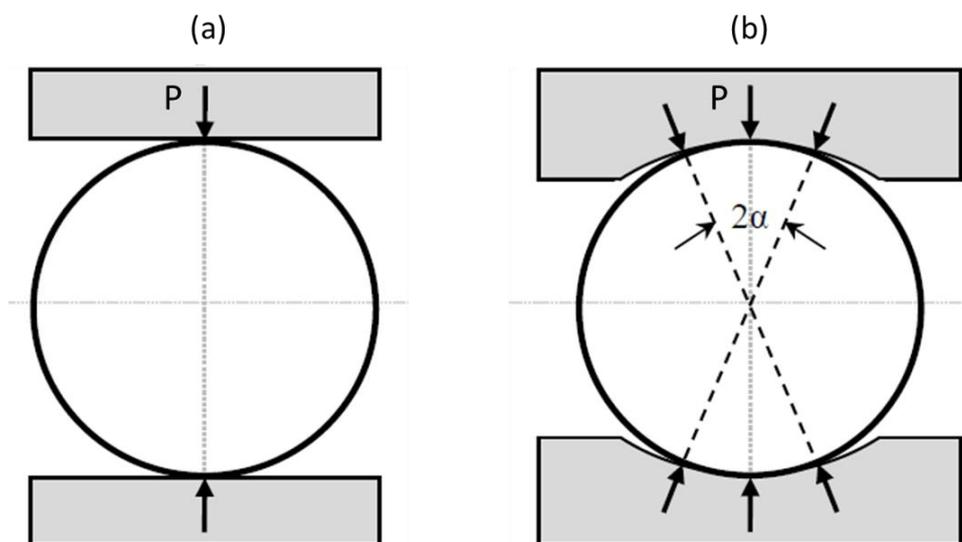


Figure 37: Méthodes de chargement dans l'essai brésilien (a) [ASTM, 1984] ; (b) [ISRM, 1978] ; d'après [Stirling, 2013].

La géométrie de l'essai brésilien est conçue pour éviter l'écrasement localisé de l'échantillon aux points de contact du chargement. Ce phénomène dépend essentiellement du type de matériau testé, les sols posant un problème particulier en cas de déformation indésirable de l'échantillon. Cependant, certaines études ont montré la possibilité d'étendre l'essai brésilien pour les cas des sols rigides.

Frydman [Frydman, 1964] a étudié la fiabilité de l'essai brésilien pour les sols présentant une déformation plastique importante. Il a montré en testant plusieurs types des sols que, dans la plupart des cas, la déformation résultante ne contredit pas la base théorique sur laquelle l'essai est fondé. Ainsi, il a proposé un seuil critique auquel la théorie standard ne s'appliquerait plus.

Plus tard, Krishnayya et Eisenstein [Krishnayya, 1974] ont examiné la condition de contrainte biaxiale au centre du disque de sol. Pour des matériaux fragiles, la différence entre les modules de compression et de traction est considérée comme négligeable ($E_c/E_t = 1$). Alors que pour des matériaux plus plastiques, le module en traction est considérablement plus faible qu'en compression ($2 < E_c/E_t < 15$). Dans ce cadre, ils ont réalisé une série d'essais de compression simple et des essais brésiliens sur des échantillons de Mica relativement rigides afin d'évaluer le comportement contrainte/déformation en compression et en traction. Ils ont constaté que lorsqu'il y a une différence marquée dans la relation contrainte/déformation du matériau en compression et en traction, une erreur est introduite dans la théorie du calcul classique de la résistance à la traction de l'échantillon. Ainsi, ils ont proposé une autre méthode de calcul par éléments finis de la contrainte de traction au centre de l'échantillon pour des différents rapports de modules E_c/E_t afin de permettre une estimation appropriée de la résistance à la traction.

Andrianatrehina [Andrianatrehina, 2016] a réalisé des essais brésiliens sur une marne compactée ayant une teneur en eau de 27 %. La Figure 38 montre les faciès de rupture des éprouvettes étudiées. On observe une légère inclinaison de ces faciès de rupture par rapport aux génératrices de l'éprouvette. Les contraintes maximales de traction mesurées lors de la rupture de ces deux échantillons sont respectivement 133 kPa et 136 kPa. Le faible écart entre ces deux valeurs met en évidence la reproductibilité de l'essai brésilien pour les sols compactés. D'autre part, la contrainte capillaire de cette marne estimée à partir de la succion correspondant à sa teneur en eau est de l'ordre de 140 kPa. Par conséquent, on peut constater que la succion est à l'origine des ruptures localisées par traction induisant l'apparition des fissures dans l'éprouvette.

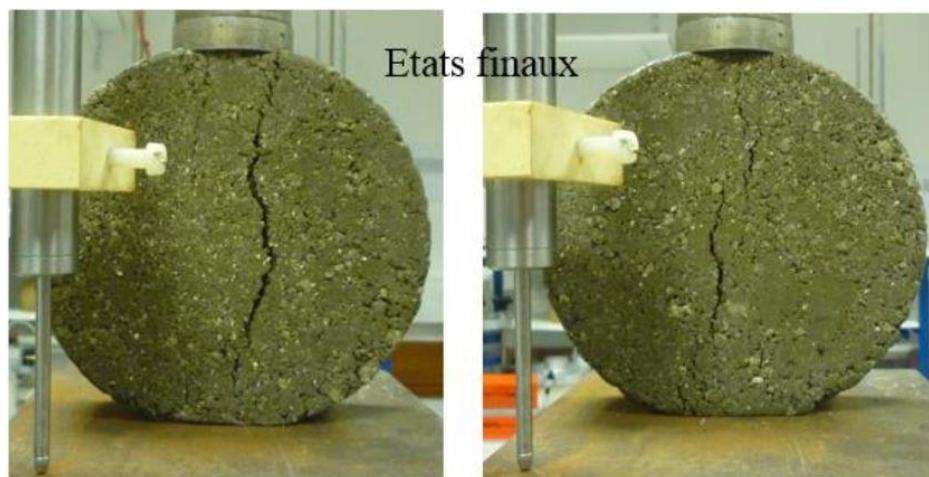


Figure 38: États finaux des éprouvettes de marnes durant l'essai brésilien [Andrianatrehina, 2016].

II.1.3.4. Essai de traction simple

Avila [Avila, 2004] et Wei [Wei, 2014] ont réalisé des essais de traction simple afin de mesurer la résistance à la traction dans les sols argileux. Ils ont développé un dispositif expérimental permettant d'avoir une mesure directe de la résistance à la traction du matériau. Ce dispositif consiste en un moule composé de deux compartiments triangulaires dans lesquels le sol sera placé (Figure 39(a)). Au cours de l'essai, ces deux compartiments, pilotés en force, seront tirés de côtés opposés tout en mesurant le déplacement à leur intersection à l'aide d'un capteur de déplacement (Figure 39(b)).

Wei [Wei, 2014] a étudié à l'aide de ce dispositif la résistance à la traction simple de trois sols argileux (kaolinite, montmorillonite, mélange de 35 % de montmorillonite et de 65 % de kaolinite) à différentes indices de liquidité (Figure 39(c)). L'indice de liquidité est utilisé pour évaluer la teneur en eau gravimétrique du sol par rapport à ses limites de liquidité et de

plasticité. A titre d'exemple, un indice de liquidité égal à 1 représente l'état hydrique du matériau lorsque sa teneur en eau est égale à sa limite de liquidité. A partir de ces essais, elle a trouvé que la contrainte maximale de traction (résistance à la traction) du matériau diminue lorsque son indice de liquidité augmente. De même, pour un indice de liquidité donné, la contrainte maximale de traction augmente lorsque le pourcentage de montmorillonite diminue. La contrainte maximale de traction des essais réalisés varie entre 2 et 14 kPa.

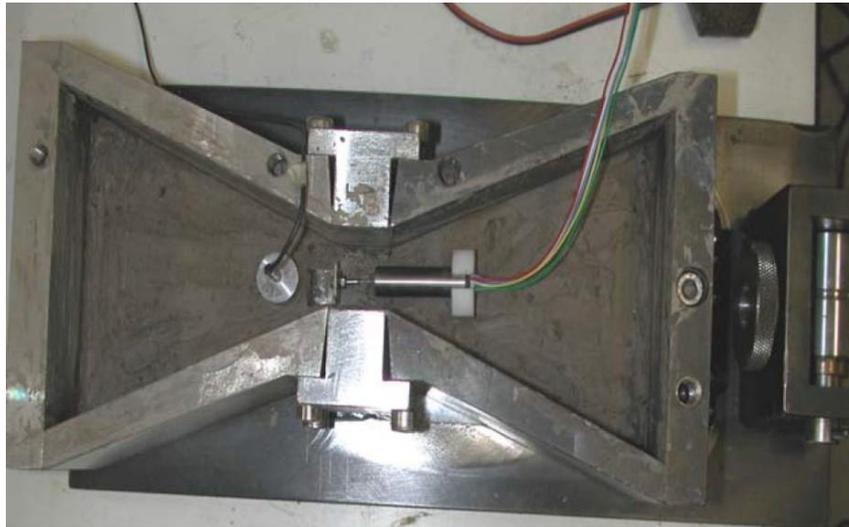


Figure 39(a) : Dispositif pour mesurer la résistance à la traction simple d'un sol [Avila, 2004].

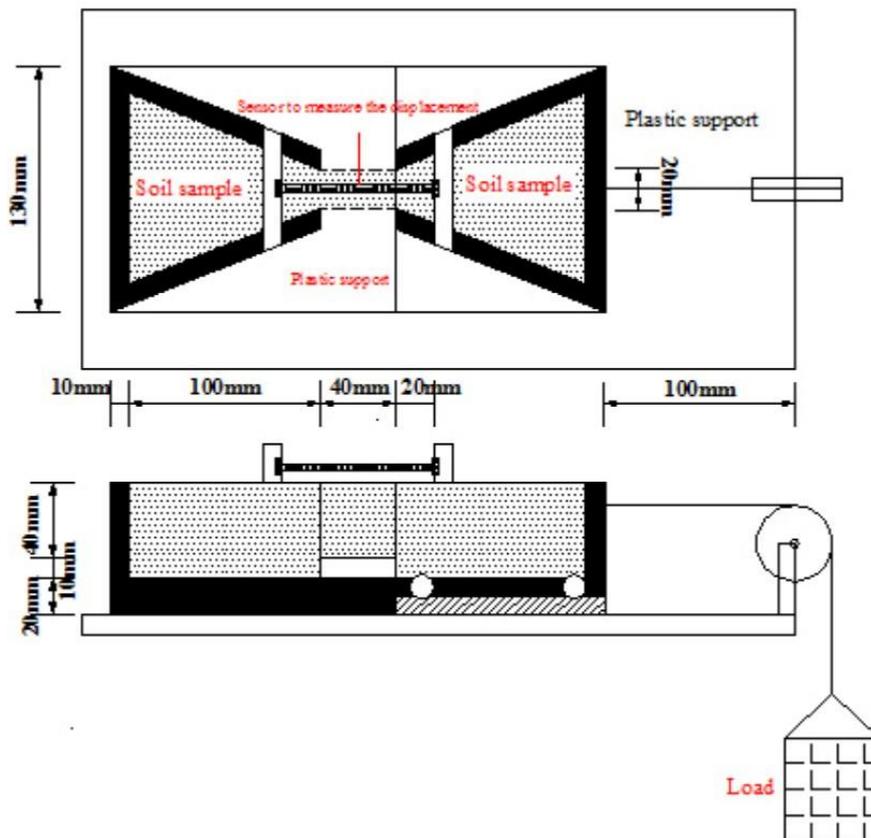


Figure 39(b) : Schéma de principe de l'essai de traction simple sur un sol [Wei, 2014].

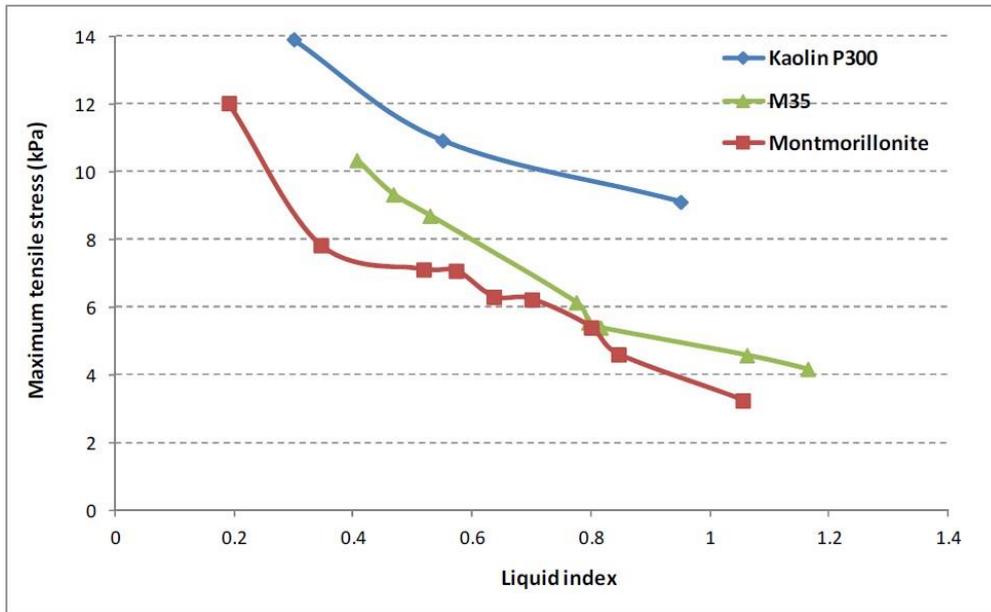


Figure 39(c) : Evolution de la contrainte maximale de traction en fonction de l'indice de liquidité du matériau [Wei, 2014].

II.2. Modélisation de la fissuration

Le principe de la modélisation consiste à expliquer les phénomènes naturels à l'aide d'équations mathématiques de manière systématique, logique et surtout généralisée. Des travaux considérables ont été consacrés dans la littérature à la compréhension et au développement de la modélisation analytique et numérique du phénomène de dessiccation et du processus de fissuration des sols.

II.2.1. Modélisation analytique

Plusieurs modèles analytiques ont été établis dans le but de prédire et de décrire la fissuration par dessiccation dans les sols. L'une des premières tentatives a été réalisée par Lachenbruch [Lachenbruch, 1961]. Ce modèle, qui intègre la théorie modifiée de Griffith par Irwin et Orowan [Irwin, 1948 ; Orowan, 1950], a été développé pour étudier le problème d'une fissure s'étendant à partir de la surface d'un milieu semi-fini soumis à une distribution uniforme ou linéaire des contraintes. La fissure s'amorce généralement à partir d'une surface fortement sollicitée et se propage vers l'intérieur du milieu où les contraintes de traction décroissent jusqu'à passer en compression. Le modèle de Lachenbruch propose également d'estimer l'espacement entre les fissures en tenant compte du champ théorique de relaxation des contraintes. Dans cette méthode, la longueur de la fissure était supposée être connue. Cependant, la simulation mathématique de la perturbation des contraintes autour d'une fissure est requise avant que ce modèle puisse être appliqué à des travaux pratiques.

Bronswijk [Bronswijk, 1988] a développé une méthodologie globale permettant de modéliser le comportement hydrique, la fissuration et le tassement des sols argileux. Ce travail a été amélioré par la suite en développant des relations théoriques entre le tassement vertical du sol et l'évolution de la teneur en eau lors de la dessiccation [Bronswijk, 1991]. Des équations ont été établies pour convertir le tassement vertical en retrait volumique tridimensionnel. Cependant, il est essentiel de connaître les dimensions de l'élément du sol qui subit le retrait. L'inconvénient de ce modèle est qu'il ne prend pas en compte l'effet des conditions aux limites lors du retrait de l'argile.

Morris et al. [Morris, 1992] ont traité le problème de la fissuration suivant trois différentes approches en développant des relations théoriques entre la profondeur des fissures, les propriétés du sol et la succion. Ils ont suggéré que la surface extérieure du sol est dominée par la succion pendant la dessiccation et ont supposé que cette succion régit le processus de retrait et de fissuration lors du séchage. Ces relations ont été établies en se basant sur les approches de l'élasticité linéaire, la mécanique linéaire élastique de la rupture (LEFM) et la relation entre la fissuration et la rupture par cisaillement.

Kodikara et Choi [Kodikara, 2006] ont présenté un modèle analytique simplifié pour expliquer la fissuration par dessiccation des argiles dans des essais en bande. Ce modèle permet de prédire les fissures séquentielles en se basant sur le concept de contrainte de traction maximale. La première fissure se produira au milieu de la bande et les fissures suivantes subdiviseront les blocs d'argile par la suite (Figure 17(b)). De même, ils ont démontré que la déformation de retrait libre présente une relation linéaire avec la diminution de la teneur en eau. Ils ont établi des relations empiriques permettant de représenter les propriétés physiques non linéaires de l'argile et de l'interface basale (conditions aux limites) qui portent une influence significative sur le phénomène de fissuration (Figure 40).

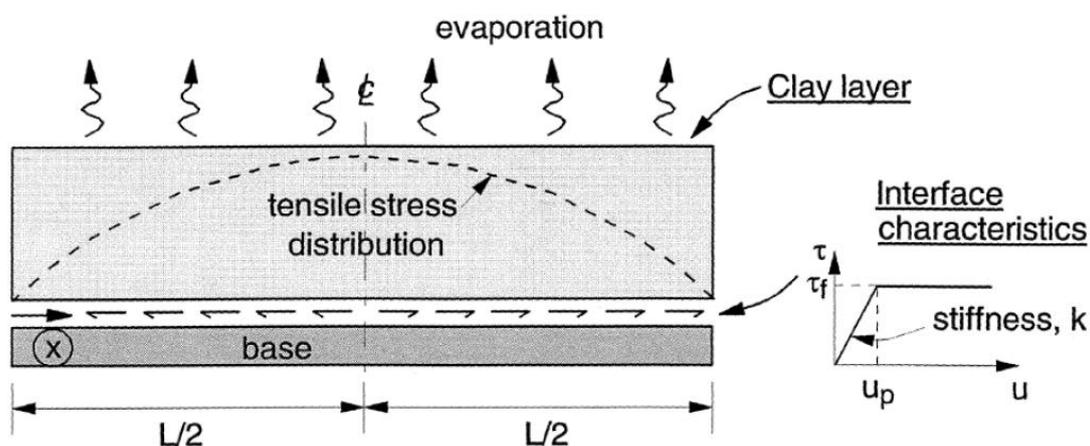


Figure 40: Représentation schématique du modèle proposé par Kodikara et Choi [Kodikara, 2006].

Plus tard, Costa et al. [Costa, 2018] ont proposé une analyse théorique de la formation de fissures de dessiccation dans un essai en bande en utilisant l'approche de relaxation des contraintes et l'approche du bilan énergétique pour la fissuration séquentielle et simultanée. Le modèle pourrait prédire le rapport approximatif entre l'espacement et la profondeur pour les fissures parallèles.

II.2.2. Modélisation numérique

Au cours des dernières décennies, la modélisation numérique de la fissuration des sols a connu un progrès important. Les méthodes numériques utilisées dans la modélisation des géomatériaux comprennent la méthode des éléments finis (FEM), la méthode des éléments de frontière (BEM), la méthode des différences finies (FDM) et la méthode des éléments discrets (DEM).

Lee et al. [Lee, 1982] ont proposé un modèle d'éléments finis de la propagation des fissures dans les sols fragiles en se basant sur l'approche de la LEFM. Ils ont constaté que le taux de libération de l'énergie critique reste constant au cours de la propagation des fissures de dessiccation. L'initiation des fissures est basée sur le critère de la résistance maximale à la traction. Pour la propagation de la fissure, le modèle a disposé des nœuds autour de la fissure existante et la direction de la propagation a été déterminée par le nœud où la contrainte circonférentielle de traction maximale a été calculée. Lee et al. [Lee, 1988] ont utilisé ce modèle pour résoudre les problématiques d'un remblai rigide sur un sol souterrain molle et d'une pente en déblai. Le modèle proposé était en accord avec l'observation expérimentale obtenue, justifiant ainsi l'utilisation de l'approche LEFM dans la fissuration du sol.

Abu-Hejleh et Znidarcic [Abu-Hejleh, 1995] ont présenté une théorie de la dessiccation des sols fins et mous. Le modèle comprend quatre séquences consécutives qui correspondent chronologiquement aux phases que subit une couche de sol mou sur le terrain après son dépôt: consolidation sous compression unidimensionnelle, dessiccation sous retrait unidimensionnel, propagation des fissures verticales et libération des contraintes de traction, et dessiccation sous retrait tridimensionnel. La contrainte totale induite par une condition de déformation latérale nulle pendant le retrait est liée à la succion et au cheminement de la contrainte effective pendant la consolidation. La fissuration se produit lorsque la contrainte totale en un point quelconque est égale à la résistance à la traction du matériau. Les principes du LEFM n'ont pas été pris en compte dans ce modèle. Par conséquent, le modèle ne permet pas de prédire l'espacement des fissures au début de la fissuration.

Le courbage est un motif de déformation fréquent lors de la dessiccation des argiles. Deux types de courbure sont souvent observés : le décollage des bords et le décollage du milieu de l'échantillon. Kodikara et al. [Kodikara, 2004] ont modélisé les déformations de courbage et le retrait dans de fines couches d'argile pendant la dessiccation. Leur approche a produit une simulation similaire aux observations des expériences de laboratoire. De plus, ils ont fourni une explication théorique des déformations de courbage en utilisant la théorie des sols non saturés.

II.3. Quelques procédés de réduction de la fissuration par dessiccation

Les sols fins se caractérisent par des propriétés mécaniques relativement faibles favorisant l'endommagement de leur structure et l'apparition des fissures, une fois confrontés à des sollicitations importantes. Dans ce cadre, plusieurs études ont tenté d'élaborer des procédés préventifs et curatifs afin de contrecarrer le problème de fissuration et minimiser son effet. Ces procédés peuvent agir au niveau mécanique ou physico-chimique du sol, en améliorant sa résistance à la traction, à la compression et au cisaillement.

II.3.1. Renfort à l'aide de fibres végétales et synthétiques

Le renfort à l'aide de fibres végétales et synthétiques a été largement étudié dans la littérature, dans le but de minimiser le retrait et la fissuration des sols fins argileux. Les fibres peuvent être incorporées dans le sol de manière aléatoire ou selon des directions privilégiées au préalable. Ces fibres, présentant un comportement ductile et une bonne résistance à la traction, permettent d'améliorer la résistance mécanique du sol [Hejazi, 2012].

Viswanadham et al. [Viswanadham, 2010] ont rapporté une influence significative des fibres de polypropylène sur le retardement de la formation de fissures dans les barrières d'argile. Ils ont montré également qu'en augmentant la longueur des fibres, on observe un retard conséquent dans l'amorce des fissures.

Divya et al. [Divya, 2014] ont évalué l'effet de la teneur en fibres et de la longueur des fibres sur les déformations d'extension et la formation de fissures, dans un sol limoneux naturel renforcé par des fibres de polyester. Ils ont constaté que les sols renforcés par des fibres sont capables de supporter une plus grande déformation et, par conséquent, des contraintes plus élevées lors de la rupture. Ils ont également trouvé que des fibres plus longues (60 % de la longueur de l'échantillon) offrent une meilleure résistance à la traction et une plus grande rigidité au sol.

Chebbi et al. [Chebbi, 2020] ont comparé le comportement mécanique d'un sol argileux renforcé avec des fibres végétales (fibres de Sisal et fibres d'Alfa) avec un autre renforcé avec des fibres de nylon. Ils ont observé que les fibres végétales semblent être plus efficaces que les fibres de nylon pour améliorer la résistance à la traction des sols argileux (Figure 41). Ceci peut être attribué à la meilleure adhérence interfaciale des fibres naturelles avec le sol renforcé, probablement due à leur rugosité plus importante par rapport à la fibre de nylon qui possède une surface plus lisse.

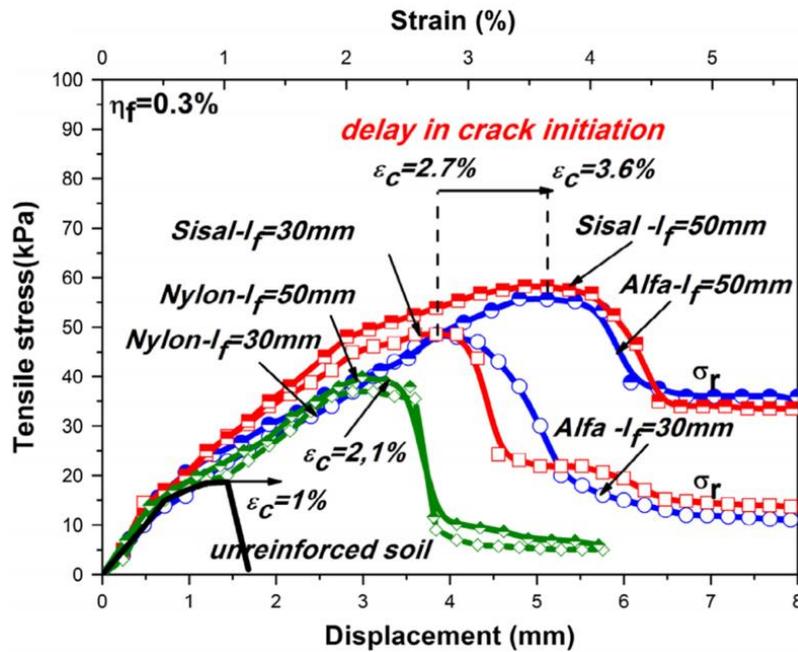


Figure 41: Comportement mécanique des sols renforcés et non renforcés lors d'un essai de traction directe [Chebbi, 2020].

Anggraini et al. [Anggrainin, 2015] ont constaté que les fibres de coco permettent de limiter l'ouverture et la propagation des fissures et, par conséquent, d'éviter la rupture complète des échantillons. Ils ont suggéré que les fibres de coco pourraient être considérées comme un bon matériau de renforcement de la terre crue, apportant une amélioration significative à ses propriétés mécaniques.

Segetin et al. [Segetin, 2007] ont montré que l'inclusion des fibres de lin dans un mélange sol-ciment permet d'améliorer sa ductilité. Ils ont recommandé une longueur de fibre de 85 mm et une teneur en masse de fibres de 0,6 % pour le renfort par fibres de lin. Eid et al. [Eid, 2015] ont étudié le renfort par fibres de lin d'un limon naturel destiné à la préparation d'un béton de terre. Ils ont analysé le séchage de différentes formulations d'un limon naturel avec et sans renforcement en lin. Leurs résultats montrent que l'ajout de renforts au limon naturel réduit la densité de fissuration (Crack ratio) d'un facteur d'environ 10 (Figure 42).

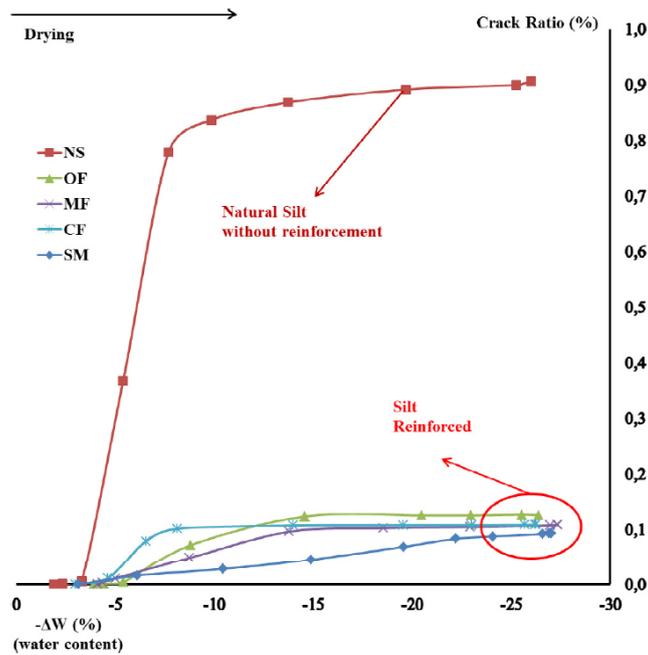


Figure 42: Evolution du Crack Ratio lors de la dessiccation des limons avec et sans renforcement en fibres de lin [Eid, 2015].

II.3.2. Traitement à l'aide d'adjuvants

Dans les bétons ordinaires, le traitement à l'aide d'adjuvants sert à faciliter la mise en œuvre sur chantier, en augmentant la maniabilité du béton d'une part et en accélérant ou retardant la prise d'autre part. Dans ce cadre, certaines études ont reproduit l'utilisation de certains adjuvants du béton à la terre crue, dans le but de réduire le phénomène de retrait dans les argiles entraînant la formation des fissures. A titre d'exemple, le superplastifiant permet d'apporter des charges négatives autour des grains, provoquant une augmentation de la maniabilité du matériau et une réduction de la quantité d'eau de gâchage nécessaire à la mise en œuvre de la terre coulée.

Kanema et al. [Kanema, 2016] ont étudié l'influence du traitement avec un superplastifiant Sika « Tempo 10 » d'un limon naturel traité à la chaux. Ils ont constaté que l'ajout du superplastifiant réduit la densité de fissuration (Crack Ratio) dans le matériau d'un rapport de 2.5. Cependant, cet adjuvant n'a pas montré une influence significative sur le retrait global et la porosité moyenne du matériau.

II.3.3. Traitement à l'aide de la bio-calcification

La précipitation de calcite induite par les microbes (MICP, 'Microbial induced calcite precipitation' en anglais) est un processus biologique naturel, utilisé comme une solution écologique de stabilisation des sols. Ce processus est le résultat d'une combinaison de réactions physiques, chimiques et biologiques [Baveye, 1989]. Les bactéries présentes dans le sol sont stimulées par l'injection d'une solution nutritive appropriée. Les bactéries produisent des

exopolymères (polysaccharides, protéines, lipides, acides nucléiques...) qui contribuent à la cimentation du sol, à la réduction de la porosité et à la diminution de la perméabilité.

Il existe trois phases dans la bio-calcification : la première phase consiste en l'apparition des biofilms recouvrant la surface des grains. La deuxième phase est la croissance des micro-organismes et le développement de micro-colonies. La troisième phase est la formation d'une biomasse apparente au niveau macroscopique [Seifert, 2007].

La bio-calcification des sols rapportée dans la littérature concerne essentiellement les sols sableux. La technique couramment utilisée consiste en l'injection de bactéries uréolytiques et de réactifs tel que l'urée et l'ion Ca^{2+} , permettant à la bioactivité de précipiter le carbonate de calcium [Al Qabany, 2012]. Cette technique a été utilisée pour améliorer les propriétés mécaniques du sol grâce à des processus métaboliques microbiens.

Récemment, l'entreprise Soletanche Bachy a développé un projet intitulé « Biocalcis » permettant de traiter les sols à l'aide de la bio-calcification [Filet, 2012]. Ce projet est particulièrement intéressant pour la prévention des risques sismiques, en augmentant la cohésion des sables à grains fins. Plusieurs autres applications peuvent également être envisagées, par exemple la stabilisation de digues, de remblais de chemin de fer, etc. Le projet « Biocalcis » utilise une technique innovante appelée « Injection par perméation », qui consiste à injecter des bactéries qui produisent par un processus biologique des ponts calcifiés entre les grains du sol (Figure 43). Les principaux avantages de cette technique sont l'absence de changements significatifs de la perméabilité du sol après le traitement, ainsi que la possibilité d'injecter les bactéries à des profondeurs impossibles à atteindre avec les solutions traditionnelles.

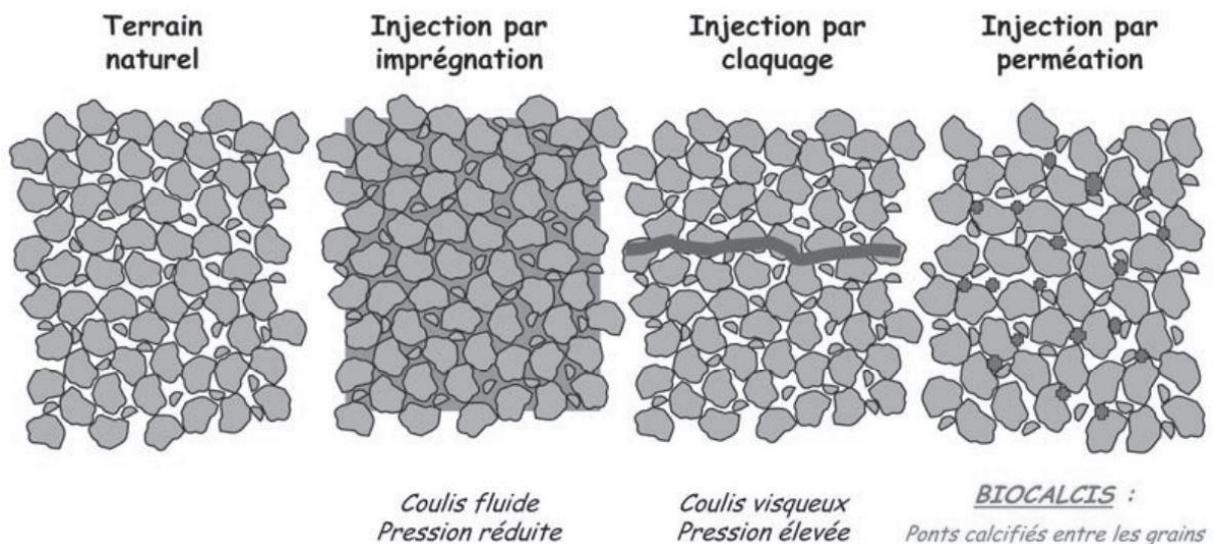


Figure 43: Les différents types d'injections des bactéries dans le sol [Filet, 2012].

Concernant l'application de la MICP dans les sols argileux, le procédé reste peu étudié du fait de la présence de pores microscopiques dans les particules des sols argileux qui limitent le libre passage des bactéries.

Une étude plus récente a tenté d'examiner le potentiel de l'utilisation de la MICP comme solution curative pour remédier aux fissures de dessiccation dans les sols argileux. Liu et al. [Liu, 2020] ont réalisé une série d'essais de dessiccation en laboratoire sur des échantillons d'argiles pulvérisés avec quatre différents fluides, tels que l'eau, une solution bactérienne, une solution de cimentation, et à la fois une solution bactérienne et une solution de cimentation (MICP). En comparant l'effet des différentes solutions lors de cycles d'imbibition et de dessiccation, les échantillons traités avec la MICP ont montré la plus faible densité de fissuration. La solution bactérienne et la solution de cimentation présentent des effets intermédiaires tandis que l'eau a des effets mineurs sur la remédiation des fissures du sol. Ceci montre que les cristaux de calcaire produits à partir de la MICP améliorent la résistance du sol et réduisent le potentiel de fissuration par dessiccation dans les sols argileux. Cette réduction est due au processus de colmatage de la MICP des fissures de dessiccation (Figure 44).

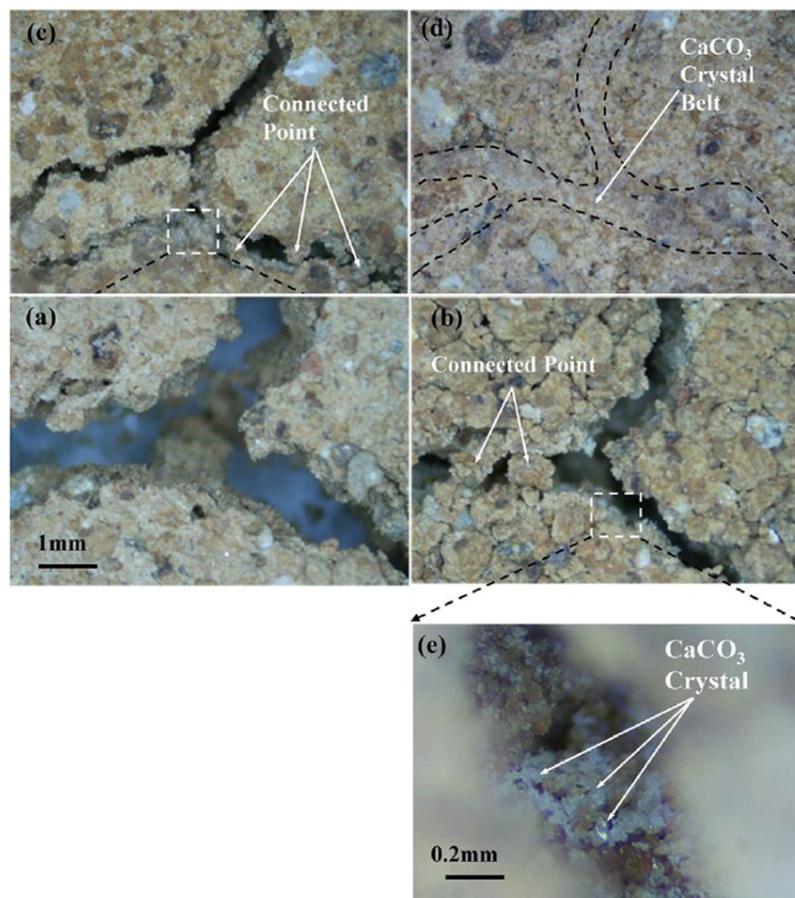


Figure 44: Microphotographies d'un nœud d'intersection de fissures d'un échantillon traité à la MICP : (a) après le traitement préliminaire ; (b) après le premier cycle de traitement ; (c) après le troisième cycle ; (d) après le cinquième cycle ; (e) cristaux de CaCO_3 sur les lèvres de la fissure [Liu, 2020].

II.3.4. Amendement à l'aide d'une fraction granulaire de sable

Les mélanges argile/sable permettent d'avoir une résistance mécanique relativement élevée, une faible compressibilité, ainsi qu'une conductivité hydraulique très faible. En effet, la fraction granulaire sert à assurer la stabilité du mélange tandis que l'argile forme une matrice cohésive qui a pour but de combler les vides entre les particules de sable [Kenney, 1977].

Dixon et al. [Dixon, 1985] ont étudié l'effet de l'amendement d'une bentonite avec une fraction granulaire. Ils ont montré qu'un pourcentage de sable inférieur à 50 % n'affecte pas le potentiel de gonflement de la bentonite. En outre, le retrait des mélanges compactés lors du séchage est réduit à des niveaux négligeables lorsque 50 % ou plus de sable est mélangé avec l'argile. Tay et al. [Tay, 2001] ont constaté que l'augmentation du pourcentage de sable dans un mélange bentonite/sable réduit le retrait volumique global lors de la dessiccation, ce qui résulte en une diminution de la densité de fissuration du matériau.

Vallejo et Mawby [Vallejo, 2000] ont réalisé des essais de cisaillement simple sur différents mélanges secs de sable et d'argile. Ils ont trouvé que lorsque le pourcentage massique de sable est inférieur à 40 %, la résistance au cisaillement du mélange est entièrement régie par la résistance de l'argile. Pour un pourcentage de sable variant entre 40 et 75 %, la résistance au cisaillement du mélange était assurée en partie par la résistance au cisaillement de l'argile et en partie par l'angle de frottement entre les grains de sable. Lorsque le pourcentage de sable est supérieur à 75 %, la résistance au cisaillement du mélange est principalement régie par l'angle de frottement entre les grains de sable. De même, ils ont rapporté que la porosité des mélanges dépend de la concentration fractionnaire des particules de sable et d'argile. La porosité des mélanges s'est avérée inférieure aux porosités des deux composants, le sable et l'argile. Par conséquent, on peut constater que l'amendement de l'argile avec un pourcentage massique de sable variant entre 40 et 75 % permet d'améliorer la résistance mécanique du mélange et de réduire sa porosité, ce qui peut éventuellement réduire le risque de fissuration du matériau et sa densité de retrait global lors de la dessiccation.

Synthèse et conclusion de l'état de l'art

Les sols argileux présentent un potentiel important de changement de volume lors des chemins imbibition/dessiccation dû à leur constitution minéralogique, leur composition chimique, ainsi que leur organisation texturale. Au niveau microscopique, la surface négative des minéraux argileux permet d'attirer les molécules d'eau grâce à ses dipôles positifs, entraînant un changement dans les propriétés hydrodynamiques de l'eau. Ce changement implique le développement de différents types d'interactions entre l'eau et la matrice argileuse. Au niveau macroscopique, la capillarité attribuée aux interactions entre les ménisques air-eau et les particules d'argiles induit l'apparition d'une dépression interne dans l'eau capillaire lors de la dessiccation. Cette dépression, connue par la succion, génère des déformations de retrait qui peuvent provoquer la fissuration du matériau une fois que les contraintes générées dépassent la résistance à la rupture du sol. Ensuite, la concentration des contraintes en bout de la fissure entraîne sa propagation par extension (dans le plan) et en profondeur.

Plusieurs travaux dans la littérature se sont intéressés à la caractérisation de la fissuration par dessiccation dans les matériaux argileux. Différentes techniques expérimentales ont étudié l'évolution des déformations de retrait dans le sol pendant le processus de séchage, afin de mettre en évidence les conditions qui conduisent à l'apparition de fissures et à leur propagation dans le matériau. Généralement, ces techniques sont basées soit sur l'étude du champ de déformation et de fissuration par imagerie, soit sur la mesure de l'état de contrainte aux limites lors d'un retrait empêché par exemple, pour remonter, à l'aide de modèles MMC à l'état de contrainte au cœur du matériau. De même, des modèles analytiques et numériques ont été établis dans le but de prédire et de décrire la fissuration par dessiccation dans les sols. L'objectif étant de comprendre les mécanismes qui sont à l'origine du phénomène de fissuration, pour tenter soit de les prévenir, soit de les minimiser.

Dans ce travail de thèse, on se propose de combiner des techniques d'imagerie et de mesure de la succion pour relier expérimentalement l'état de déformation à l'état de contrainte tout au long du processus de dessiccation des sols fins. Dans ce sens, un nouveau dispositif expérimental, appelé DIC-CRT, a été élaborée [El Hajjar, 2020]. Ce dispositif vise à combiner les deux techniques expérimentales de corrélation d'images numériques (DIC) et de l'essai à l'anneau dans les argiles (CRT), afin d'évaluer les déformations et les contraintes qui se développent au sein du matériau lors de la dessiccation. De plus, le dispositif développé est équipé de

tensiomètres permettant des mesures directes de la succion pendant le séchage. Les relations entre la courbe de rétention d'eau du sol (SWRC) et la déformation de retrait sont mises en évidence. Des définitions des paramètres pertinents pour quantifier l'intensité des fissures dans les matériaux sont proposées. Un traitement mécanique préventif de la fissuration avec des fibres végétales est également proposé.

Partie -B-

Etude de la fissuration :

Retrait libre et empêché

SOMMAIRE DE LA PARTIE -B-

Chapitre III : Retrait et fissuration des argiles sous retrait libre.....	75
III.1. Matériaux et méthodes	75
III.1.1. Matériaux.....	75
III.1.1.1. Kaolinite.....	75
III.1.1.2. Montmorillonite.....	77
III.1.2. Dispositif expérimental.....	81
III.1.3. Technique DIC (Digital Image Correlation).....	82
III.1.3.1. Paramètres de la technique DIC.....	84
III.1.3.2. Calibration de la technique DIC.....	87
III.1.4. Conditions aux limites	89
III.2. Essais préliminaires	90
III.2.1. Mise en œuvre.....	90
III.2.2. Cinétique de dessiccation.....	91
III.2.3. Analyse préliminaire de l'effet des supports.....	92
III.2.4. Effet de l'aspect moucheté.....	94
III.3. Effet des conditions aux limites.....	96
III.3.1. Cinétique de dessiccation.....	97
III.3.2. Analyse de la fissuration.....	98
III.3.3. Analyse du champ de déformation pré-fissuration	103
III.3.3.1. Cas de la kaolinite.....	103
III.3.3.2. Cas de la montmorillonite.....	107
III.3.3.2.1. Base rugueuse	107
III.3.3.2.2. Base lisse.....	110
III.3.4. Stéréo-corrélation (3D).....	115
III.4. Conclusion	116
Chapitre IV : Retrait empêché : Essai à l'anneau ASTM.....	119
IV.1. Matériaux et méthodes.....	119
IV.1.1. Matériaux.....	119
IV.1.2. Méthodes	120
IV.1.2.1. Essai à l'anneau : Dispositif Ring-Test ASTM C1581	120
IV.1.2.2. Interprétation de l'essai : Modèle analytique	121
IV.2. Programme expérimental et mise en œuvre.....	123
IV.2.1. Mortier de ciment	123
IV.2.2. Kaolinite P300.....	124
IV.2.3. Mélanges sable-kaolinite P300.....	124
IV.3. Résultats et discussions	125

IV.3.1. Mortier de ciment	125
IV.3.1.1. Retrait empêché	125
IV.3.1.2. Essais mécaniques	128
IV.3.2. Kaolinite P300	130
IV.3.2.1. Dessiccation et déformations de retrait	130
IV.3.2.2. Initiation et propagation de la fissuration	133
IV.3.2.3. Répartition de la teneur en eau finale	134
IV.3.3. Mélanges Sable-Kaolinite P300	135
IV.4. Conclusion	139

Chapitre III : Retrait et fissuration des argiles sous retrait libre

Dans ce chapitre, nous présentons des essais de dessiccation libre réalisés sur deux argiles initialement saturées afin d'identifier la cinétique de déformation aboutissant à la fissuration du matériau. L'analyse du champ de déformation dans le massif est effectuée à l'aide d'un système de corrélation d'images numériques (DIC) bi/tridimensionnel. La morphologie des fissures est suivie dès l'apparition de la première discontinuité et jusqu'à la dessiccation complète. L'objectif de cette étude expérimentale étant de mettre en évidence les effets des conditions aux limites imposées et des caractéristiques intrinsèques du matériau sur le phénomène du retrait et de la fissuration dans les sols argileux saturés sous sollicitation hydrique.

III.1. Matériaux et méthodes

III.1.1. Matériaux

Les matériaux utilisés sont d'une part une kaolinite et d'autre part une montmorillonite calcique grecque, fournies sous forme de poudre déshydratée. Leurs caractéristiques géotechniques sont présentées dans le Tableau 2.

Caractéristique	Symbole	Montmorillonite	Kaolinite
Granulométrie	< 80 μm (%)	100	100
	< 2 μm (%)	40	60
	d_{50} (μm)	4	1.5
Plasticité	w_L (%)	170	40
	w_P (%)	60	21
	I_p (%)	110	19
Densité des grains	G_s (g/cm^3)	2.73	2.65

Tableau 2: Caractéristiques géotechniques de la montmorillonite grecque et de la kaolinite jaune [Fleureau, 1993].

III.1.1.1. Kaolinite

La kaolinite de couleur jaune, désignée sous le nom de kaolinite P300, est une argile commercialisée par Dousselin à Fontaines-sur-Saône (Auvergne-Rhône-Alpes, France). Nous avons réalisé une analyse par diffraction des rayons X (DRX) de cette argile afin d'étudier sa constitution minéralogique. Cette analyse est réalisée à l'aide d'un diffractomètre de modèle « PANalytical X'Pert PRO MPD », équipé d'un générateur de rayons X, sous une tension de 40 kV et une intensité de 40 mA. Sa source est une anode en Cobalt de longueur d'onde 1.79 Å. L'enregistrement des données est fait par des pas de 0.013°. L'analyse DRX en lame orientée

séchée à l'air montre que cette argile contient en plus de la kaolinite (raies à 7.15 et 3.58 Å), de l'illite (raies à 10, 5 et 3.34 Å) et du quartz (raies à 4.26 et 3.34 Å) (Figure 45). De même, ce diffractogramme reste intact après traitement de l'argile à l'éthylène glycol. Les raies à (001) de la kaolinite et de l'illite correspondent à la distance inter-réticulaire de ces deux minéraux argileux (voir Figure 4(a)). La capacité d'échange cationique CEC de cette kaolinite est de 15 meq/(100 g) déterminée par l'adsorption de bleu de méthylène et sa surface spécifique est de 32 m²/g [Beddiar, 2005].

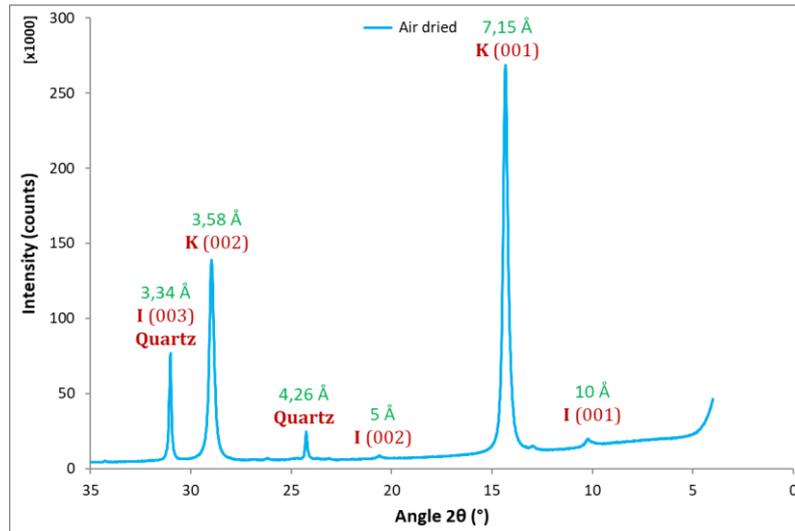


Figure 45: Diffractogramme de la kaolinite P300 ; K: kaolinite et I: illite.

L'observation au microscope électronique à balayage (MEB) de la kaolinite P300 (Figure 46) montre qu'elle est formée principalement de plaquettes rigides hexagonales de kaolinite, avec une présence éventuelle de traces d'illite et de quartz [Hammad, 2010]. Les courbes de rétention de cette argile sont présentées dans le paragraphe I.4.2.2. du Chapitre I (voir Figure 16).

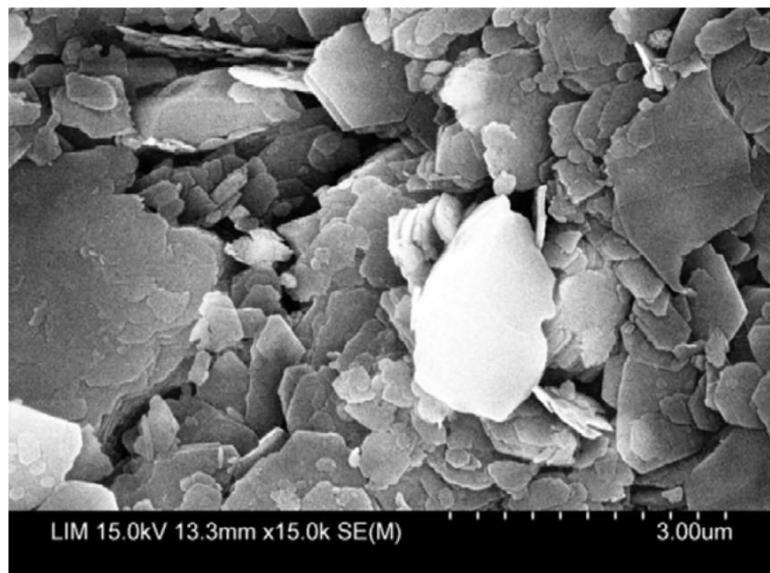


Figure 46: Observation au MEB de la kaolinite P300 [Hammad, 2010].

La distribution granulométrique de la kaolinite P300 est étudiée par granulométrie laser et par granulométrie au microscope optique [Hammad, 2010]. Ces deux analyses montrent que la fraction fine de cette argile est constituée de près de 83 % de particules dont la taille est inférieure à 2 μm , alors que 100 % de particules ont une taille inférieure à 80 μm (Figure 47). Le processus d'identification granulométrique des matériaux à l'aide du microscope optique est présenté dans les Figures A1.1 et A1.2 de l'Annexe 1.

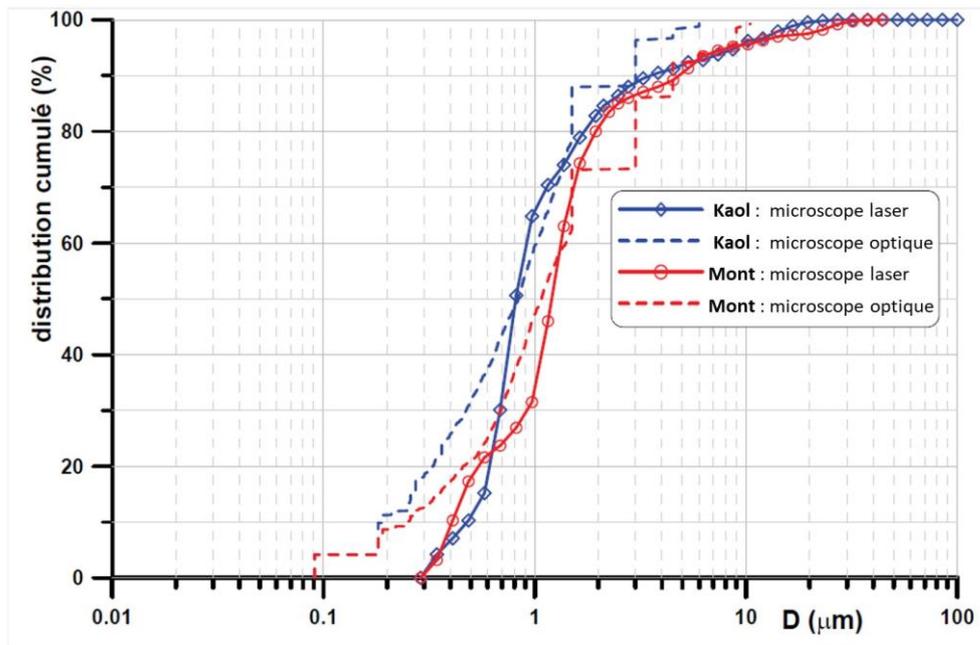


Figure 47: Courbes granulométriques de la kaolinite P300 et de la montmorillonite grecque [Hammad, 2010].

III.1.1.2. Montmorillonite

La montmorillonite grecque est une argile provenant de l'île de Milos dans la mer Egée et commercialisée par Sobrep à Courbevoie (Hauts-de-Seine, France). L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) en lame orientée séchée à l'air de cette argile montre qu'il s'agit d'une smectite (raies de S(001) jusqu'à S(005)) (Figure 48). La raie de 15 Å à (001) correspond à la distance inter-réticulaire d'une smectite calcique (voir Figure 4(b) et paragraphe I.1.5.2. du Chapitre I). De même, la raie de 1.5 Å à (060) indique le caractère dioctaédrique de cette smectite. Le gonflement de la raie S(001) jusqu'à 17 Å lors du traitement de la smectite avec de l'éthylène glycol, puis son effondrement à 10 Å lors d'un échauffement thermique à 400 °C, montre qu'il s'agit d'une montmorillonite. Par ailleurs, une analyse par spectroscopie infrarouge a été effectuée pour cette argile au laboratoire MSSMAT de l'École Centrale Paris (Figure 49) [Souli, 2004]. Le spectre infrarouge montre une bande de vibration de Al_2OH à 915 cm^{-1} confirmant le caractère dioctaédrique de la montmorillonite. De même, l'épaule à 3220 cm^{-1} dans ce spectre indique qu'il s'agit d'une smectite calcique.

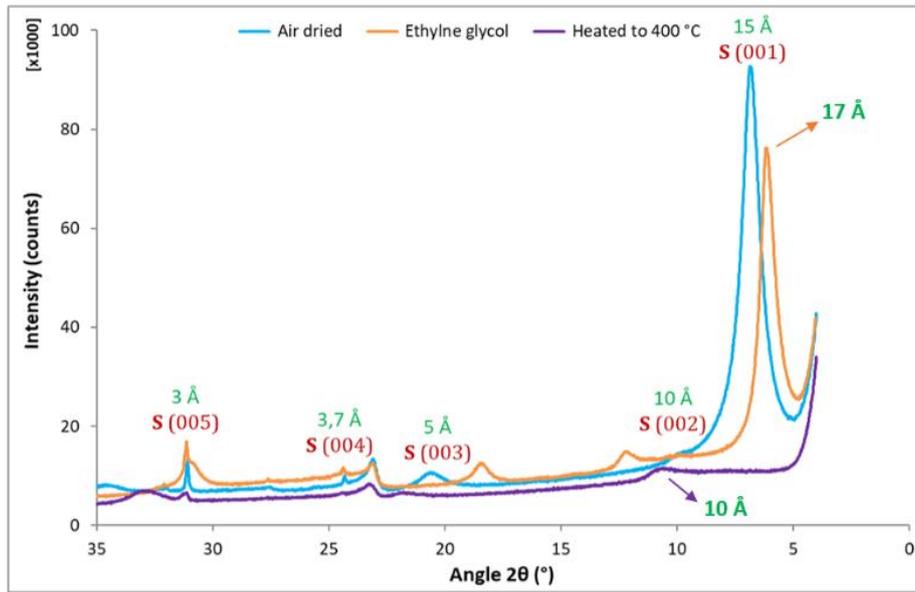


Figure 48(a): Diffractogramme DRX de la montmorillonite grecque ($0^\circ < \text{angle } 2\theta < 35^\circ$) ; S : Smectite.

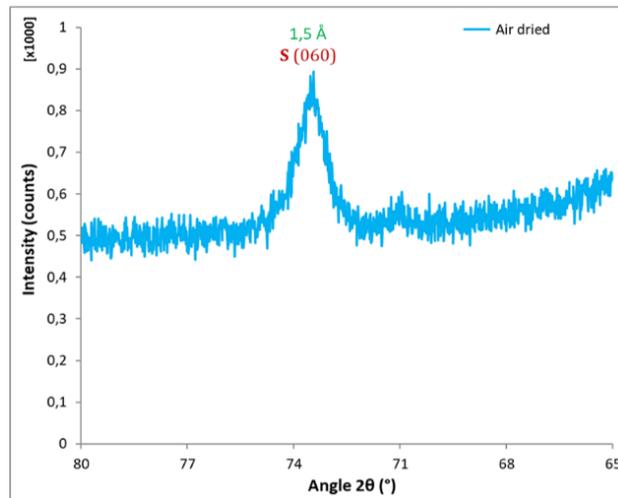


Figure 48(b): Diffractogramme DRX de la montmorillonite grecque ($65^\circ < \text{angle } 2\theta < 80^\circ$) ; S : Smectite.

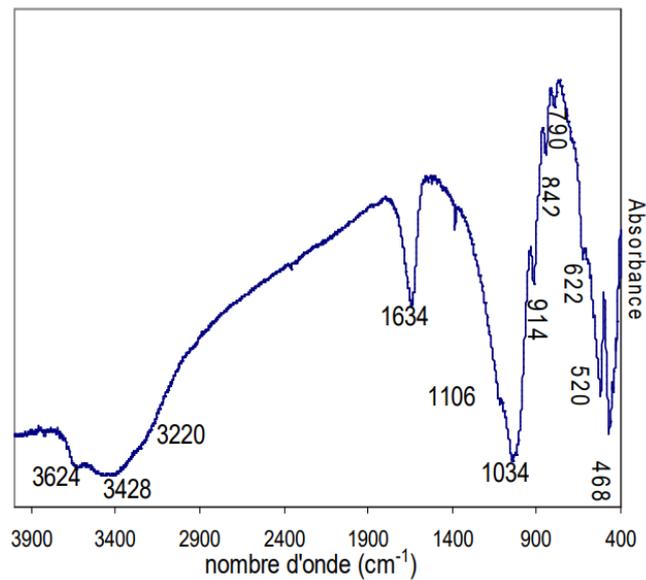


Figure 49: Spectre infrarouge de la montmorillonite grecque à l'état de poudre [Souli, 2004].

La capacité d'échange cationique CEC de cette argile est de 110 meq/(100 g) déterminée par l'adsorption de bleu de méthylène et sa surface spécifique est de 600 m²/g déterminée par la méthode BET (Théorie Brunauer, Emmett et Teller) [Souli, 2008].

L'observation au microscope électronique à balayage (MEB) de la montmorillonite grecque (Figure 50) montre une structure tridimensionnelle assez complexe ayant des espaces poreux plus importants que ceux de la kaolinite P300. La distribution granulométrique de cette argile montre que la fraction fine est constituée de près de 80 % de particules dont la taille est inférieure à 2 µm, alors que 100 % des particules ont une taille inférieure à 80 µm (Figure 47) [Hammad, 2010].

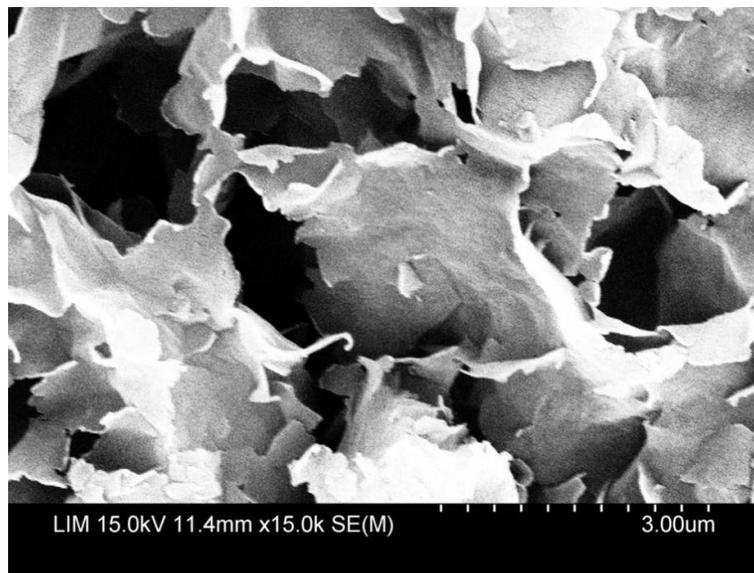


Figure 50: Observation au MEB de la montmorillonite grecque [Hammad, 2010].

La Figure 51 présente les courbes de rétention de la montmorillonite grecque (premier cycle de dessiccation-imbibition), initialement préparée sous forme de pâte, à une teneur en eau initiale $w_i = 1.5w_L$ [Soemitro, 1994]. Sur le chemin de dessiccation, le sol suit la ligne de saturation dans le plan (w, e) d'équation : $e = (\gamma_s/\gamma_w)w$, à partir du point initial A et jusqu'au point de limite de retrait conventionnelle C, qui correspond à une succion de 4.5 MPa et une teneur en eau de 33 %. Durant cet itinéraire, le matériau reste saturé jusqu'au point d'entrée d'air B correspondant à une succion de 1.5 MPa, puis subit une brutale diminution du degré de saturation s'accompagnant d'une faible variation d'indice des vides. Ensuite, la désaturation se poursuit jusqu'à une succion de l'ordre de 1000 MPa (point D). Sur le chemin d'imbibition de cette argile, le comportement volumique est réversible entre le point du départ D et le point B'. Entre les points B' et A', on observe une hystérésis importante observée dans les plans $(e, -u_w)$ et $(w, -u_w)$.

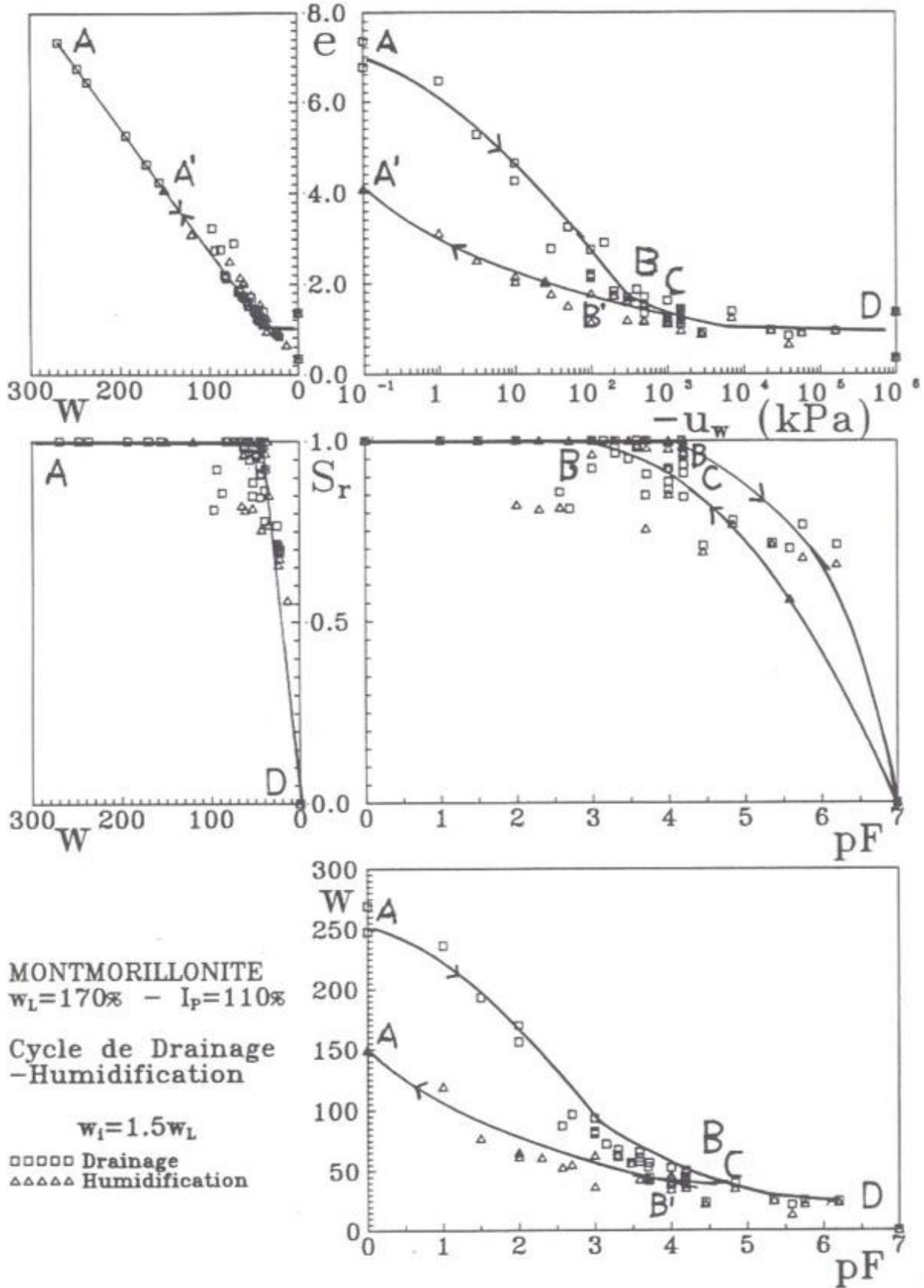


Figure 51: Premier cycle de dessiccation-imbibition sur la montmorillonite grecque initialement préparée sous forme de pâte à $w_i = 1.5 w_L$ [Soemito, 1994].

III.1.2. Dispositif expérimental

Un schéma descriptif du dispositif expérimental développé est présentée dans la Figure 52. Afin d'homogénéiser la distribution des couleurs, nous avons utilisé un système d'éclairage à l'aide d'une lumière froide. De même, nous avons disposé d'un rideau occultant tout autour du banc d'essai. Des appareils photo digital sont fixés sur un statif fixe pour prendre des photos de la surface supérieure de l'échantillon pendant le processus de la dessiccation. Un aspect moucheté, réalisé avec une poudre de PVC, est appliqué sur la surface de l'échantillon pour permettre au logiciel de corrélation d'images numériques de bien détecter la différence entre les pixels. La distribution granulométrique de cette poudre est présentée dans la Figure 53. On remarque que son diamètre moyen d_{50} , pour lequel la distribution cumulative est de 50 %, est égal à 0.16 mm. L'évolution du poids de l'échantillon pendant l'essai est mesurée à l'aide d'une balance électronique d'une précision de 0.05 g et d'une capacité de pesage de 6000g. L'ensemble du dispositif expérimental est contrôlé en termes de température $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ et d'humidité relative $HR = 40\text{ }%$.

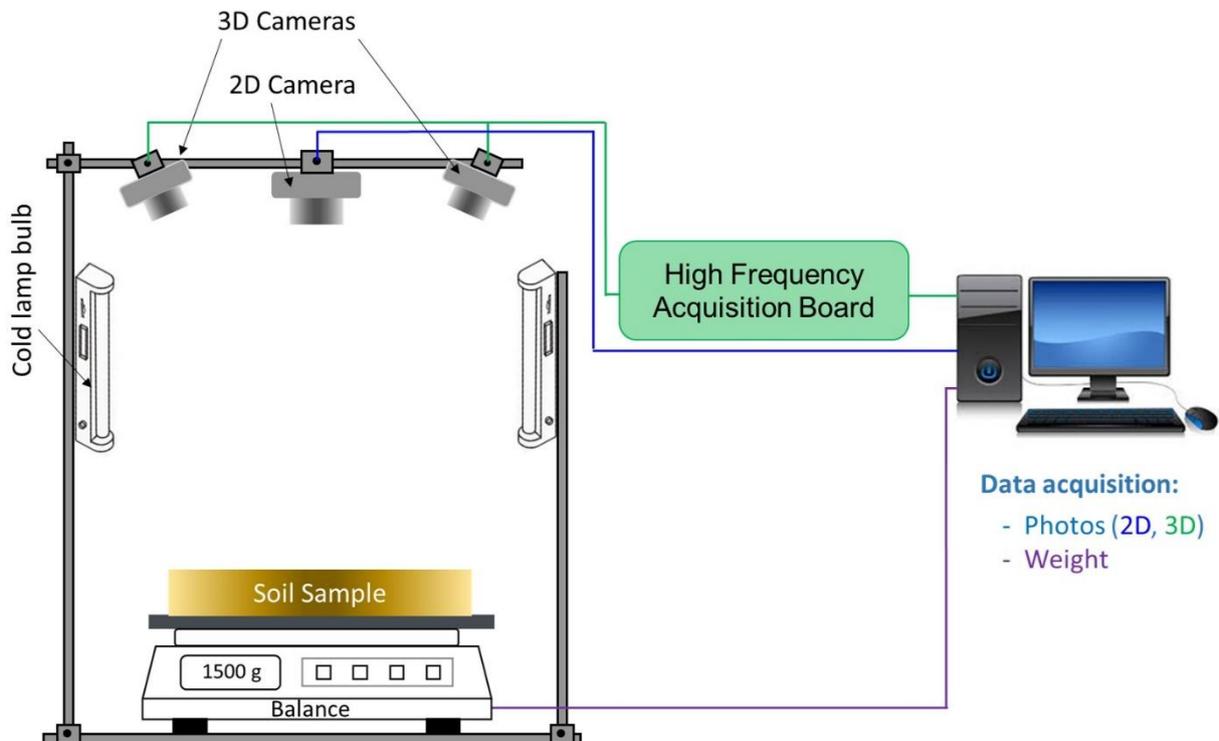


Figure 52: Schéma descriptif du dispositif expérimental.

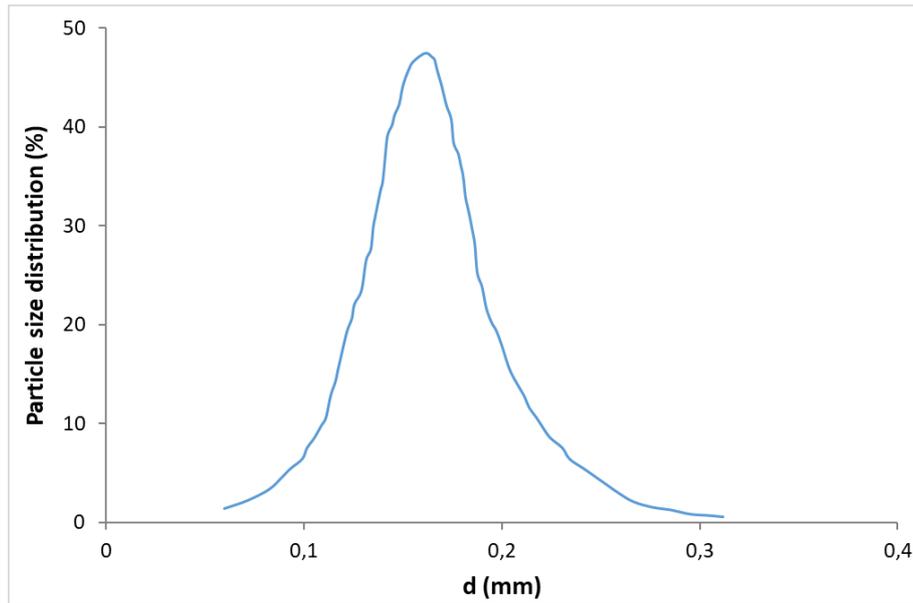


Figure 53: Distribution granulométrique de la poudre de PVC utilisée pour réaliser l'aspect moucheté des échantillons étudiés

III.1.3. Technique DIC (Digital Image Correlation)

La corrélation d'images numériques (DIC) est une technique optique qui permet de mesurer les champs de déplacement et de déformation d'une surface d'une image déformée par rapport à une image de référence, à travers la comparaison de la distribution des niveaux de gris dans les pixels des deux images. Chaque image prise par la caméra est divisée en imageries (subsets), qui forment une grille virtuelle de points de mesure. Une image est une matrice d'entiers naturels. Les pixels blancs appartiennent au niveau de gris 100 et les pixels noirs au niveau de gris 0. Par exemple, sur la Figure 54, l'image se déplace de 1 pixel vers le haut et de 1 pixel vers la droite. En définissant un subset de 5 x 5 pixels, dont le centre a une coordonnée $M_0 (X_0, Y_0)$ dans l'image de référence, le but est de trouver où le centre du subset $M (X, Y)$ déplacé dans l'image déformée. Ainsi, en mécanique des milieux continus (MMC), la transformation physique du centre du subset s'écrit : $M = f(M_0) = M_0 + U(M_0)$. Cette transformation est basée sur l'hypothèse que l'intensité de l'échelle de gris est maintenue pendant la déformation. Cependant, cette hypothèse n'est pas parfaite en raison du bruit des caméras et de l'éclairage pendant l'acquisition. Par conséquent, la transformation physique est approximée par un développement limité f' en fonction des déviations locales du déplacement $U(M_0)$:

$$f'(M) = M + U(M_0) + \frac{\partial U}{\partial M} (M_0) \cdot (M - M_0) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial M^2} (M_0) \cdot (M - M_0)^2 + \dots \quad (12)$$

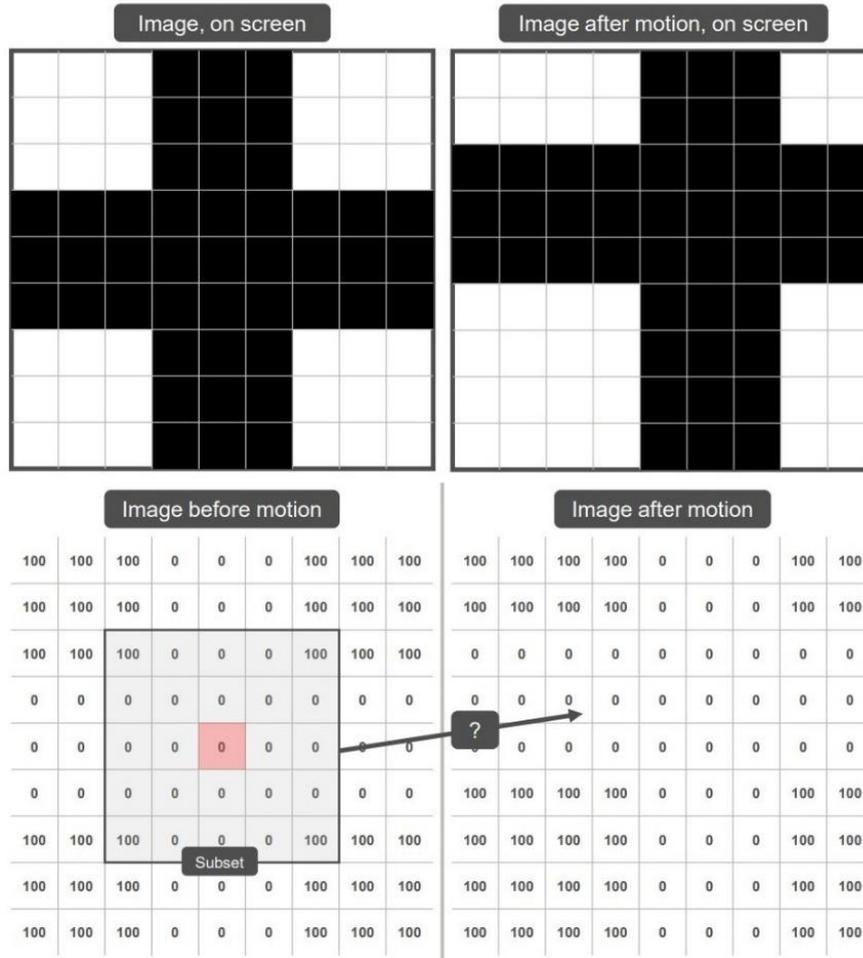


Figure 54: Déformation d'un motif [Jones, 2018].

Les termes du second ordre dans les tenseurs de déformation peuvent être négligé dans certains conditions pour avoir un tenseur linéarisé. Par conséquent, les équations des tenseurs de déformation seront :

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} : \text{composante normale de la déformation dans la direction } x$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} : \text{composante normale de la déformation dans la direction } y$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z} : \text{composante normale de la déformation dans la direction } z$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) : \text{distorsion angulaire}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}}{2} \right)^2 + \varepsilon_{xy}^2} : \text{déformation principale majeure}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}}{2} \right)^2 + \varepsilon_{xy}^2} : \text{déformation principale mineure}$$

où u_x , u_y et u_z sont les déplacements respectivement le long des axes x , y et z .

III.1.3.1. Paramètres de la technique DIC

L'utilisation de cette technique nécessite de définir certains paramètres suivant le Guide des Bonnes Pratiques de la Corrélation d'Images Numériques (iDIC Society Good Practices Guide) [Jones, 2018].

Pour la corrélation d'images en 2D, étant donné que les échantillons étudiés nécessitent d'avoir un champ de vision de 200 x 200 mm et une résolution de 3150 x 3150 pixels, et sachant que l'aspect moucheté utilisé possède une dimension moyenne de 0.16 mm, la dimension optimale du step (distance entre les centres des subsets) qui donne une bonne corrélation avec une précision de déplacement de 0.1 mm est de 5 pixels. Afin de garantir une précision et une isotropie raisonnables, les dimensions des subsets doivent être supérieures à trois fois celle du step [Schreier, 2009]. Par conséquent, des dimensions de subsets de 21 x 21 pixels sont adoptées.

L'image est filtrée en utilisant une fonction de pondération Gaussienne (Gaussian weights), permettant de pondérer la mise en correspondance des subsets (subsets matching). Les données sont lissées à l'aide d'un filtre de régression (Decay filter) couvrant une plage de 15 points de données. Le niveau de bruit (noise-floor) est estimé manuellement en effectuant des mesures statiques (en prenant plusieurs photos d'une cible fixe), puis en calculant l'écart-type des déplacements mesurés. La valeur maximale obtenue à partir de plusieurs mesures est celle indiquée dans les Tableaux 4 et 5.

Comme la base des échantillons ne bouge pas pendant les essais, nous avons utilisé un logiciel de corrélation d'images basé sur un tenseur lagrangien selon la méthode de corrélation locale. Un appareil photo Canon 600D équipé d'un objectif Macro, capable de prendre des photos à haute résolution, prenait des photos monochromatiques (en niveaux de gris) à des intervalles réguliers en fonction de la nature du matériau et de son état initial. La photo monochromatique est utilisée afin d'avoir une couleur grise régulière lors du traitement de l'image.

Pour la corrélation d'images en 3D, le système d'acquisition est combiné avec le système de traitement des images. Les caméras sont de type FL-CC2514-2M ayant une résolution de 1.3 MPix et une longueur focale de 25 mm. Les données sont lissées à l'aide d'une régression locale couvrant une plage de 15 points de données. Le résidu 3D (3D residuum) est la déviation maximale acceptable de la position du pixel déterminée par la corrélation et le point d'objet rétro-projeté en pixel. Afin d'avoir une précision de 0.1 mm (0.5 pixel) en déplacement Z, un résidu 3D de 0.4 pixel est choisi. La tolérance des valeurs aberrantes (outlier tolerance)

détermine l'influence du bruit sur l'algorithme de corrélation. Une faible tolérance (low outlier tolerance) signifie que les points bruyants et les points brillants ont une grande influence sur le résultat de la corrélation et peuvent générer des résultats inexacts ou erronés. Comme l'aspect moucheté utilisé n'est pas brillant, nous avons adopté la tolérance la plus faible afin de réduire le temps de traitement des données.

L'interprétation de la méthodologie DIC est réalisée à l'aide de deux logiciels du commerce, VIC 2D et Istra 4D, afin de vérifier leur reproductibilité. Ces logiciels permettent de calculer les champs de déplacement et de déformation suivant les axes X, Y et Z en coordonnées cartésiennes. Afin d'éviter la décorrélation du logiciel dans la visualisation du champ de déformation des zones fissurées, nous avons adopté une corrélation incrémentale. Cette option signifie que chaque image est comparée à l'image précédente plutôt qu'à l'image de référence. La comparaison entre les champs de déformation avec et sans une corrélation incrémentale n'a pas montré d'écart significatifs (écarts de l'ordre de 3 % des valeurs mesurées).

Les paramètres de corrélation d'image selon le Guide des Bonnes Pratiques de la Corrélation d'Images Numériques sont indiqués dans les Tableaux 3 à 5.

	2D DIC	3D DIC
<i>Camera</i>	Canon EOS 600D	Dantec Dynamics Q-400 DIC Standard 3D
<i>Image Resolution</i>	5184 x 3456 pixels ²	1024 x 1280 pixels ²
<i>Lens</i>	Canon compact-macro lens Focal Length of 50 mm	Ricoh Lens FL-CC2514-2M Focal Length of 25 mm
<i>Aperture</i>	f/4	f/8
<i>Field-of-View</i>	312.2 mm	1209.5 mm
<i>Image Scale</i>	15.75 pixels/mm	5 pixels/mm
<i>Stereo-Angle</i>	-	32.5 degrees
<i>Stand-off Distance</i>	750 mm	1050 mm
<i>Image Acquisition Rate</i>	100 Hz	111 Hz
<i>Patterning Technique</i>	Base coat of white and black PVC powder	Base coat of white and black PVC powder
<i>Pattern Feature Size</i>	2.5 pixels (0.16 mm)	2.5 pixels (0.16 mm)

Tableau 3: Paramètres du matériel de corrélation d'images numériques.

<i>DIC Software</i>	Correlated Solutions, VIC 2D Version 2009.1.0
<i>Image Filtering</i>	Gaussian filter with a 0.1x0.1 pixel kernel
<i>Subset Size</i>	21 pixels (1.33 mm)
<i>Step Size</i>	5 pixels (0.32 mm)
<i>Subset Shape Function</i>	Affine
<i>Matching Criterion</i>	Normalized squared differences (NSD)
<i>Interpolant</i>	Optimized interpolation filter 4-tap
<i>Strain Window</i>	11.8 data points
<i>Virtual Strain Gauge Size</i>	75 pixels (4.76 mm)
<i>Strain Formulation</i>	Green-Lagrange
<i>Post-Filtering of Strains</i>	Decay filter, span of 15 data points
<i>Displacement Noise-Floor</i>	0.04 pixels (2.5 μm) in-plane
<i>Strain Noise-Floor</i>	148 $\mu\text{m}/\text{m}$

Tableau 4: Paramètres de corrélation d'images numériques en 2D

<i>DIC Software</i>	Dantec Dynamics, Istra 4D Version 1.0.5
<i>Image Filtering</i>	Gaussian filter with a 0.3x0.3 pixel kernel
<i>Facet Size</i>	17 pixels (3.4 mm)
<i>Precision</i>	0.1 pixels
<i>Residuum</i>	20 Gray values
<i>3D Residuum</i>	0.4 pixels
<i>Outlier tolerance</i>	Low
<i>Grid spacing</i>	17 pixels
<i>Strain Formulation</i>	Green-Lagrange
<i>Post-Filtering of Strains</i>	Local regression, span of 15 data points
<i>Displacement Noise-Floor</i>	0.01 pixels (1.9 μm) in-plane 0.035 pixels (7 μm) out-of-plane
<i>Strain Noise-Floor</i>	295 $\mu\text{m}/\text{m}$

Tableau 5: Paramètres de corrélation d'images numériques en 3D.

III.1.3.2. Calibration de la technique DIC

La calibration des déplacements globaux et locaux mesurés par les deux logiciels VIC 2D et Istra 4D est réalisée à l'aide d'une plaque rectangulaire (200 x 200 x 8 mm) sur laquelle un mouchetis (poudre de PVC de couleurs blanche et noire) est appliqué (Figure 55).

Le déplacement global concerne le mouvement de la plaque entière. Le déplacement local concerne le mouvement du petit pavé tout en maintenant la plaque fixe. Ces déplacements sont mesurés à l'aide d'un pied de coulisse ayant une précision de 0.01 mm.

Dans la calibration en 2D, pour les déplacements globaux, nous avons déplacé la plaque dans sa globalité respectivement de 1, 2, 3, 4 et 5 mm selon les axes X et Y. Pour les déplacements locaux, nous avons déplacé un petit pavé posé sur la plaque respectivement de 2 et 4 mm selon les axes X et Y tout en maintenant cette plaque fixe.

Dans la calibration en 3D, pour les déplacements globaux, nous avons déplacé la plaque respectivement de 3.3, 6.6, 8.1, 11.4 et 14.7 mm selon l'axe Z. Pour les déplacements locaux, nous n'avons pas pu analyser les images à cause de la décorrélation du logiciel Istra 4D due à la discontinuité des mouchetis.

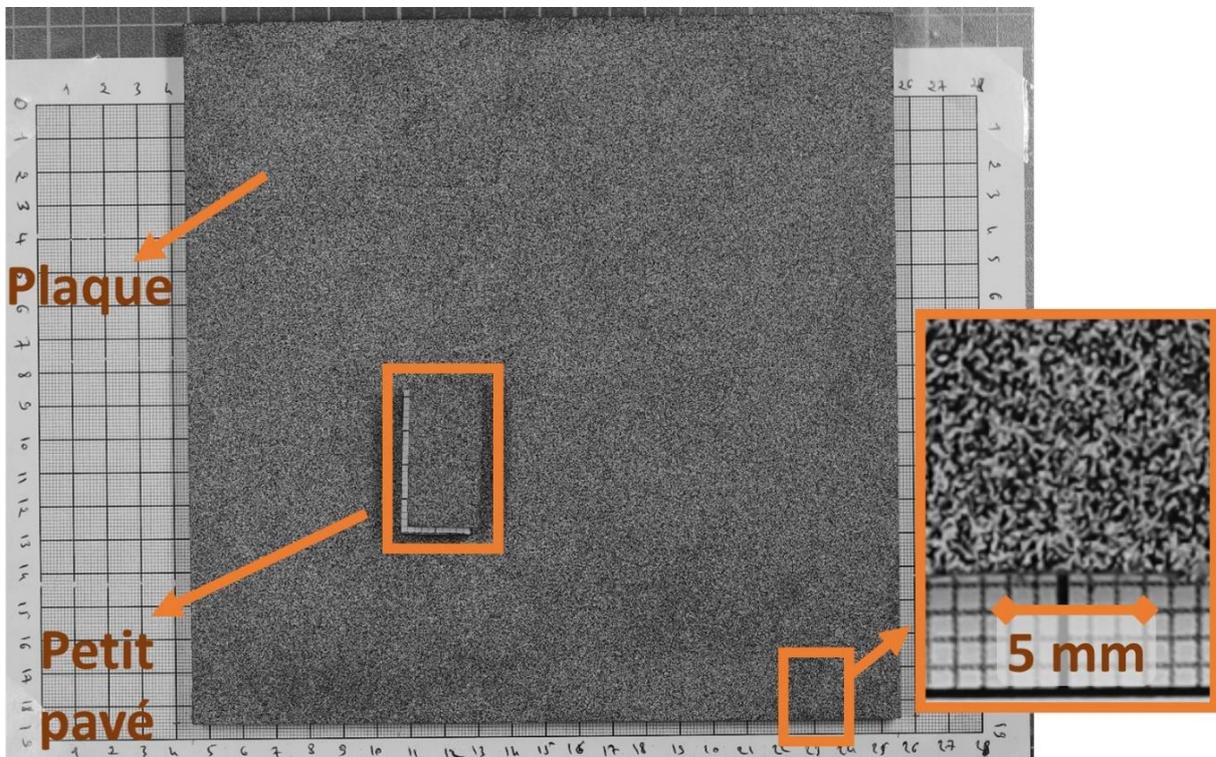


Figure 55: Dispositif utilisé dans la calibration de la technique DIC.

La Figure 56 montre les écarts des valeurs mesurées par rapport aux déplacements imposés. Un écart maximal de 0.05 mm est observé. Les erreurs systématiques sont des erreurs qui affectent toutes les mesures de la même manière, c'est-à-dire que tous les écarts estimés auront le même ordre de grandeur. Ces erreurs peuvent être causées par un défaut dans le système d'appareils photo. Par contre, les erreurs aléatoires sont des erreurs qui se produisent de manière aléatoire et qui affectent les mesures de manière imprévisible, c'est-à-dire que les écarts estimés auront des différents ordres de grandeur. Ces erreurs peuvent être dus à une faute de manipulation lors de la calibration (déplacements imposés pas assez précis). Un schéma de principe de ces deux types d'erreurs (systématiques et aléatoires) est présenté la Figure A2.1 de l'Annexe 2(a).

Dans notre cas, il s'agit d'erreurs aléatoires, car les écarts estimés ont des différents ordres de grandeur.

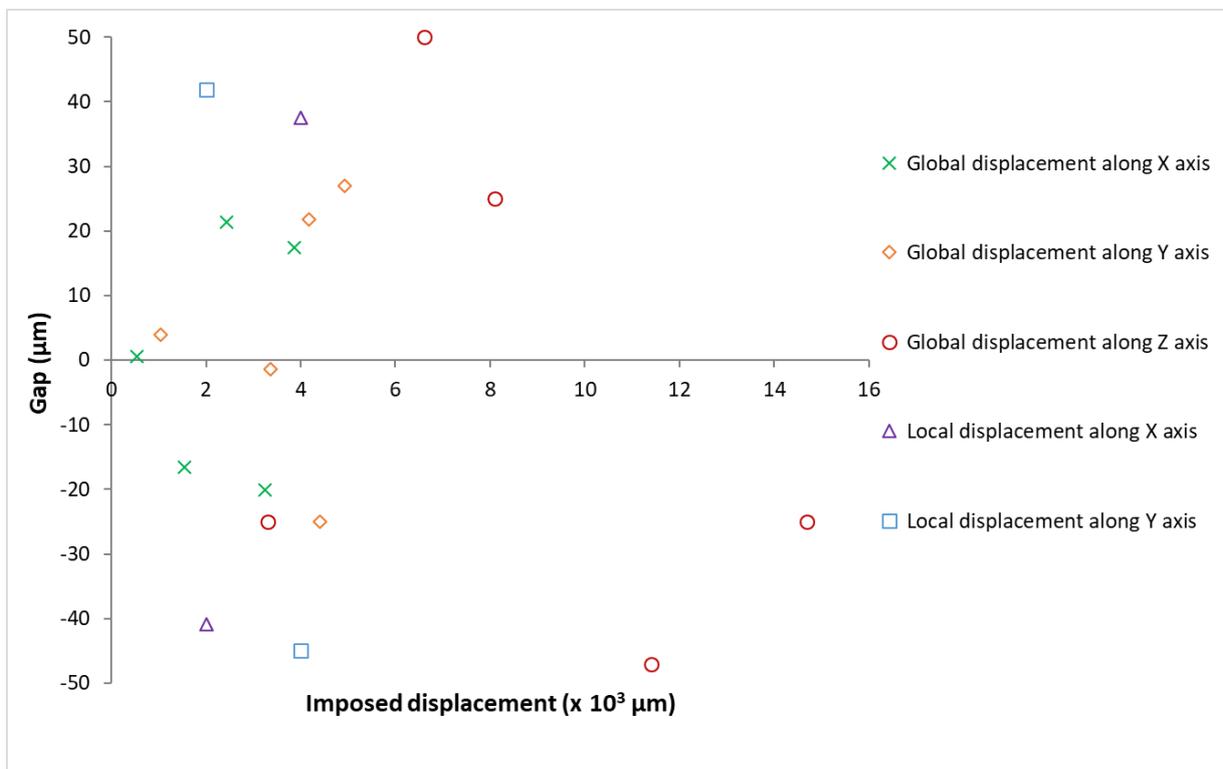


Figure 56: Ecart entre les déplacements mesurés et les déplacements imposés suivant les axes X, Y et Z.

De même, nous avons réalisé une comparaison entre les déformations calculées par les deux logiciels VIC 2D et Istra 4D sur un même échantillon (Annexe 2(b)). Cette comparaison a montré des erreurs relativement faibles entre les résultats de ces deux logiciels, ce qui met en évidence la fiabilité des résultats obtenus.

III.1.4. Conditions aux limites

Afin d'étudier l'effet des conditions aux limites sur la fissuration par dessiccation des argiles, les pâtes d'argiles sont coulées sur trois types de supports, désignées bases rugueuse, mi-rugueuse et lisse. La base rugueuse consiste en un papier abrasif imperméable de très gros grain « 180 » d'épaisseur 0.5 mm, utilisé couramment pour le gros décapage, de marque « Diall » et de référence « 739830 ». La base mi-rugueuse consiste en un papier abrasif imperméable de grain fin « 400 » d'épaisseur 0.5 mm, utilisé couramment pour la finition, de marque « MC Kenzie » et de référence « 62320675VR ». La base lisse consiste en une plaque de Téflon d'épaisseur 1 mm, ayant un coefficient de frottement statique entre 0.08 et 0.10 selon la norme ASTM D1894. Les caractéristiques de ce Téflon sont présentées dans le Tableau 6. Ces trois papiers sont collés sur une plaque rigide en PVC.

Propriété	Norme	Unités	Spécification
Densité	ISO 1300-2	g/cm ³	2,130 – 2,180
Résistance à la traction	ISO 1300-2	MPa	≥ 20
Allongement	ISO 1300-2	%	≥ 200
Dureté	ISO 1300-2	Shore D	≥ 54
Dureté sphérique	ISO 1300-2	MPa	≥ 23
Résistance à la compression à 1% de déformation	ASTM D621	Kg/cm ²	≥ 70
Déformation sous charge (140 Kg/Cm ² pour 24 heures à 23°C)		%	10 - 13
Déformation permanente (Après 24 heure à 23°C)	ASTM D621	%	6 - 7,5
Coefficient de frottement statique	ASTM D1894		0,08 - 0,10
Coefficient de frottement dynamique	ASTM D1894		0,06 - 0,08
Conductivité thermique	ASTM C177	W / m K	0,24
Constance diélectrique (ε) de 69 Hz à 2 GHz	ASTM C150		2,1
Résistance diélectrique	ASTM D149	KV/mm	20 - 70
Résistivité volumique	ASTM D257	Ohm cm	10 ¹⁸
Inflammabilité	UL 94		VE-0
Absorption d'eau	ASTM D570	%	0,01

Tableau 6: Caractéristiques du papier Téflon [Approflon, 2010].

III.2. Essais préliminaires

Une série d'essais préliminaires de retrait libre est menée sur 8 échantillons dans le but de définir les meilleures conditions permettant d'étudier la fissuration par dessiccation dans les matériaux argileux. La Figure 57 présente un organigramme décrivant les différents paramètres étudiés dans cette série d'essais.

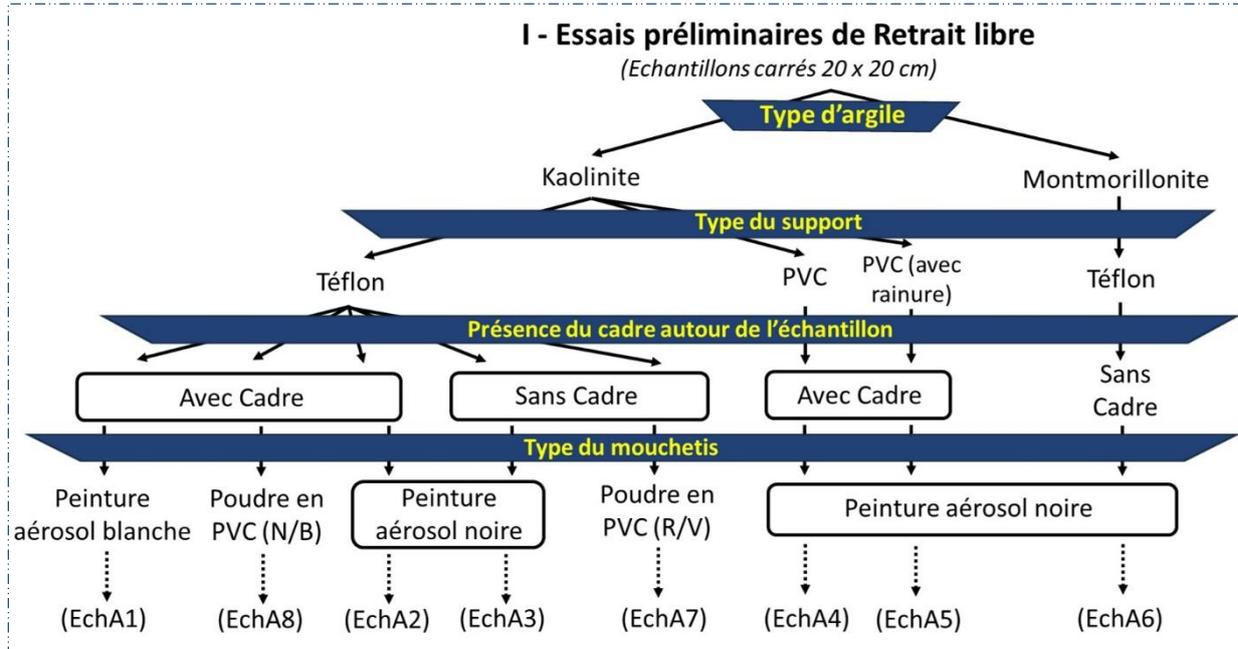


Figure 57: Essais préliminaires de retrait libre.

III.2.1. Mise en œuvre

Les échantillons sont préparés initialement à une teneur en eau initiale de $1.5w_L$ pour la kaolinite et $1.35w_L$ pour la montmorillonite, afin d'obtenir des pâtes saturées adaptées à leur mise en œuvre. Ces pâtes sont conservées dans un récipient scellé pendant 24 heures afin d'homogénéiser la teneur en eau. Ensuite, elles sont coulées dans un moule carré de dimensions de 200 x 200 mm et de hauteur de 8 mm, composé d'une plateforme rigide et d'un cadre amovible. L'ensemble est placé sur une balance de précision 0.01 g permettant des acquisitions de la masse en continue. La Figure 58 présente une vue de dessus de l'état initial de l'échantillon de kaolinite A8, avant et après l'application de l'aspect moucheté.

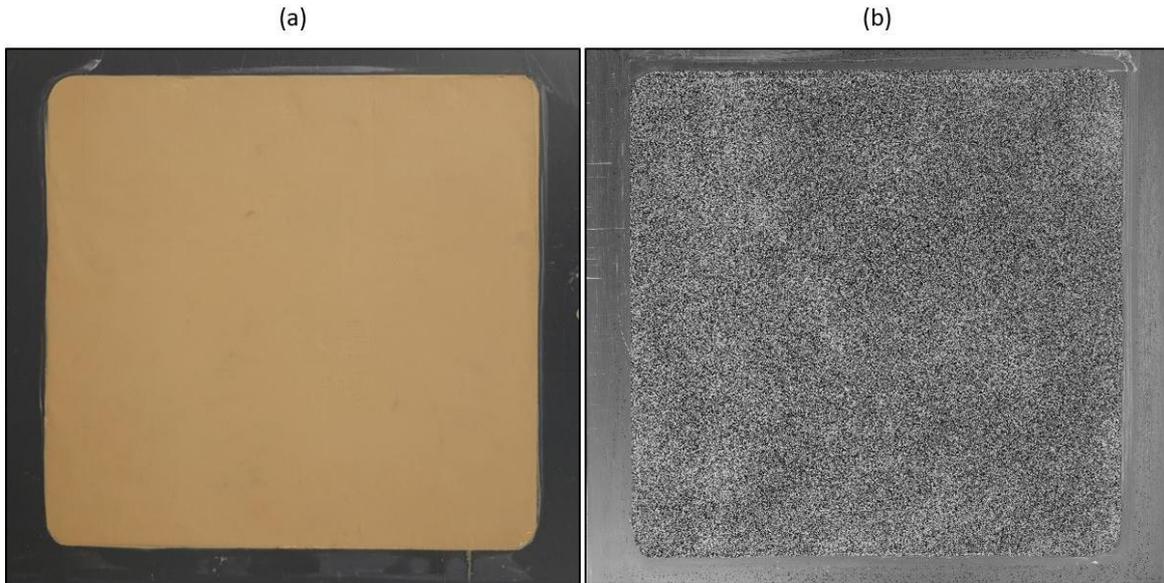


Figure 58: Vue de dessus de l'état initial de l'échantillon A8 :
(a) avant l'application de l'aspect moucheté ; (b) après l'application de l'aspect moucheté.

III.2.2. Cinétique de dessiccation

La Figure 59 présente l'évolution de la teneur en eau pendant la dessiccation. Au cours de la phase initiale de dessiccation, le taux d'évaporation de l'eau est constant avec une cinétique de dessiccation variant entre -27 %/jour et -39 %/jour. Au-delà d'une teneur en eau égale à 5 %, la cinétique de séchage se ralentit et la teneur en eau tend vers une valeur résiduelle d'environ 1 %. La fin de l'expérience est atteinte lorsque la teneur en eau de l'échantillon devient stable en présentant un plateau horizontal, après environ trois jours de séchage. D'après les courbes de rétention de la kaolinite P300 (Figure 16), cette teneur en eau résiduelle correspond à une succion de l'ordre de 150 MPa.

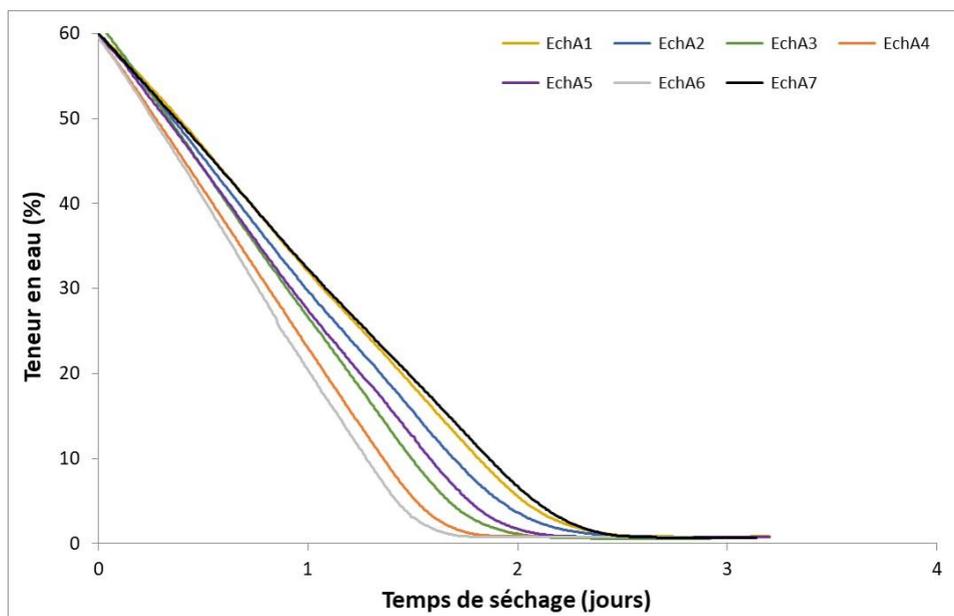


Figure 59: Evolution de la teneur en eau pendant la dessiccation.

III.2.3. Analyse préliminaire de l'effet des supports

L'effet des conditions aux limites est étudié à travers deux paramètres différents : la rugosité du support de l'échantillon et la présence d'un cadre tout autour de ses bords latéraux. Le premier paramètre permet de contrôler le frottement entre l'échantillon et sa base inférieure. Ainsi, deux types de support sont utilisés : un film en Téflon permettant de réduire le frottement sol/support à travers sa surface très lisse (échantillons A1, A2, A3, A6, A7 et A8), et une plaque en PVC ayant une rugosité supérieure à celle du Téflon (EchA4). De même, des rainures sont tracées sur la plaque de PVC (voir Annexe 3 (Figure A3.1)) afin d'augmenter le frottement sol/support (EchA5). Le deuxième facteur permet de contrôler le sens du séchage et le frottement sur les bords de l'échantillon. La Figure 60 présente l'état final des échantillons A1, A2, A3, A7 et A8. On remarque que tous ces échantillons, ayant une base lisse, ne sont pas fissurés lors de la dessiccation. Ceci montre aussi que la présence du cadre autour de l'échantillon n'a pas d'effet significatif sur la fissuration du matériau. Par conséquent, nous avons décidé de garder la présence du cadre dans les essais suivants pour cette argile, afin de privilégier un séchage dans la direction verticale et une meilleure répartition de la teneur en eau dans le plan.

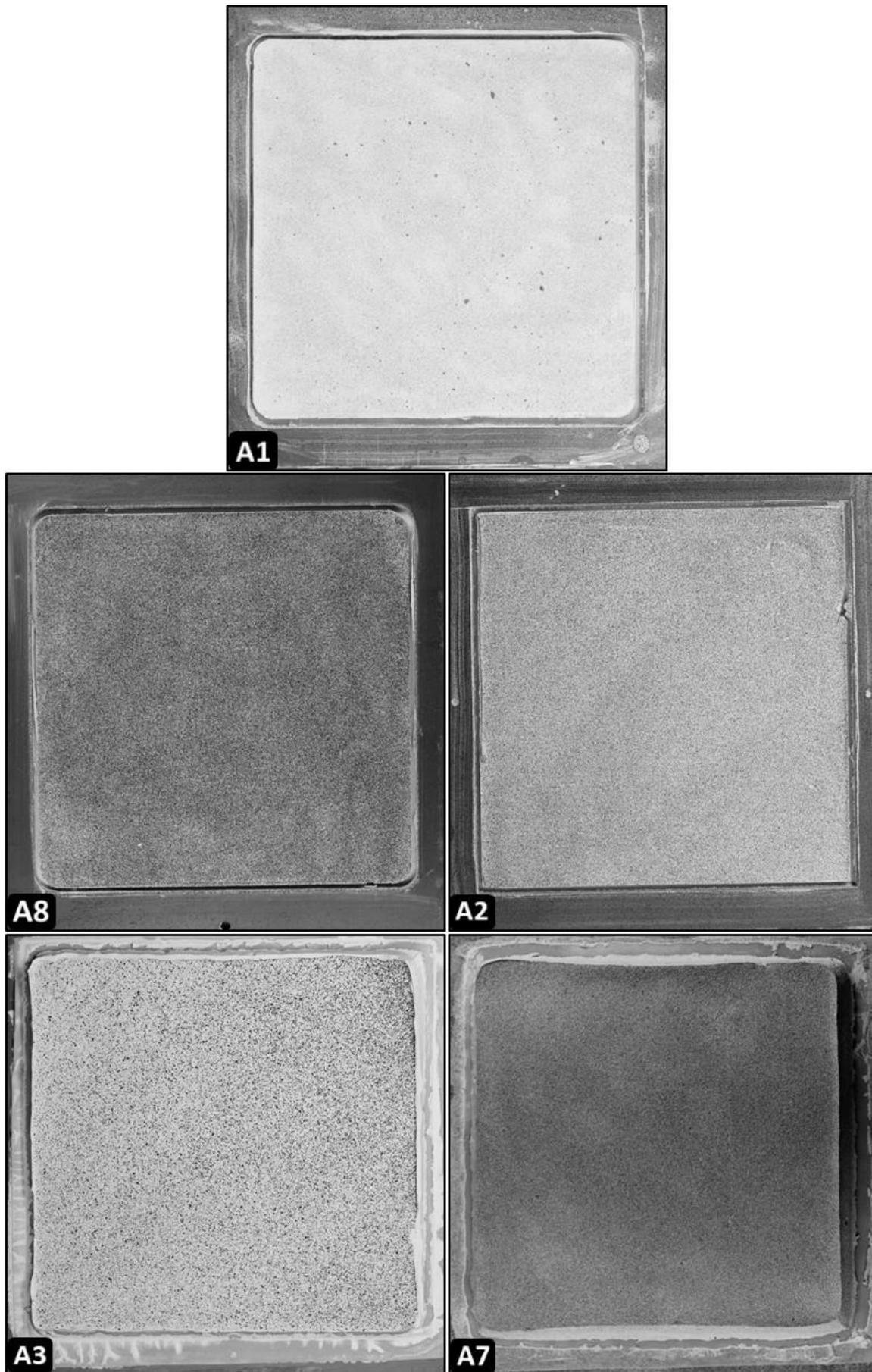


Figure 60: Etat final après dessiccation complète des échantillons A1, A2, A3, A7 et A8 sur un support en Téflon.

Concernant les supports rugueux, l'état final des échantillons A4 et A5 est présenté dans la Figure 61. On remarque qu'il existe de légères fissures dans l'échantillon A4, ayant une base en PVC (plus rugueuse que le Téflon). De même, on observe des fissures plus intenses dans l'échantillon A5, ayant une base en PVC avec des rainures. L'augmentation de l'intensité de la fissuration dans les échantillons en fonction de la rugosité de leurs bases met en évidence l'effet des conditions aux limites, représentées par le frottement sol/support, sur la fissuration par dessiccation des argiles. Afin d'étudier plus en profondeur l'effet des conditions aux limites sur le comportement de retrait des argiles lors de la dessiccation, la rugosité de la base de l'échantillon est matérialisée dans les essais suivants par des papiers abrasifs, dont les caractéristiques sont présentées dans le paragraphe III.1.4.

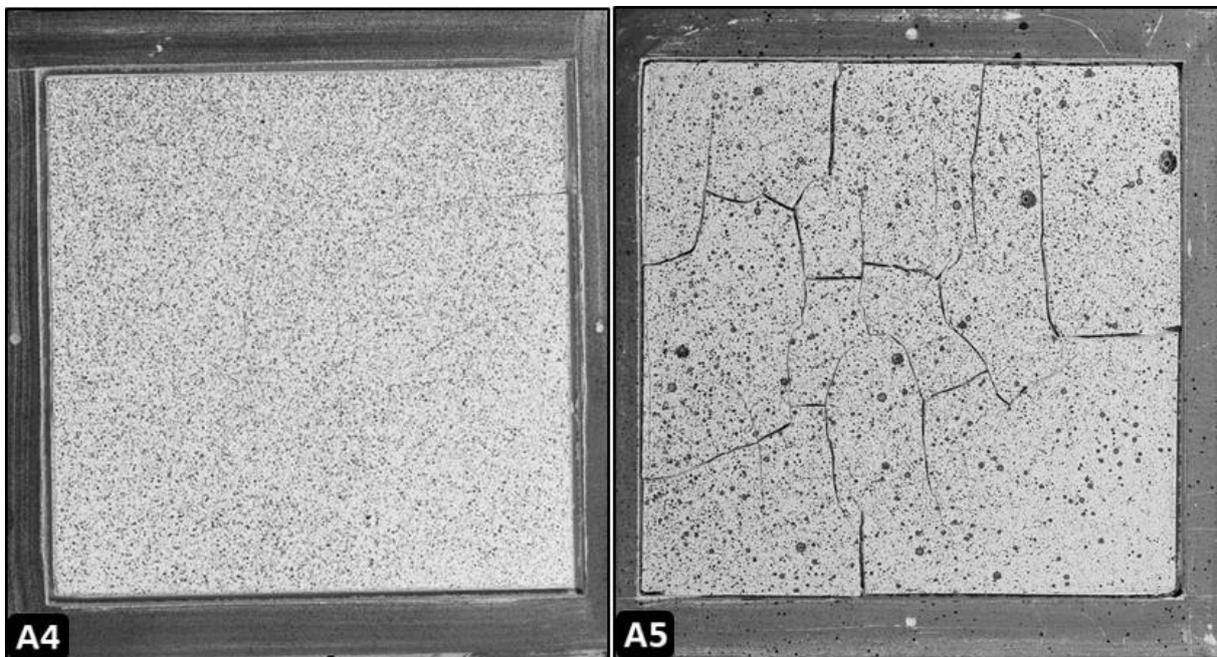


Figure 61: Etat final après dessiccation complète des échantillons A4 et A5.

III.2.4. Effet de l'aspect moucheté

Plusieurs types d'aspects mouchetés sont étudiés dans cette série d'essais. D'abord, nous avons testé un mouchetis appliqué l'aide d'une peinture aérosol de couleur blanche (EchA1). Comme la kaolinite et la montmorillonite sont des argiles de couleurs claires, ce type de mouchetis n'a pas donné suffisamment de contraste pour permettre une bonne corrélation des images. Ensuite, nous avons remplacé cette peinture blanche par une peinture noire (Ech A2, A3, A4, A5 et A6). Cette dernière a permis d'avoir une corrélation meilleure pour les échantillons de kaolinite, malgré la présence des grosses tâches noires qui causent des décorrélations (Ech A4 et A5). Pour l'échantillon de montmorillonite (EchA6) qui possède un comportement de retrait

beaucoup plus important que la kaolinite, le mouchetis noir pulvérisé n'a pas pu se fixer sur la surface et a glissé pour fusionner en formant une surface peinte en noire empêchant la corrélation du logiciel (Figure 62).

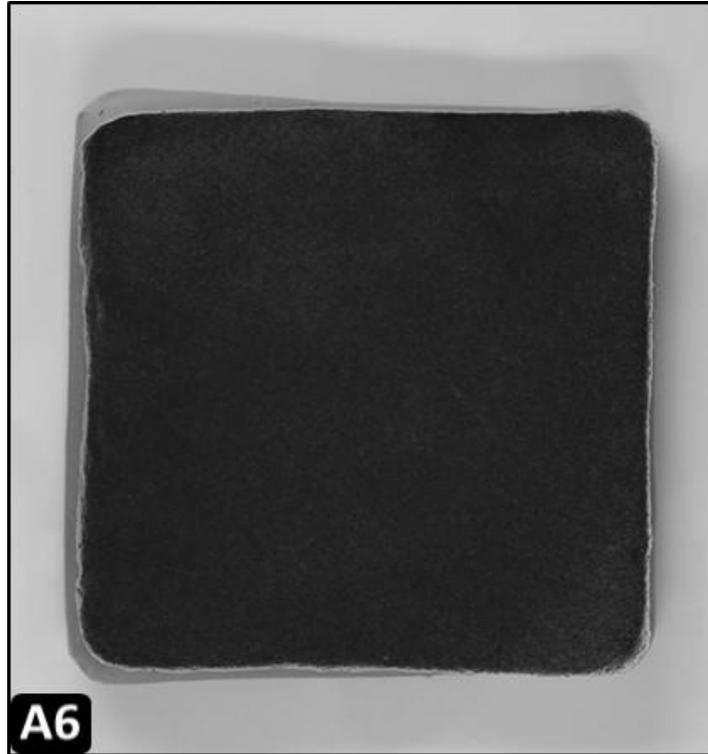


Figure 62: Fusion des points noirs de la peinture aérosol au cours du séchage dans l'échantillon A6.

Par conséquent, nous avons procédé au remplacement de la peinture aérosol par une poudre de PVC. Dans un premier temps, nous avons testé une poudre de PVC de couleurs rouge et violette sur un échantillon de kaolinite (EchA7). L'avantage de ce type de mouchetis est d'avoir un motif uniforme réparti sur toute la surface de l'échantillon, du fait de la dimension uniforme de ses particules (0.16 mm). Néanmoins, le niveau de gris rapproché entre ses couleurs rouge et violette n'a pas permis au logiciel de détecter correctement le mouvement du motif lors de la déformation de l'échantillon (Figure 63). Par la suite, nous avons utilisé une poudre de PVC de couleurs blanche et noire, afin d'avoir le maximum de contraste. Ce type de mouchetis, qui a été testé sur un échantillon de kaolinite (EchA8), a permis d'avoir un meilleur traitement d'image sans aucune décorrélation. De même, les échantillons de montmorillonite traités avec ce dernier mouchetis ont donné de bons résultats lors du traitement d'image. Par conséquent, nous avons adopté ce type de mouchetis pour l'ensemble des essais de dessiccation suivants.

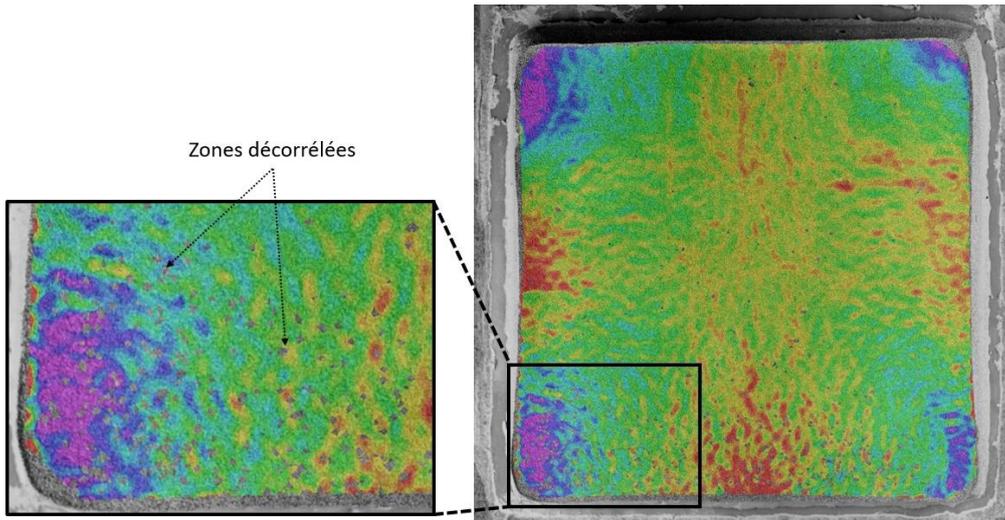


Figure 63: Zones décorréées lors du traitement d'images de l'échantillon A7.

III.3. Effet des conditions aux limites

Une deuxième série d'essais de retrait libre est réalisée sur 12 échantillons de kaolinite et de montmorillonite afin d'étudier, par la technique DIC, l'effet des conditions aux limites et de la géométrie des échantillons sur la fissuration par dessiccation dans les argiles. La Figure 64 présente un organigramme décrivant les différents paramètres étudiés dans cette série d'essais. L'effet des conditions aux limites est traité à travers trois types de bases : rugueuse, mi-rugueuse et lisse (voir paragraphe III.1.4). La géométrie des échantillons est étudiée à travers trois différentes épaisseurs d'échantillon : 8 mm, 16 mm et 32 mm. La majorité des échantillons est réalisée en présence d'un cadre tout autour de leurs bords latéraux, à l'exception des échantillons B7, B11 et B12.

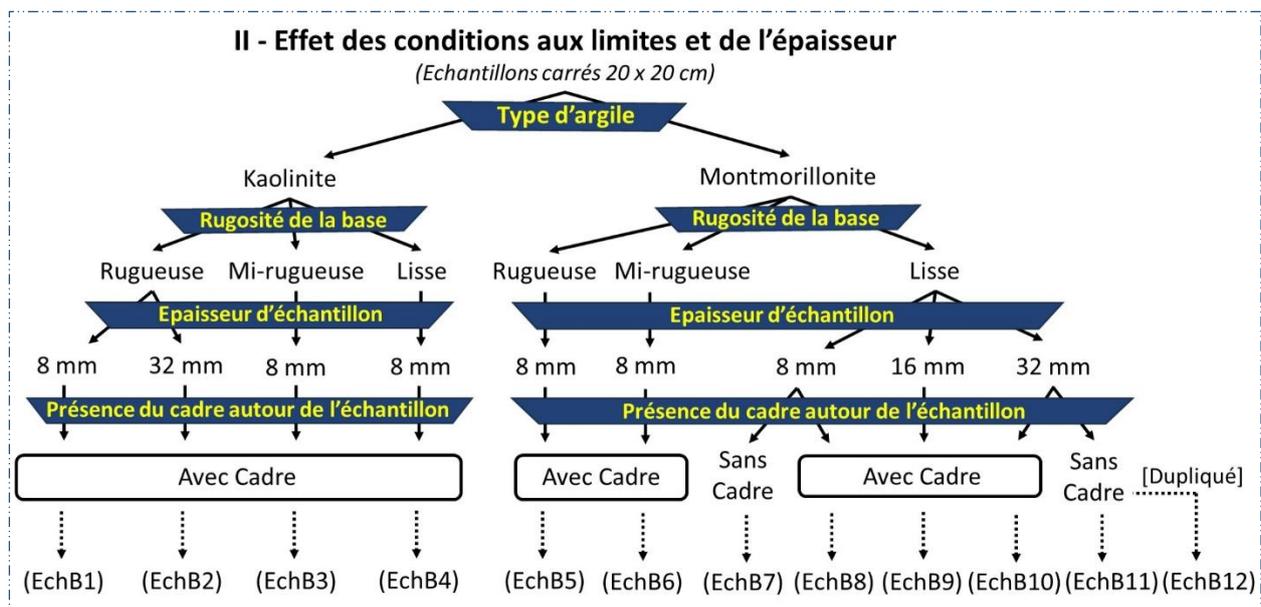


Figure 64: Essais de retrait libre traitant l'effet des conditions aux limites et de l'épaisseur des échantillons.

III.3.1. Cinétique de dessiccation

La mise en œuvre des échantillons de cette série est similaire à celle des essais préliminaires de retrait libre (voir paragraphe III.2.1). La Figure 65 présente l'évolution de la teneur en eau des échantillons de kaolinite et de montmorillonite pendant la dessiccation.

Les échantillons de kaolinite B1, B3 et B4, ayant une épaisseur de 8 mm, présentent un comportement hydrique similaire à ceux des essais préliminaires, avec une cinétique de séchage de l'ordre de 33 %/jour lors de la phase initiale de dessiccation (Figures 59 et 65(a)). Par contre, l'échantillon B2, ayant une épaisseur de 32 mm, a montré une cinétique de séchage de 5 %/jour lors de la phase initiale de dessiccation (Figure 65(a)).

En revanche, les échantillons de montmorillonite ont montré des cinétiques de séchage de l'ordre de 81 %/jour, 42 %/jour et 20 %/jour lors de la phase initiale linéaire de dessiccation respectivement pour ceux ayant une épaisseur de 8 mm, 16 mm et 32 mm (Figure 65(b)). Au-delà d'une teneur en eau de 25 %, cette cinétique de séchage se ralentit et la teneur en eau tend vers une valeur résiduelle d'environ 15 %. La fin de la dessiccation est atteinte lorsque la teneur en eau de l'échantillon devient stable en présentant un plateau horizontal.

Cette différence dans les cinétiques de séchage de ces deux argiles montre l'influence de la constitution minéralogique du matériau (Figure 65(c)) et de l'épaisseur de l'échantillon (Figures 65(a) et 65(b)) sur son comportement hydrique.

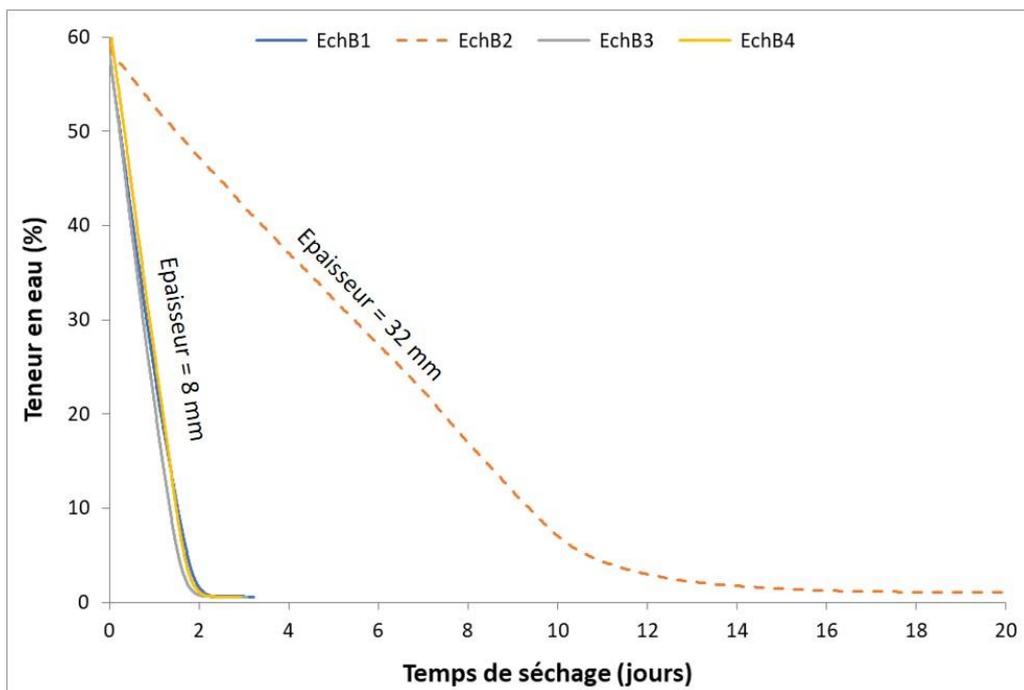


Figure 65(a): Evolution de la teneur en eau des échantillons de *kaolinite* pendant la dessiccation.

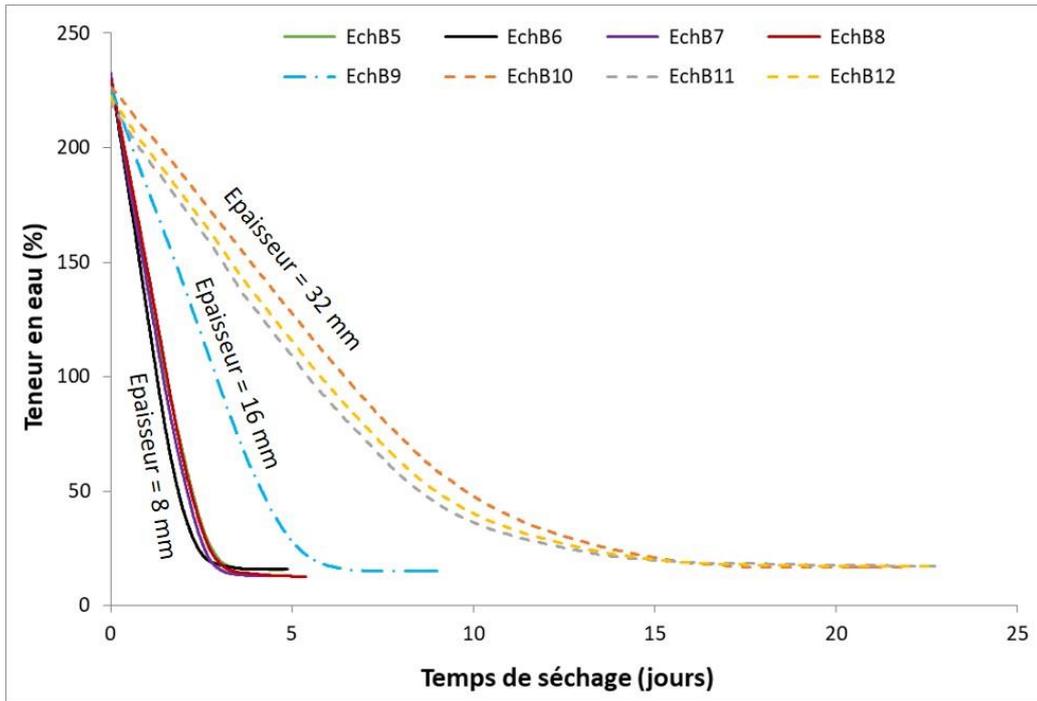


Figure 65(b) : Evolution de la teneur en eau des échantillons de *montmorillonite* pendant la dessiccation.

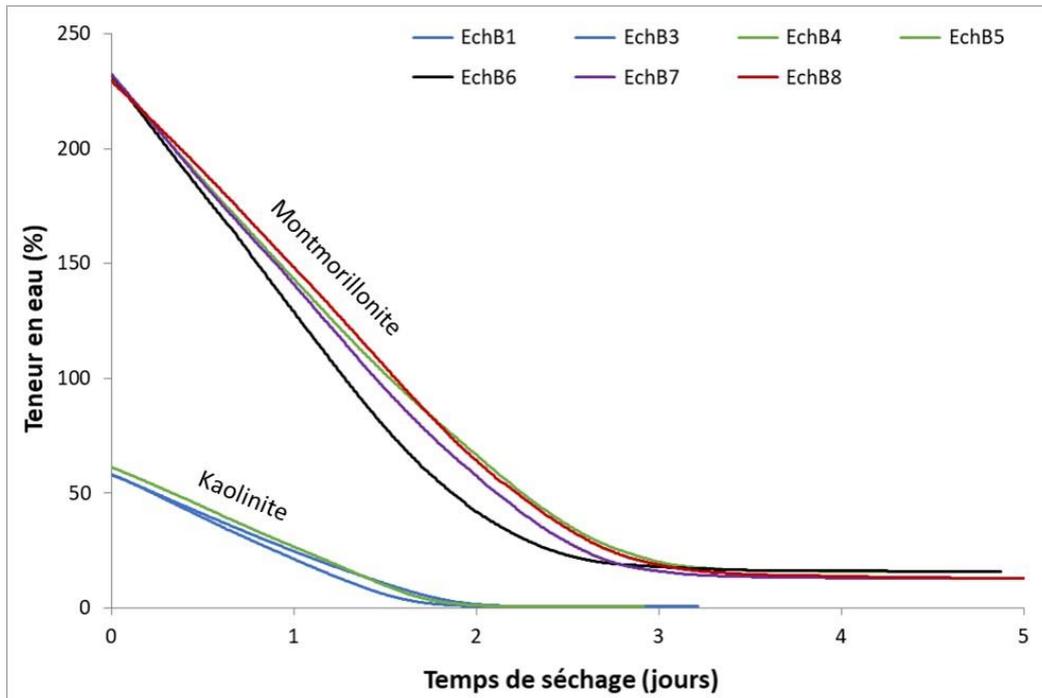


Figure 65(c) : Evolution de la teneur en eau des échantillons d'épaisseur 8 mm pendant la dessiccation.

III.3.2. Analyse de la fissuration

Une vue de dessus de l'état initial typique d'un essai de retrait libre (échantillons carrés de dimensions 200 x 200 mm) est déjà présentée dans la Figure 58(b). La Figure 66 présente l'état final des échantillons de kaolinite (argile non gonflante) en fonction de différentes conditions aux limites (rugosité de la base). Pour les échantillons d'épaisseur 8 mm, on remarque que seul

l'échantillon B1 ayant une base rugueuse a fissuré, tandis que les échantillons B3 (base mi-rugueuse) et B4 (base lisse) n'ont montré aucune discontinuité. Cette différence de comportement met en évidence l'effet des conditions limites sur le comportement du matériau pendant la dessiccation. Par contre, l'échantillon B2 d'épaisseur 32 mm n'a pas fissuré malgré la forte rugosité de la base. Ceci indique que l'épaisseur de l'échantillon porte un effet majeur sur son comportement mécanique.

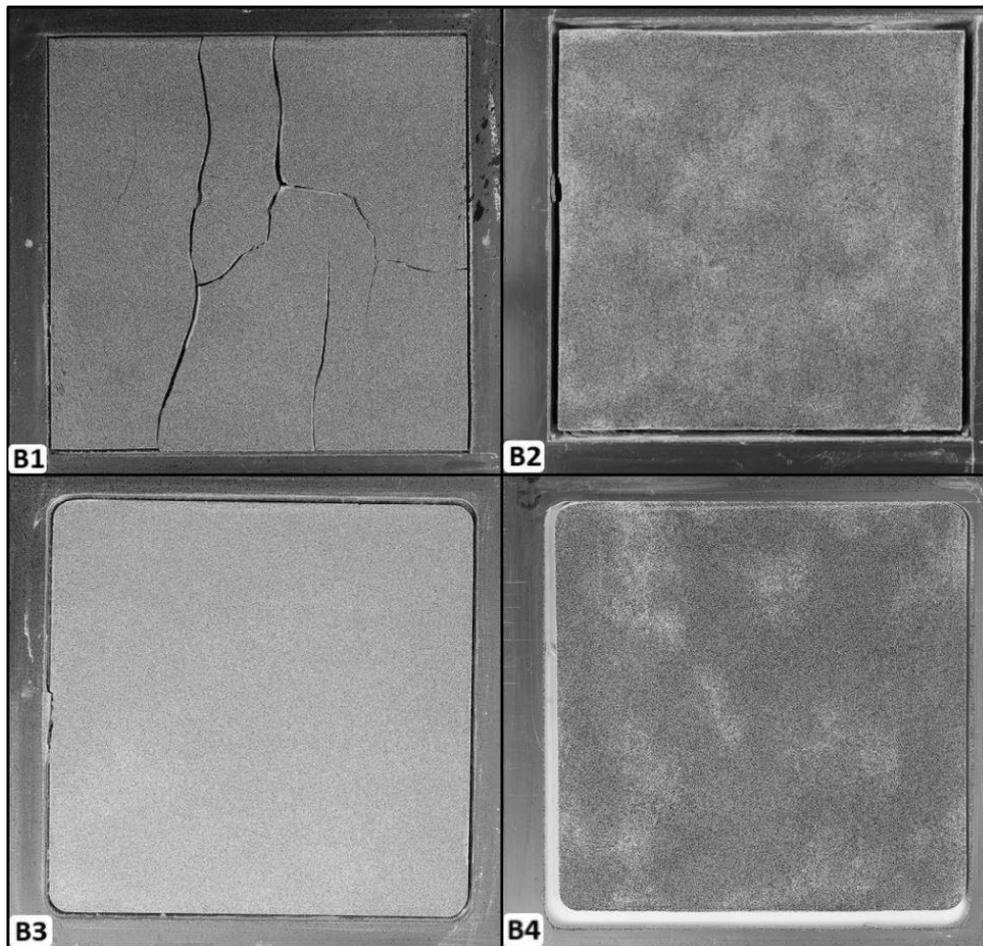


Figure 66: Etat final des échantillons de kaolinite après dessiccation.

De même, la densité de retrait global (GSR, 'Global Shrinkage Ratio' en anglais) des échantillons est estimée. Elle est définie comme le rapport de la surface rétrécie de l'échantillon (différence entre sa surface à l'état final et sa surface à l'état initial) sur sa surface à l'état initial (Equation (13)). Dans la Figure 67, la surface rétrécie (surface finale – surface initiale) représente la zone en couleurs verte et bleue, tandis que la surface à l'état initial représente la zone en couleur orange. Ces surfaces sont calculées à l'aide du logiciel ImageJ.

$$\text{GSR} = \frac{\text{Surface finale} - \text{Surface initiale}}{\text{Surface initiale}} \times 100 \quad (13)$$

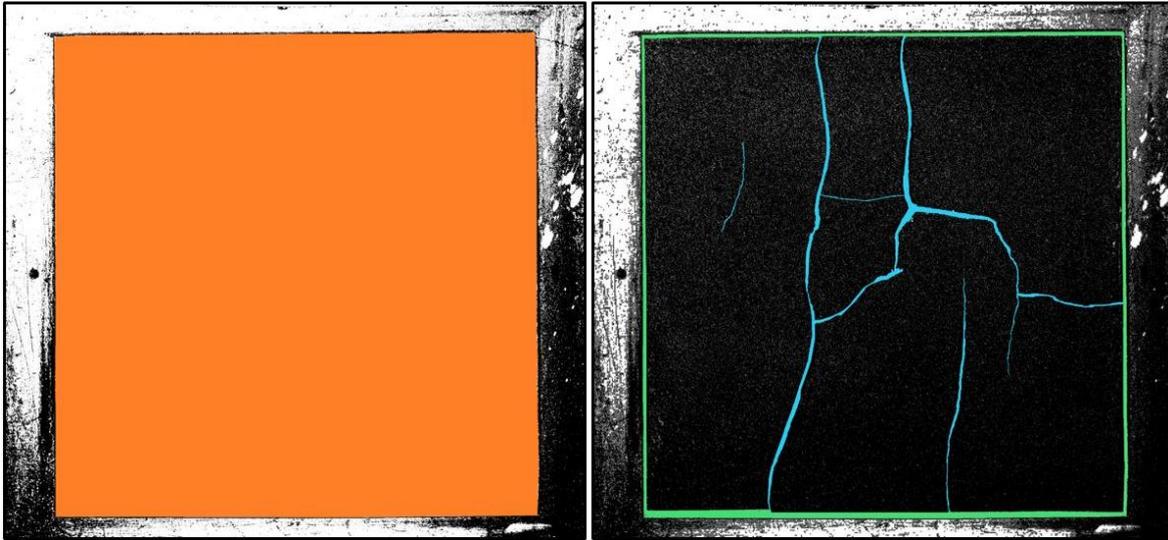


Figure 67: Analyse du retrait global et du réseau des fissures. Exemple du cas de l'échantillon B1.

Les densités de retrait global (GSR) des échantillons de kaolinite sont présentées dans le Tableau 7. Pour les échantillons d'épaisseur 8 mm, la densité de retrait global de l'échantillon B1 (base rugueuse) est de 4 %, celle de l'échantillon B3 (base mi-rugueuse) est de 5 % alors que celle des échantillons B4 et A8 (base lisse) est de 7 %. On remarque que le retrait global diminue lorsque l'effet des conditions aux limites devient plus important. Ceci est dû aux frottements sol/support qui inhibent les déformations de retrait du sol au cours de la dessiccation. D'autre part, l'échantillon B2 d'épaisseur 32 mm (base rugueuse) a subi un retrait global supérieur à ceux d'épaisseur 8 mm, avec une densité de retrait global de 11 %. L'augmentation de la densité de retrait global en fonction de l'épaisseur de l'échantillon confirme l'idée, mentionnée ci-dessus, indiquant que l'effet de l'épaisseur de l'échantillon domine l'effet des conditions aux limites lors du retrait par dessiccation.

Echantillon(s)	Type de base	Epaisseur	GSR
B1	rugueuse	8 mm	4 %
B3	mi-rugueuse	8 mm	5 %
B4 et A8	lisse	8 mm	7 %
B2	rugueuse	32 mm	11 %

Tableau 7: Densité de retrait global (GSR) des échantillons de kaolinite.

La Figure 68 présente l'état final des échantillons de montmorillonite (argile gonflante) en fonction de différentes conditions aux limites (rugosité de la base). On remarque que la montmorillonite s'est fissurée dans tous les cas, indépendamment de la rugosité de la base et de l'épaisseur de l'échantillon. En outre, les échantillons d'épaisseur 8 mm ont subi des fléchissements verticaux très importants (Figure 68(c)). Ceci indique que les caractéristiques

intrinsèques du matériau (minéralogie) portent un effet sur son comportement de retrait plus important que l'effet des conditions aux limites et de l'épaisseur de l'échantillon. La différence de comportement entre la kaolinite et la montmorillonite peut être attribuée au fait que les particules de montmorillonite jouent un rôle important dans le mécanisme de retrait en raison de leur constitution minéralogique et leur organisation texturale lui offrant une faible rigidité [Rhaiem, 1986 ; Wei, 2014]. De même, les sols argileux les plus fins sont plus sensibles à la formation de fissures du fait de la présence de petits pores qui provoquent une forte succion. A titre d'exemple, d'après les courbes de rétention de ces deux matériaux, la succion correspondante à une teneur en eau de 40 % est de 10 kPa pour la kaolinite et de 7 MPa pour la montmorillonite [Indarto, 1991 ; Soemitro, 1994]. Cette succion génère des contraintes internes dans le matériau qui conduisent à sa rupture une fois qu'elles dépassent sa résistance à la traction [Eid, 2016].

Les densités de retrait global (GSR) des échantillons de montmorillonite sont présentées dans le Tableau 8. Pour les échantillons d'épaisseur 8 mm, la densité de retrait global des échantillons B5 et B6 (bases rugueuse et mi-rugueuse) est de 30 % alors que celle des échantillons B7 et B8 (base lisse) est de 45 %. De la même façon que la kaolinite, le retrait global dans les échantillons de montmorillonite diminue lorsque l'effet des conditions aux limites devient plus important. Par ailleurs, les échantillons B9, B10, B11 et B12 d'épaisseur 16 et 32 mm (base lisse) ont subi un retrait global supérieur à ceux d'épaisseur 8 mm, avec une densité de retrait global variant entre 50 et 55 %. Ces observations confirment également l'effet des conditions aux limites ainsi que de l'épaisseur des échantillons sur le retrait global des argiles lors de la dessiccation.

En outre, on remarque que la densité de retrait global des échantillons de montmorillonite (qui varie entre 30 et 55 %) est largement supérieure à celle des échantillons de kaolinite (qui varie entre 4 et 11 %). Cette différence indique l'effet important de la constitution minéralogique du matériau sur son comportement de retrait au cours de la dessiccation. De même, cet effet est observé à travers le nombre des fissures de chacune de ces deux argiles.

Echantillon(s)	Type de base	Epaisseur	GSR
B5	rugueuse	8 mm	30 %
B6	mi-rugueuse	8 mm	32 %
B7 et B8	lisse	8 mm	45 %
B9	lisse	16 mm	50 %
B10, B11 et B12	lisse	32 mm	55 %

Tableau 8: Densité de retrait global (GSR) des échantillons de montmorillonite.

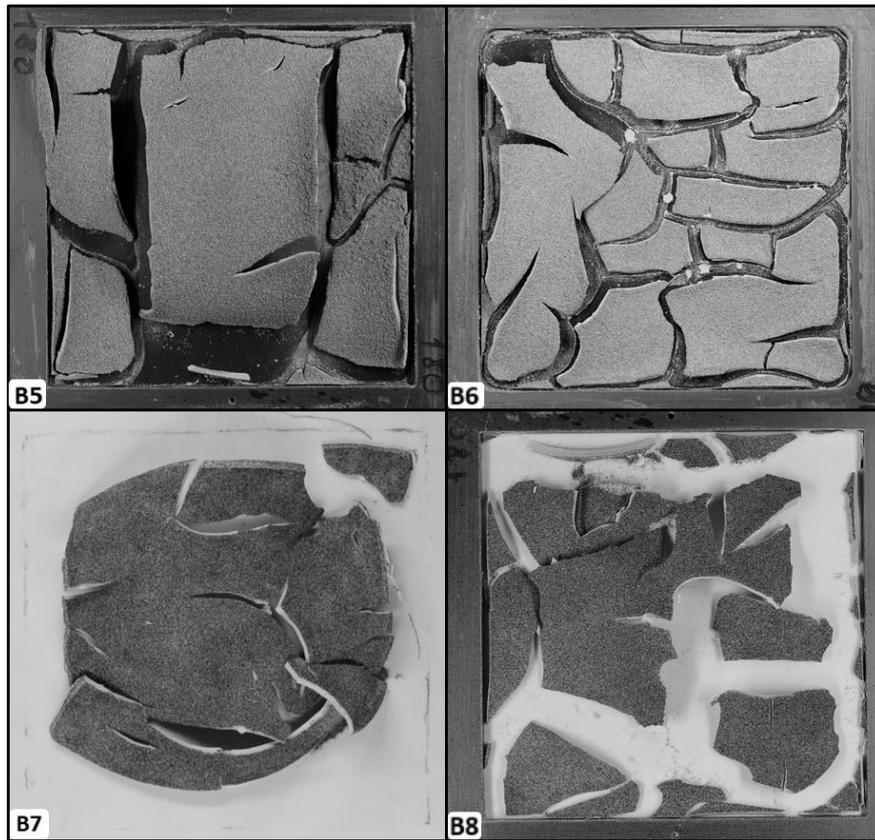


Figure 68(a) : Etat final des échantillons de montmorillonite ayant une épaisseur de 8 mm (après dessiccation).

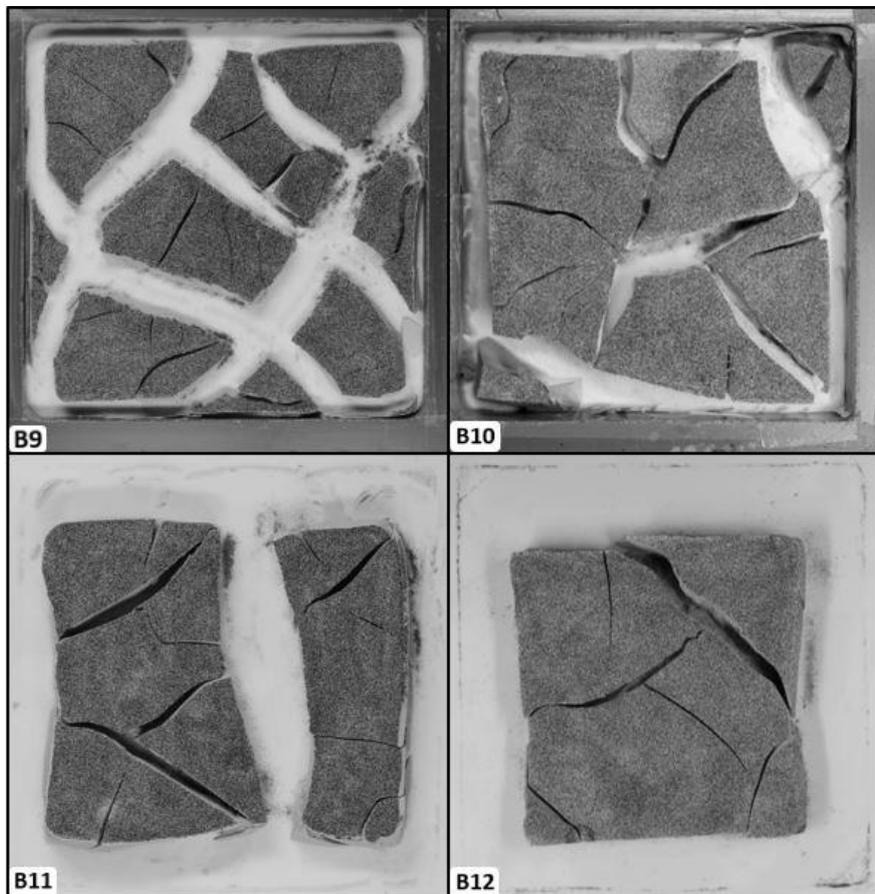


Figure 68(b) : Etat final des échantillons de montmorillonite ayant une épaisseur de 16 mm et de 32 mm (après dessiccation)

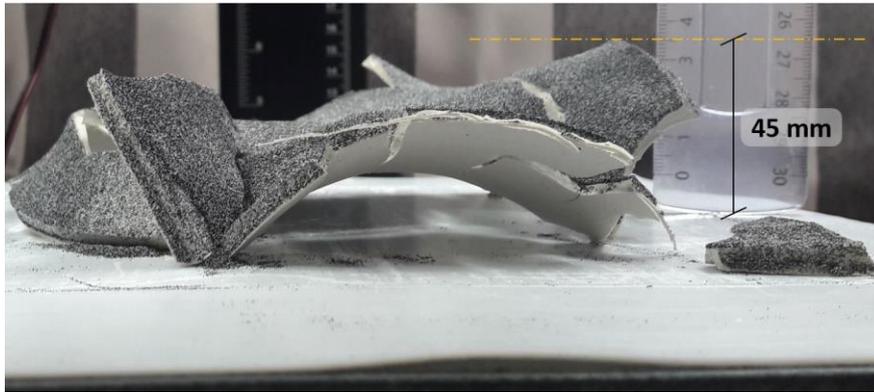


Figure 68(c) : Fléchissement de la montmorillonite. Exemple du cas de l'échantillon B7.

III.3.3. Analyse du champ de déformation pré-fissuration

Dans le but de fournir une analyse plus détaillée de la déformation lors de la dessiccation des argiles, nous avons procédé à l'analyse du champ de déformations des essais de retrait libre dès le début du séchage et jusqu'à l'apparition des discontinuités.

III.3.3.1. Cas de la kaolinite

La visualisation du champ de déformations principales majeures et mineures dans l'échantillon B1 (base rugueuse) lors de l'initiation de la première fissure est présentée dans la Figure 69. On remarque que la première fissure est amorcée à une déformation principale majeure $\epsilon_1 = 4.6 \%$ (Figure 69(a)). Cependant, cette valeur n'est pas maximale par rapport à d'autres zones non fissurées (9.4 %). Ceci signifie que l'amplitude de la déformation principale majeure locale n'est pas celle qui a conduit à la rupture du matériau puisqu'il est encore capable de supporter une déformation supérieure à 4.6 %. En analysant la déformation principale mineure (Figure 69(b)), on constate que la première fissure s'est ouverte pour une déformation $\epsilon_2 = 1.5 \%$, qui correspond à la déformation maximale sur toute la surface de l'échantillon à cet instant. Notons que les déformations positives / négatives signifient que l'échantillon est en extension (traction) / compression, respectivement, dans la zone considérée.

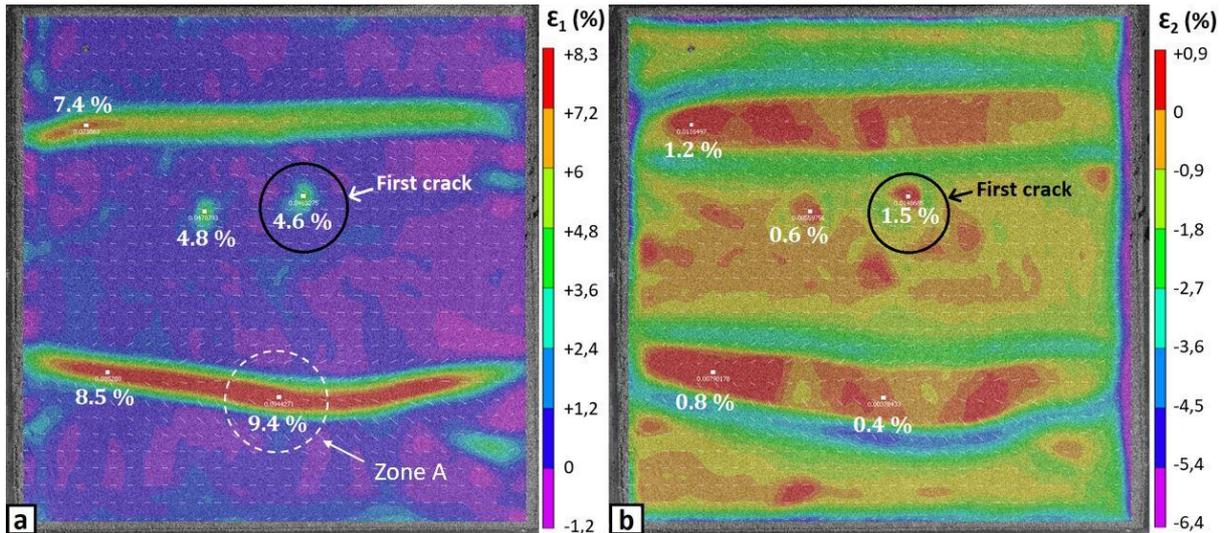


Figure 69: Champ de déformation dans l'échantillon B1 lors de l'initiation de la première fissure :
 (a) Déformation principale majeure ; (b) Déformation principale mineure.

De même, nous avons analysé les déformations de cisaillement ϵ_{xy} dans l'échantillon B1. La Figure 70 montre la visualisation du champ de déformations de cisaillement ϵ_{xy} lors de l'initiation de la première fissure. On observe une concentration significative de ces déformations dans les zones d'initiation des deux premières fissures. Par ailleurs, en analysant ces déformations de cisaillement de part et d'autre de l'ouverture de la fissure représentée par la ligne jaune discontinue sur la figure, on peut remarquer que le signe de la déformation de cisaillement change. Ceci pourrait signifier que l'ouverture de cette fissure se fait par cisaillement (mode II).

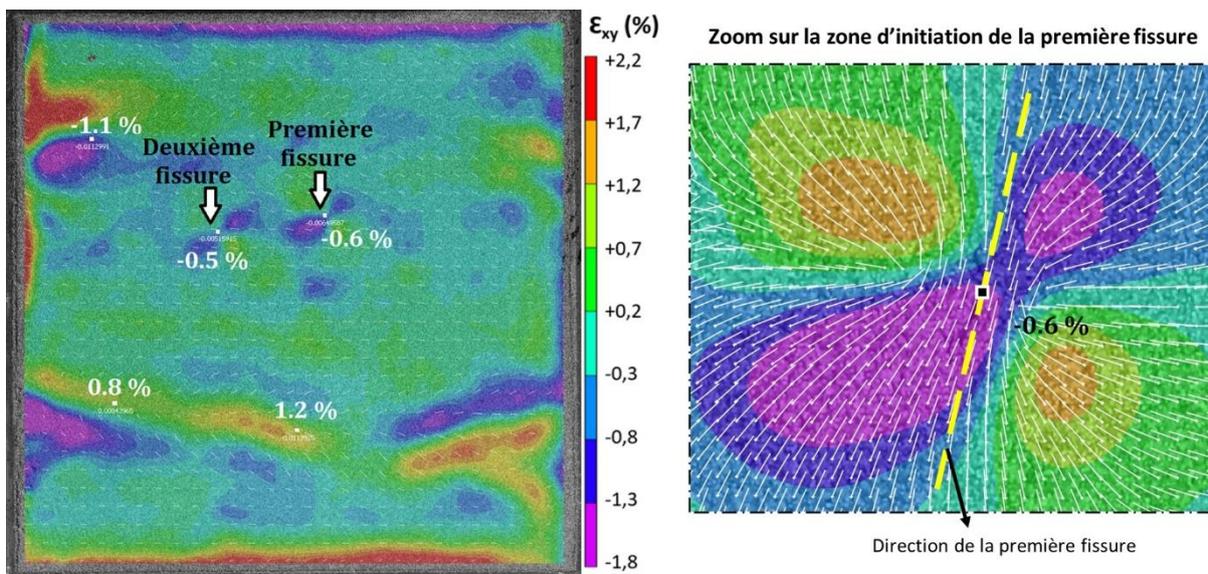


Figure 70: Champ de déformations tangentielles ϵ_{xy} dans l'échantillon B1 lors de l'initiation de la première fissure

Par ailleurs, nous avons étudié à l'aide de l'analyse DIC l'influence de l'initiation de cette fissure sur ses environnements proche et lointain. La première fissure dans l'échantillon B1 est apparue à une teneur en eau globale dans l'échantillon de 37 %. D'après les courbes de rétention de la kaolinite P300 (Figure 16), cette teneur en eau correspond à une succion de l'ordre de 50 kPa. Etant donné que la pression de désaturation de cette argile est de l'ordre de 1500 kPa ($w = 25\%$), on remarque que la fissuration de la kaolinite se produit alors que le matériau est encore saturé en eau. La Figure 71 présente l'évolution de la déformation principale majeure dans un environnement d'environ 25 mm autour du point d'initiation de la première fissure. On observe que le pic de la déformation dans cette zone subit un léger décalage au cours du séchage, de la droite vers la gauche. Néanmoins, les vecteurs de déplacement, représentés par les flèches de couleur blanche, indiquent un retrait dans cette zone de la gauche vers la droite.

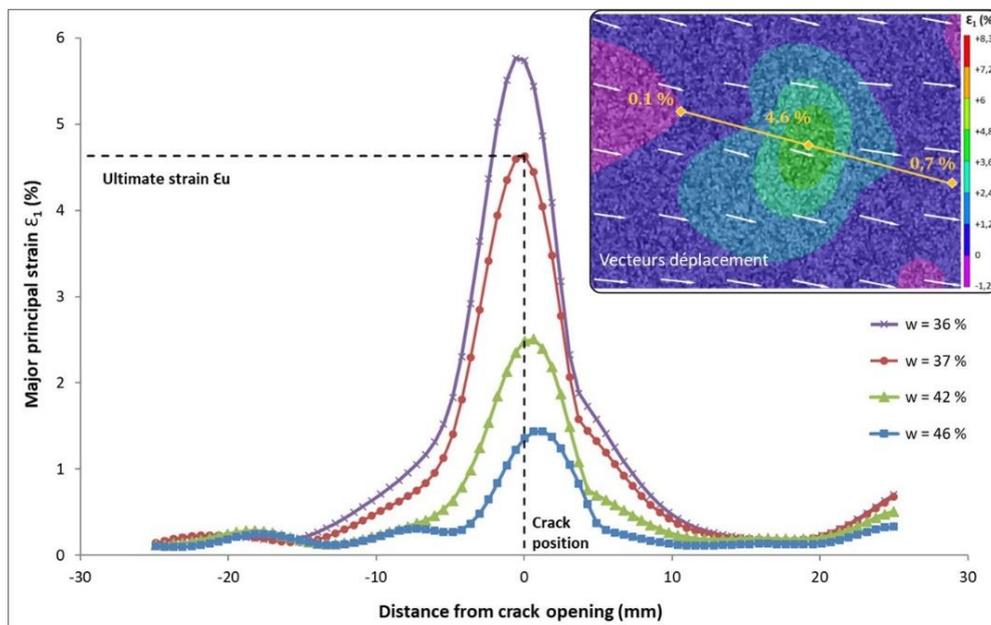


Figure 71: Evolution de la déformation locale dans l'échantillon B1 au cours du séchage.

Pour mettre en évidence l'effet d'une fissure sur son environnement lointain, nous avons étudié l'évolution du pic de la déformation principale majeure, au niveau du point de l'initiation de la première fissure et dans le point au centre de la zone A (identifiée sur la Figure 69(a)), au cours de la dessiccation (Figure 72(a)). La zone A représente la zone la plus sollicitée dans l'échantillon B1 ($\epsilon_1 = 9.4\%$) au moment de l'initiation de la première fissure. Néanmoins, cette zone ne s'est pas fissurée au cours de la dessiccation. On remarque que la déformation locale au centre de la zone A a commencé à se détendre au moment de l'apparition de la première fissure, malgré que cette zone soit située à une distance de 8 cm de la fissure. La Figure 72(b) présente l'évolution de la déformation moyenne dans l'échantillon B1 au cours du séchage. La

déformation moyenne correspond à la valeur moyenne des déformations principales majeures calculées sur toute la surface de l'échantillon. On observe également que l'apparition de la première fissure a ralenti la déformation moyenne dans tout l'échantillon momentanément. Ceci indique que la fissuration du matériau en un point donné permet de détendre la déformation moyenne dans tout l'échantillon.

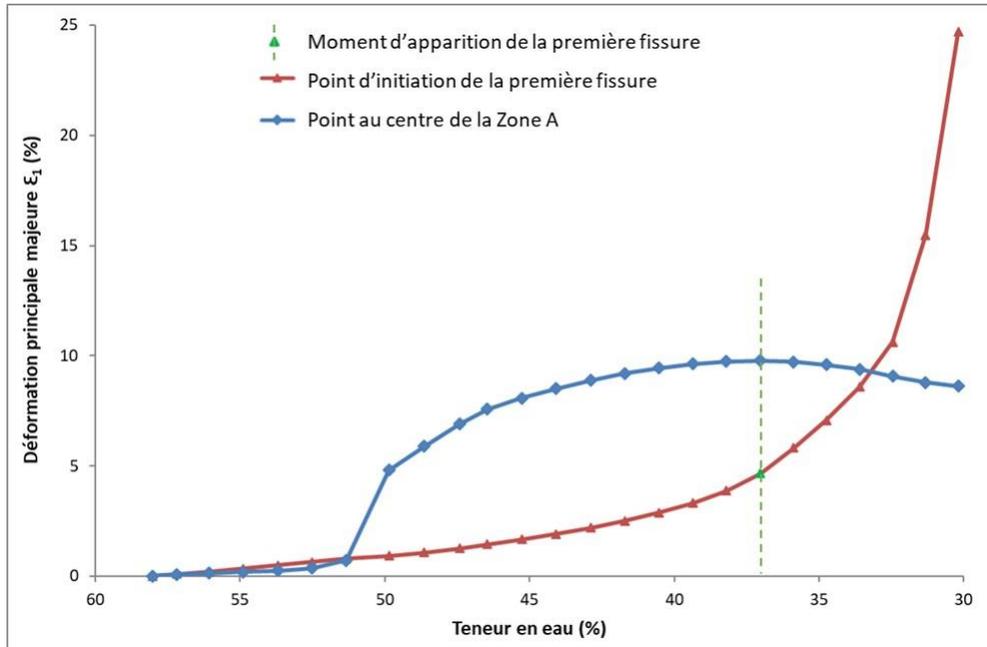


Figure 72(a): Evolution des déformations locales dans l'échantillon B1 au cours du séchage.

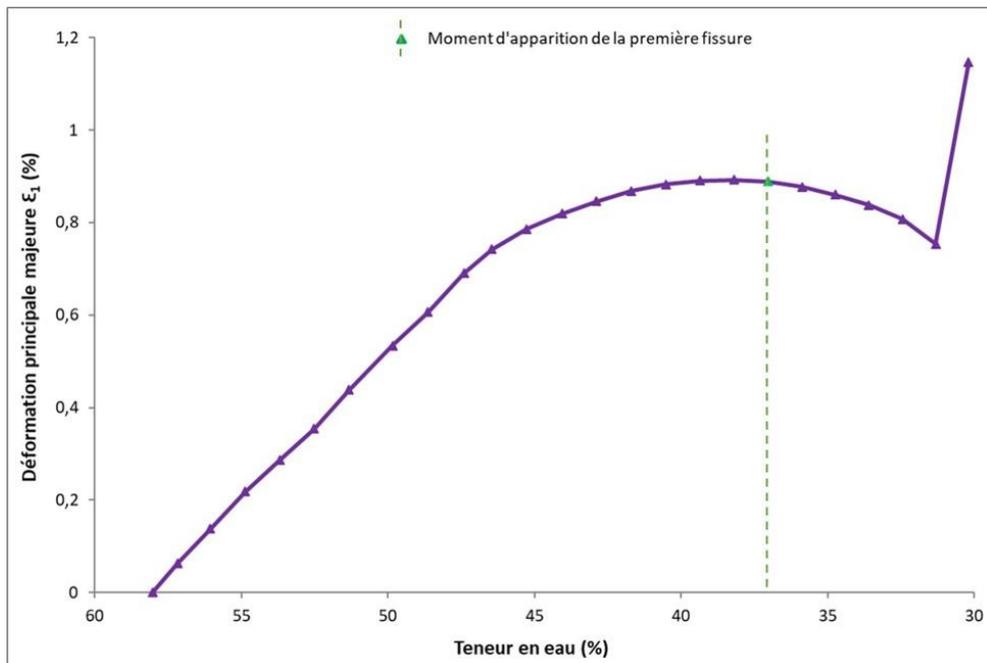


Figure 72(b): Evolution de la déformation moyenne dans l'échantillon B1 au cours du séchage.

III.3.3.2. Cas de la montmorillonite

III.3.3.2.1. Base rugueuse

La visualisation du champ de déformations principales majeures et mineures dans l'échantillon B5 (base rugueuse) lors de l'initiation de la première fissure est présentée dans la Figure 73. On remarque que la première fissure est amorcée à une déformation principale majeure de 11.5 % (Figure 73(a)). Comme cette déformation correspond à la déformation maximale sur toute la surface de l'échantillon à cet instant, on peut déduire que la rupture du matériau est provoquée par l'amplitude la déformation principale majeure. Par ailleurs, on observe que la déformation principale mineure est quasiment nulle dans le point d'initiation de la première fissure à cet instant (Figure 73(b)).

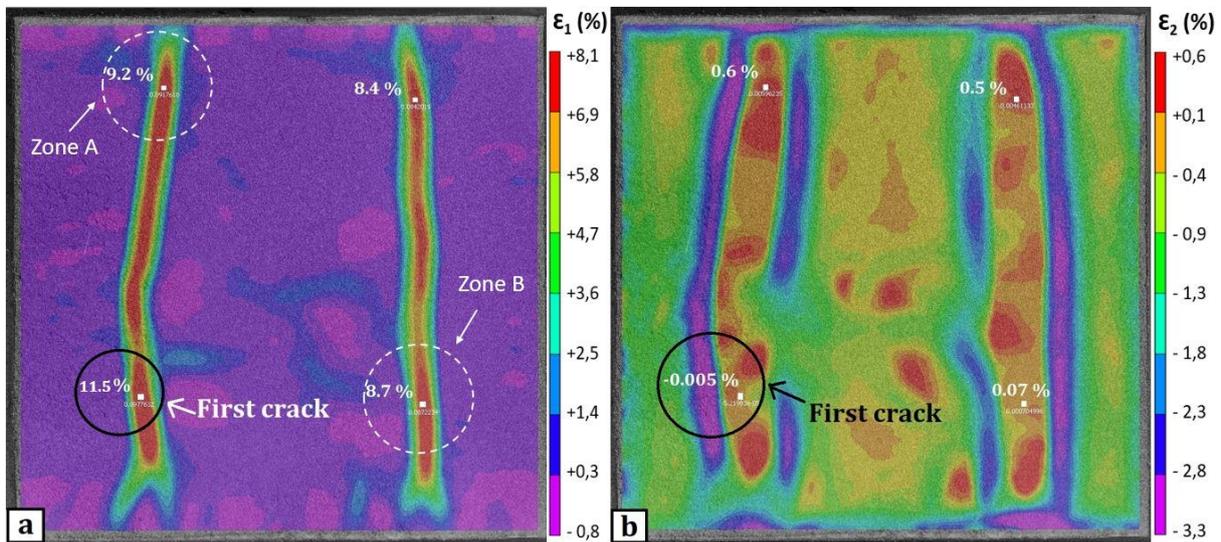


Figure 73: Champ de déformation dans l'échantillon B5 lors de l'initiation de la première fissure :

(a) Déformation principale majeure ; (b) Déformation principale mineure.

La Figure 74 montre l'orientation des déformations principales majeures et des vecteurs de déplacement dans la zone d'initiation de la première fissure dans l'échantillon B5. Dans la zone d'extension (couleur rouge vif), on observe une orientation perpendiculaire des déformations principales majeures par rapport à la direction de la première fissure. De même, on remarque que les vecteurs de déplacement aux extrémités de cette zone sollicitée (bandes de couleurs verte et bleue) ont une direction quasiment perpendiculaire à la fissure, orientés en sens opposés de part et d'autre à celle-ci. Ceci indique que la première fissure dans cet échantillon s'est ouverte selon le mode I (traction simple), lorsque le matériau a atteint sa résistance à la traction.

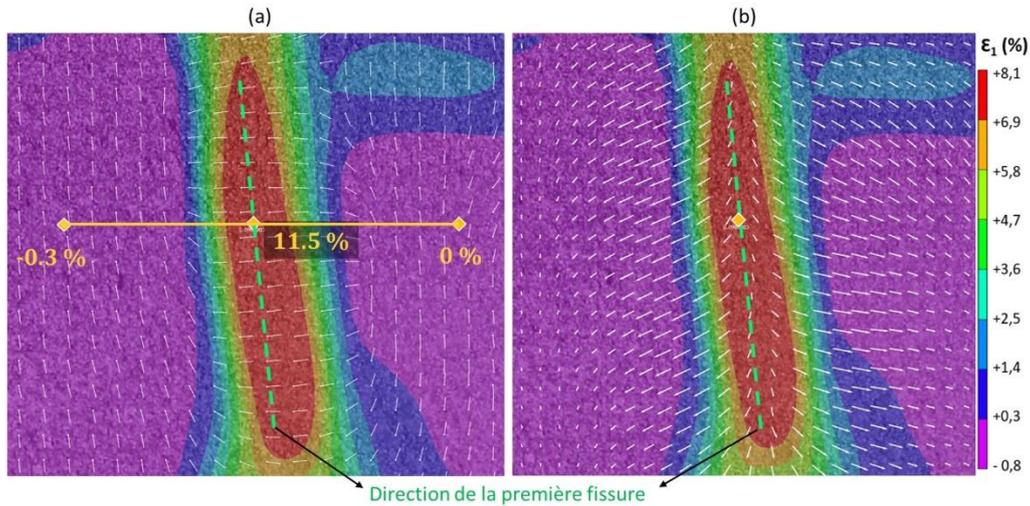


Figure 74: (a) Orientation des déformations principales majeures ; (b) Orientation des vecteurs de déplacement ; dans la zone d'initiation de la première fissure dans l'échantillon B5.

Par ailleurs, l'influence de l'initiation de cette fissure sur ses environnements proche et lointain est également étudiée. La première fissure dans l'échantillon B5 est apparue à une teneur en eau moyenne dans l'échantillon de 170 %. D'après les courbes de rétention de la montmorillonite calcique grecque (Figure 51), cette teneur en eau correspond à une succion de l'ordre de 10 kPa. Etant donné que la pression de désaturation de cette argile est de 1500 kPa ($w = 40\%$), on remarque que la fissuration de la montmorillonite se produit alors que le matériau est encore saturé en eau. La Figure 75 présente l'évolution de la déformation principale majeure dans un environnement d'environ 25 mm autour du point d'initiation de la première fissure. On observe que le pic de la déformation dans cette zone reste fixe au cours du séchage.

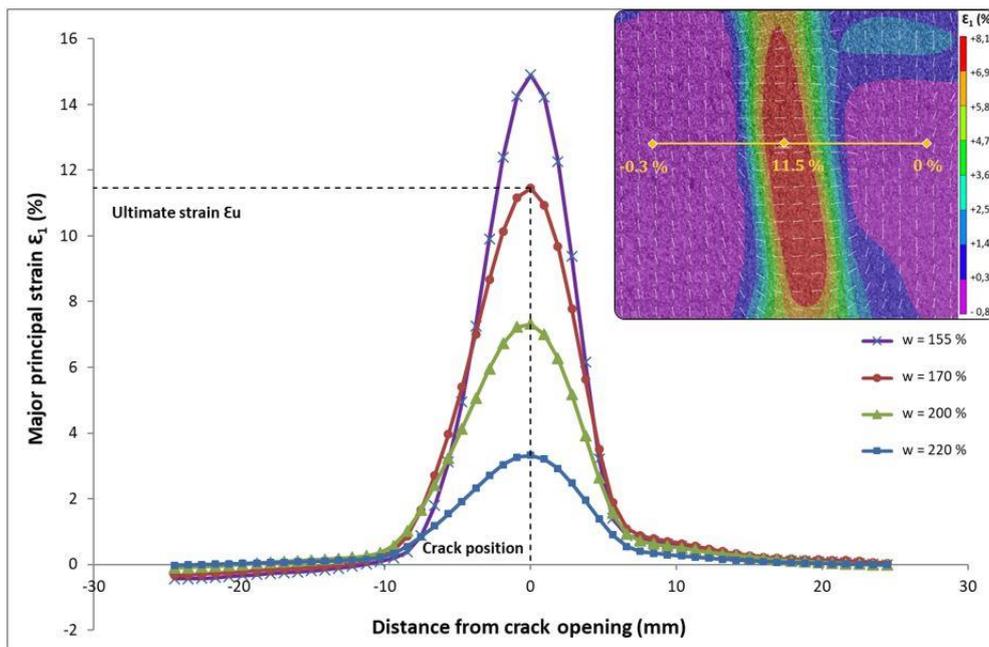


Figure 75: Evolution de la déformation locale dans l'échantillon B5 au cours du séchage.

Pour mettre en évidence l'effet d'une fissure sur son environnement lointain, nous avons analysé l'évolution du pic de la déformation principale majeure, au niveau du point d'initiation de la première fissure et au niveau des points aux centres des zones A et B, au cours de la dessiccation (Figure 76(a)). Les zones A et B, identifiées dans la Figure 73(a), représentent respectivement la deuxième zone ($\epsilon_1 = 9.2 \%$) et la troisième zone ($\epsilon_1 = 8.7 \%$) les plus sollicitées dans l'échantillon B5 au moment d'initiation de la première fissure. Notons que toutes ces zones ont fissuré à la fin de la dessiccation. On remarque que la déformation locale évolue de façon similaire dans les trois points étudiés, sans montrer un effet particulier de l'apparition de la première fissure sur les autres zones sollicitées. La Figure 76(b) présente l'évolution de la déformation moyenne dans l'échantillon B5 au cours du séchage. Rappelons que la déformation moyenne correspond à la valeur moyenne des déformations principales majeures calculées sur toute la surface de l'échantillon. Aucun effet particulier de l'apparition de la première fissure n'est observé sur la déformation moyenne dans l'échantillon B5. L'indépendance de l'évolution de la déformation moyenne dans l'échantillon par rapport à la déformation locale dans le cas de la montmorillonite, contrairement à ce qui a été observé pour la kaolinite, met en évidence le rôle joué par la plasticité du matériau dans la dissipation de l'énergie après la rupture.

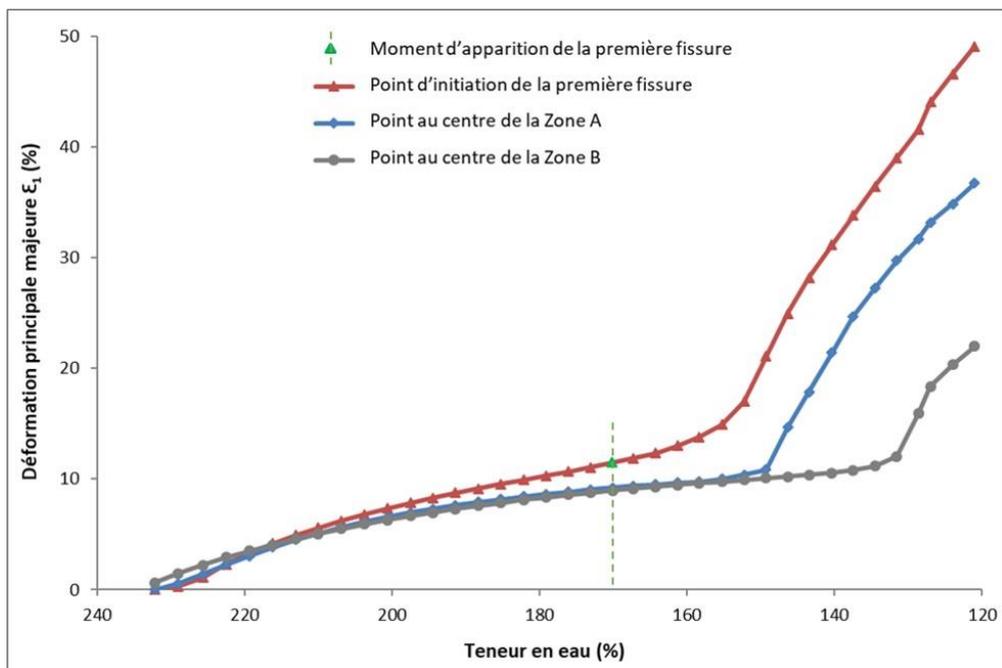


Figure 76(a): Evolution des déformations locales dans l'échantillon B5 au cours du séchage.

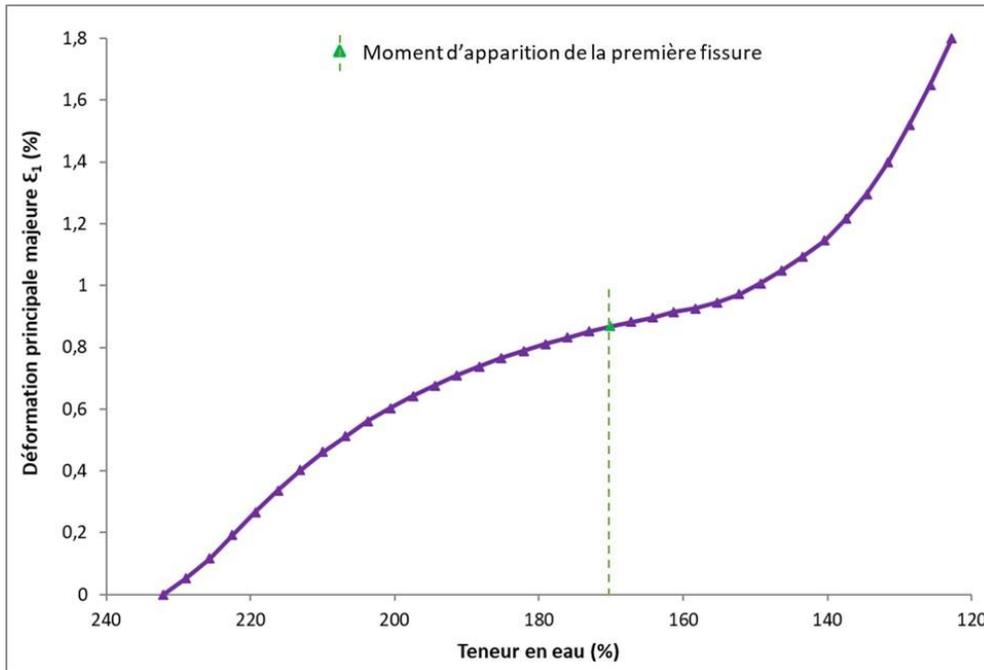


Figure 76(b): Evolution de la déformation moyenne dans l'échantillon B5 au cours du séchage.

III.3.3.2.2. Base lisse

Dans les échantillons de montmorillonite ayant une base lisse (support Téflon), les frottements sol/support sont considérés comme négligeables. Malgré cela, on observe une fissuration par dessiccation dans le cas des échantillons EchB7 à EchB12.

Pour les échantillons d'épaisseur 8 mm (EchB7 et EchB8) et 16 mm (EchB9), la première fissure est apparue à des teneurs en eau relativement élevées (entre 190 % et 170 %), ce qui correspond à des faibles succions (entre 5 kPa et 10 kPa). Rappelons que la succion de désaturation de la montmorillonite est de 1500 kPa. Ainsi, nous avons étudié à l'aide de l'analyse DIC l'état de déformation du matériau lors de l'initiation de ces fissures, afin de comprendre les mécanismes de fissuration dans ces échantillons. La Figure 77 présente le champ de déformations de cisaillement ϵ_{xy} dans l'échantillon EchB7 lors de l'apparition des deux premières fissures. On observe une concentration particulière de ces déformations dans les zones d'initiation des deux premières fissures. En outre, en zoomant sur la zone d'apparition de la première fissure, on remarque que les déformations principales majeures, représentées en tirées blanches, sont orientées dans la direction perpendiculaire (direction X) par rapport à cette fissure, alors que ces déformations sont parallèles (direction Y) dans l'espace avoisinant (à gauche de la fissure). Ceci indique que ces deux fissures sont provoquées par l'amplitude des déformations de cisaillement générées lors du retrait de la montmorillonite.

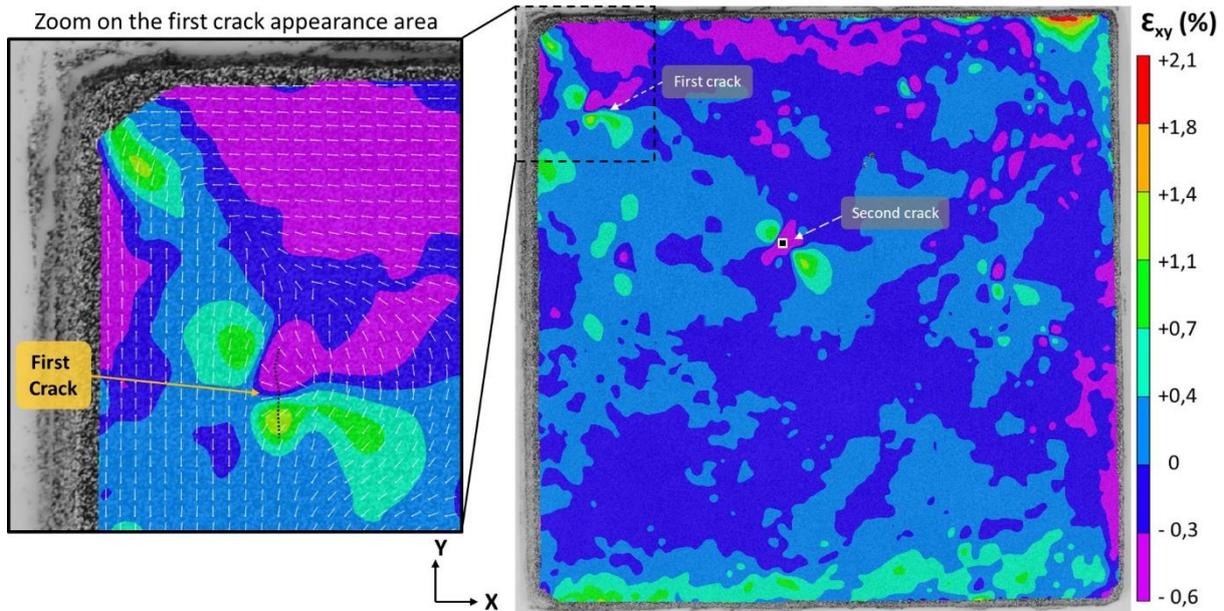


Figure 77: Champ de déformations de cisaillement dans l'échantillon B7 lors de l'apparition des deux premières fissures.

Par ailleurs, dans le cas de l'échantillon B9, le champ du déplacement dans la direction X montre un retrait différentiel au niveau du point d'initiation de la première fissure (Figure 78). Un retrait différentiel est défini par un retrait important avoisinant un retrait très faible dans une même zone sélectionnée. On remarque que les vecteurs déplacements, représentés par des flèches de couleur blanche, sont plus intenses dans la partie supérieure du point d'initiation de la fissure, que dans la partie inférieure. Ce retrait différentiel a généré des déformations de cisaillement qui ont provoqué la rupture du matériau, une fois qu'il a atteint sa déformation ultime. Ceci indique que l'initiation de cette fissure s'est produite selon de mode de glissement (mode II). De même, l'analyse de l'état de déformation des autres fissures dans cet échantillon a montré le même mécanisme de fissuration (mode II). Par conséquent, on peut définir la déformation de cisaillement au point d'initiation de ces fissures (ϵ_{xy} entre 1 % et 3 %) comme déformation ultime aboutissant à la fissuration du matériau lorsqu'il est soumis à une contrainte de cisaillement. Cette déformation ultime de cisaillement (de l'ordre de 1 %) est largement inférieure à la déformation ultime de traction (de l'ordre de 10 %), du même matériau, observée dans le paragraphe III.3.3.2.1 (Figure 73). Ceci est due au fait que la contrainte nécessaire pour arracher les particules d'argiles est beaucoup plus importante que celle nécessaire pour les glisser les unes contre les autres [Wei, 2016].

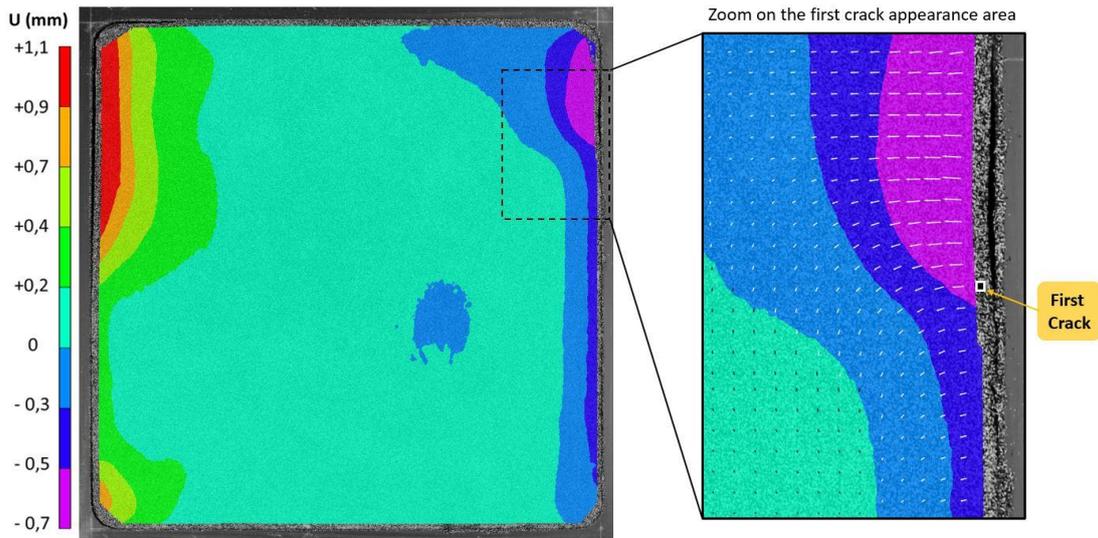


Figure 78: Champ du déplacement dans la direction X dans l'échantillon B9 lors de l'apparition de la première fissure.

Par ailleurs, pour les échantillons de montmorillonite d'épaisseur 32 mm (EchB10 à EchB12), la première fissure est apparue généralement à des teneurs en eau moyennes relativement faibles (entre 60 % et 30 %), ce qui correspond à des succions moyennes importantes (entre 1 MPa et 40 MPa). Ceci révèle également l'effet de l'épaisseur de l'échantillon sur sa fissuration lors de la dessiccation. Les Figures 79(b) et 80(b) montrent l'orientation des déformations principales majeures et mineures dans l'échantillon B12 juste avant l'apparition de la première fissure, à une teneur en eau de 32 % (correspondant à une succion de 35 MPa). On remarque que les déformations principales majeures sont orientées dans la direction perpendiculaire aux axes du repère cartésien qui a pour origine le centre de l'échantillon, tandis que les déformations principales mineures sont orientées dans la direction parallèle à ces axes.

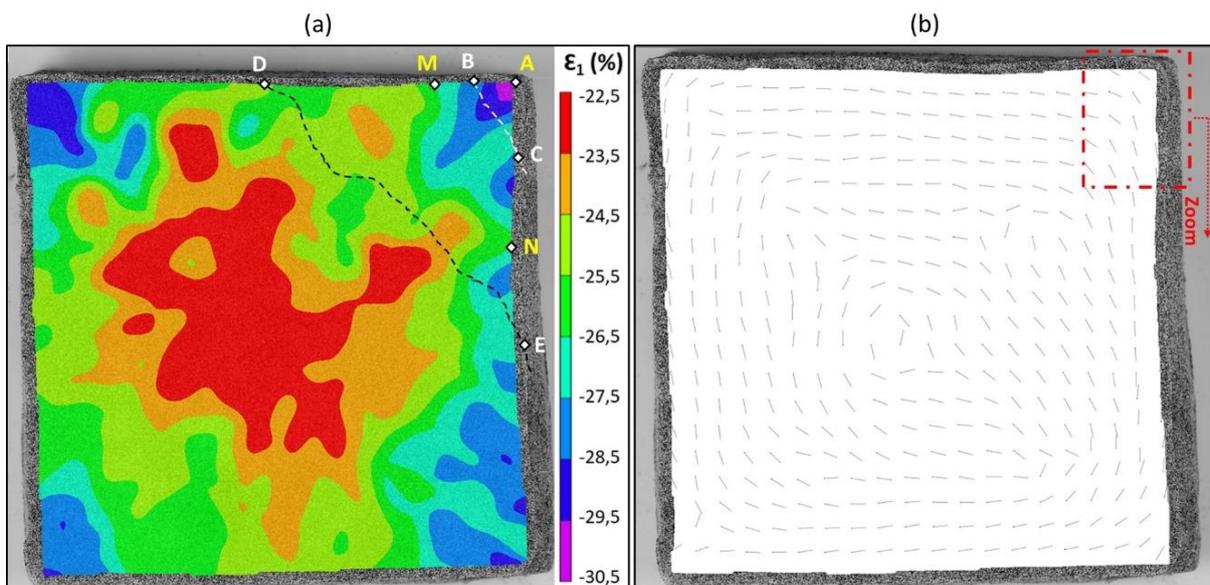


Figure 79: (a) Champ de déformations principales majeures; (b) Orientation des déformations principales majeures; dans l'EchB12.

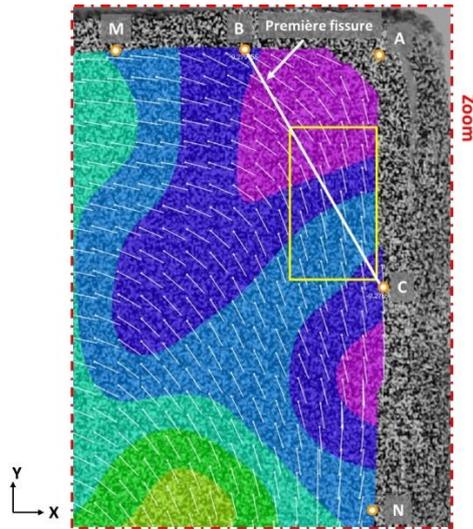


Figure 79(c): Orientation des déformations principales majeures dans l'EchB12 (Zoom sur la zone d'apparition de la première fissure (Zone ABC)).

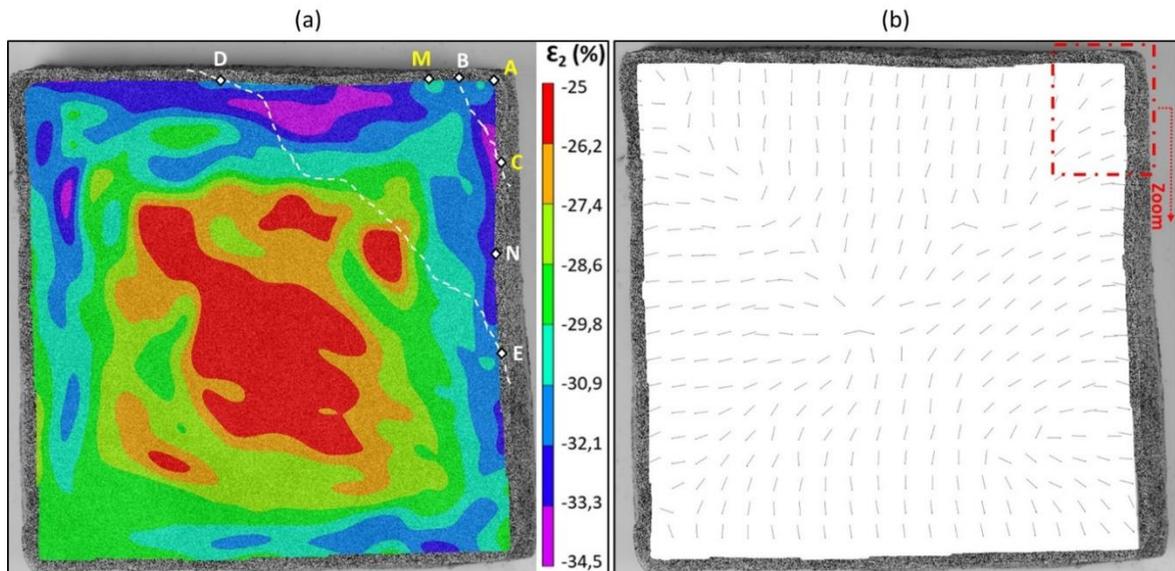


Figure 80: (a) Champ de déformations principales mineures; (b) Orientation des déformations principales mineures; dans l'EchB12.

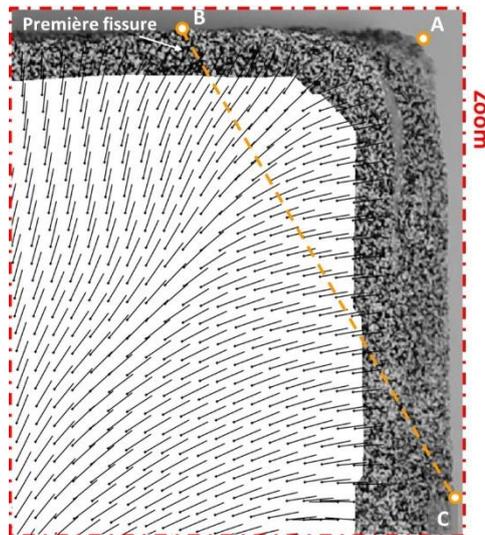


Figure 80(c): Orientation des déformations principales mineures dans l'EchB12 (Zoom sur la zone d'apparition de la première fissure (Zone ABC)).

Les Figures 79(a) et 80(a) présentent respectivement les champs de déformations principales majeures et principales mineures dans l'échantillon B12, juste avant l'apparition de la première fissure BC.

Dans la Figure 79(a), on observe que la zone ABC, marquée en couleurs violette et bleue foncée, représente la partie la plus comprimée dans l'échantillon ($-30.5 \% < \epsilon_1 < -28.5 \%$). Si on analyse un échantillon élémentaire représenté par le rectangle jaune (Figure 79(c)), celui-ci est soumis à des déformations de compression dans la direction Y, ce qui pourrait expliquer l'apparition d'un plan de cisaillement incliné selon la direction de l'apparition de la fissure, conformément à un critère de rupture de type Mohr-Coulomb. Ceci est confirmé dans la Figure 81 qui montre l'évolution des déformations de cisaillement ϵ_{xy} le long des droites AM et AN. Dans cette Figure, on observe des pics de déformations de cisaillement ϵ_{xy} aux milieux de AM et AN.

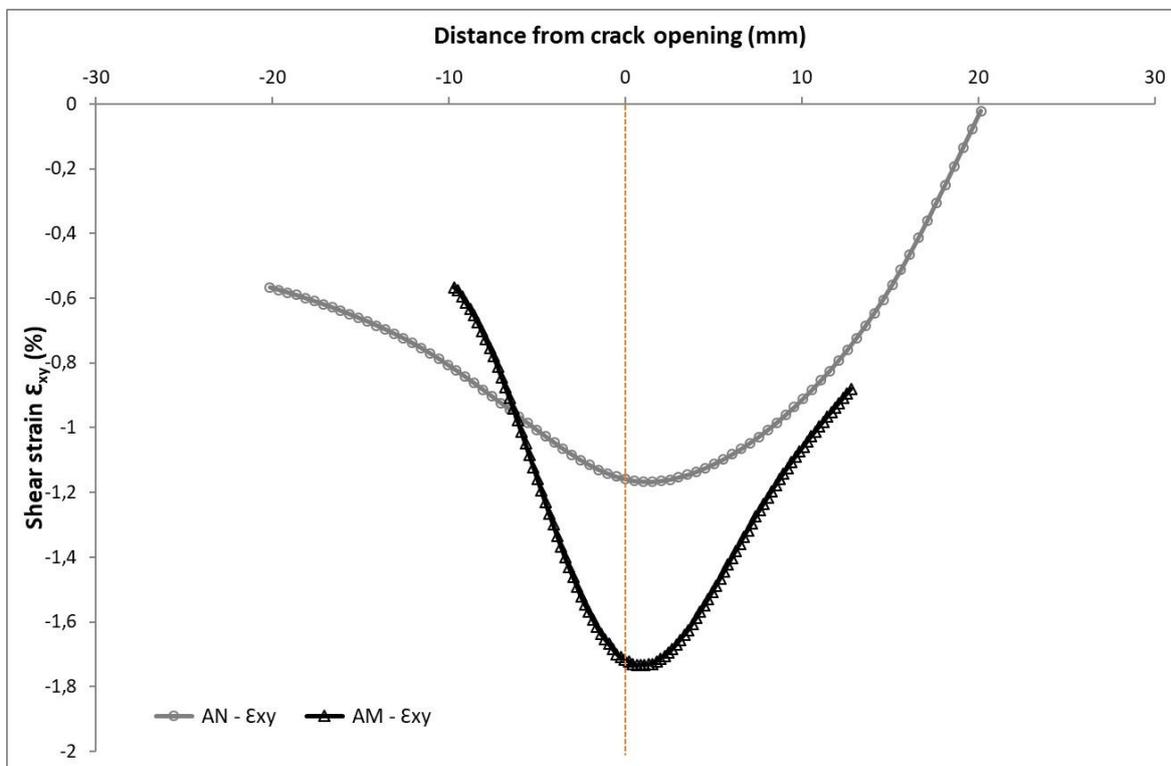


Figure 81: Déformations locales aux extrémités de la fissure BC dans l'EchB12.

L'apparition des fissures de dessiccation au niveau des coins de l'échantillon B12 indique que les coins d'un échantillon rectangulaire constituent des zones singulières favorisant la fissuration du matériau lors d'un essai de retrait libre. Ceci est également observé dans le cas de l'échantillon B10. Pour cette raison, nous avons privilégié le choix d'un modèle expérimental axisymétrique pour la suite de nos études.

III.3.4. Stéréo-corrélation (3D)

Dans le but d'étudier le degré d'isotropie du retrait lors de la dessiccation des argiles et son influence sur la fissuration du matériau, nous avons étudié, en plus des déformations principales dans le plan (X,Y), la déformation verticale ϵ_z sur la surface supérieure de certains essais de retrait libre.

La Figure 82 présente les champs de déformations verticales et de déformations principales mineures dans l'échantillon B4 à la fin du processus de séchage. On remarque que les déformations verticales sont plus importantes que les déformations dans le plan, ce qui reflète une anisotropie importante sur toute la surface de l'échantillon. De même, les déformations dans le plan semblent être plus homogènes que les déformations verticales.

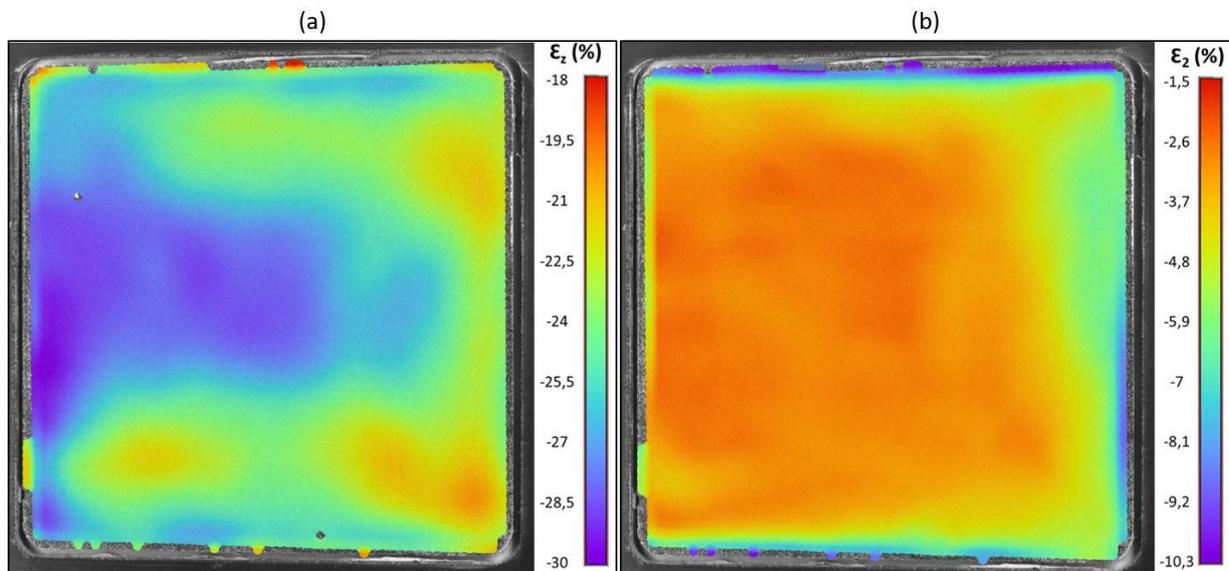


Figure 82: (a) Champ de déformations verticales ; (b) Champ de déformations principales mineures ; dans l'échantillon B4 à la fin du séchage.

La Figure 83 présente les champs de déformations verticales et de déformations principales mineures dans l'échantillon B11 juste avant l'apparition de la première fissure. On observe que l'échantillon présente une anisotropie (rapport entre la déformation verticale et la déformation dans le plan) très faible aux bords latéraux par rapport à son centre. Ceci peut être dû à l'absence du cadre tout autour de cet échantillon, qui permet aux bords latéraux d'être en contact avec l'air ambiant. En revanche, on trouve que la déformation verticale ϵ_z à droite de la première fissure (de l'ordre de 20 %) est plus importante que dans la partie à gauche (de l'ordre de 15%). Cette différence peut être due à un flux de chaleur dans le côté droit plus important que dans le côté gauche. De même, les déformations dans le plan ne montrent aucune concentration particulière des déformations au niveau de la fissure. Ceci révèle une possibilité d'avoir un cisaillement vertical au niveau de la première fissure. Dans ce cas, l'initiation de la fissure s'est

peut-être produite selon le mode de déchirement (mode III). Un schéma descriptif de ce mode de fissuration est présenté dans la Figure 83(c). Ce mode de fissuration est également observé par Wei et al. [Wei, 2016] sur des essais de retrait libre d'une kaolinite. Notons que la déformation verticale atteinte à la fin du séchage dans l'échantillon B11 est d'environ 45 %. Ceci met en évidence l'importance d'étudier la déformation verticale ϵ_z lors d'un essai de retrait libre.

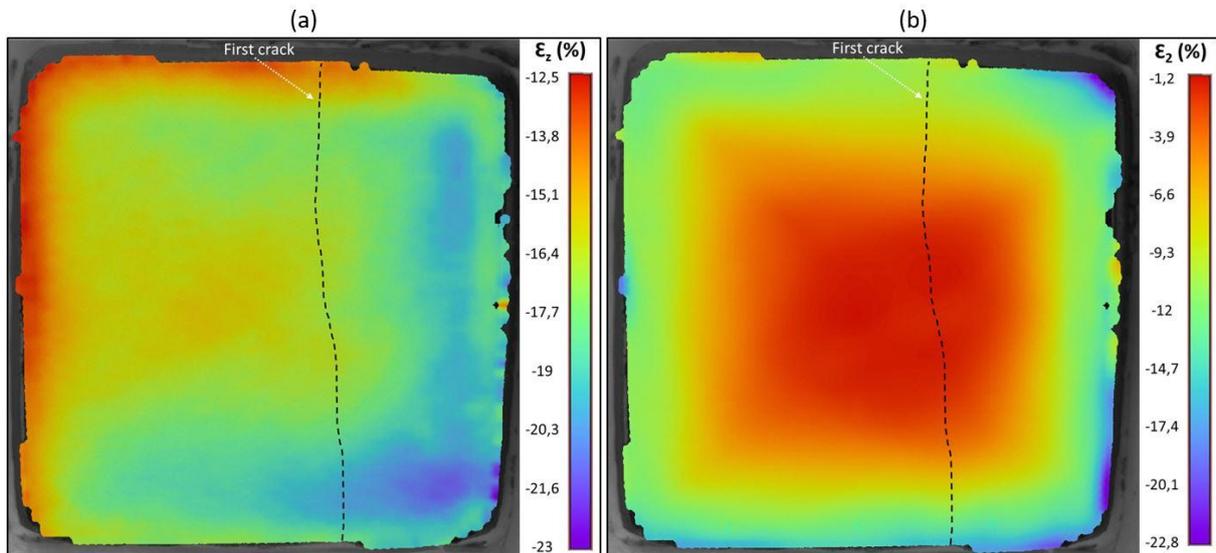


Figure 83: (a) Champ de déformations verticales ; (b) Champ de déformations principales mineures ; dans l'échantillon B11 juste avant l'apparition de la première fissure.

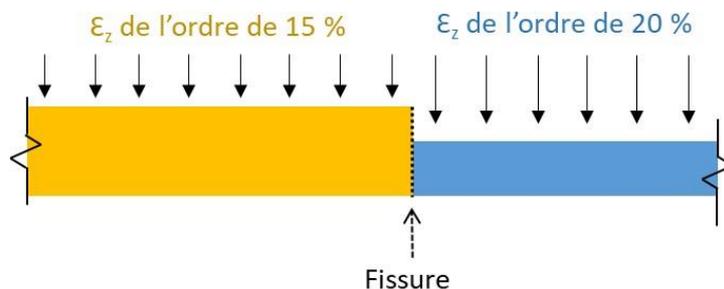


Figure 83(c): Schéma descriptif d'une fissuration selon le mode de déchirement (mode III).

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet des conditions aux limites (rugosité des supports), des caractéristiques intrinsèques du matériau (minéralogie) et de l'épaisseur de l'échantillon sur la fissuration par dessiccation dans les argiles.

L'analyse de la fissuration a mis en évidence l'effet des conditions aux limites. Cet effet est identifié à partir de l'apparition des fissures uniquement dans le cas d'une base rugueuse pour les échantillons de kaolinite d'épaisseur 8 mm. D'autre part, l'absence des fissures dans le cas

d'une base rugueuse pour l'échantillon de kaolinite d'épaisseur 32 mm a révélé que l'épaisseur de l'échantillon joue un rôle majeur dans les mécanismes de retrait. En outre, la fissuration des échantillons de montmorillonite indépendamment des conditions aux limites et de l'épaisseur de l'échantillon, indique que la minéralogie du matériau a un effet dominant sur les mécanismes de retrait, comparé à la rugosité des supports et à l'épaisseur de l'échantillon. De même, nous avons trouvé que le retrait global dans l'échantillon diminue lorsque les conditions aux limites (rugosité de la base) deviennent plus importantes, alors qu'il augmente en fonction de l'épaisseur de l'échantillon.

L'analyse des champs de déformation pré-fissuration a montré que l'initiation de la fissure dans une argile lors d'un essai de retrait libre peut se produire suivant le mode d'ouverture (mode I), suivant le mode de glissement (mode II), suivant le mode mixte d'ouverture/glissement (modes I et II) ou suivant le mode de déchirement (mode III). Un tableau récapitulatif de ces différents modes de fissuration est présenté ci-dessous (Tableau 9). Dans ces modes de fissuration, les sollicitations présentes peuvent être de la traction, du cisaillement, ou d'une combinaison de la traction et du cisaillement.

Echantillon	Mode de fissuration	Type de sollicitation
B1	mode I/II	traction + cisaillement
B5	mode I	traction
B9	mode II	cisaillement
B11	mode III	cisaillement

Tableau 9: Différents modes de fissuration observés dans le Chapitre 3.

En revanche, l'apparition de la première fissure à des faibles succions (entre 5 kPa et 10 kPa) dans les échantillons de montmorillonite d'épaisseur 8 mm et 16 mm, contrairement aux échantillons d'épaisseur 32 mm dans lesquels la première fissure est apparue à des succions importantes (entre 1 MPa et 40MPa) confirme l'effet important de l'épaisseur de l'échantillon sur la fissuration des argiles.

L'analyse de la stéréo-corrélation (en 3D) a montré que les déformations verticales ne peuvent pas être négligées lors de l'étude du champ de déformation dans le retrait libre des argiles. De même, l'analyse en 3D a indiqué que l'absence d'un cadre tout autour de l'échantillon permet de réduire l'anisotropie (rapport entre la déformation verticale et la déformation dans le plan) aux bords latéraux de l'échantillon.

Chapitre IV : Retrait empêché : Essai à l’anneau ASTM

Après avoir étudié, dans le chapitre précédent, le champ de déformations à travers le retrait libre des argiles, nous tenterons dans ce chapitre de remonter aux contraintes générées dans le matériau durant la dessiccation à travers la méthode de retrait empêché, dite essai à l’anneau et ce depuis l’état initial saturé et jusqu’à la rupture du matériau par fissuration.

La méthode de retrait empêché sera prospectée dans ce chapitre à l’aide de la technique de l’essai à l’anneau (Ring-Test). Cette technique consiste à mettre un échantillon d’argiles en contact avec une paroi rigide (anneau métallique), équipée de capteurs de déformation. Lors du séchage, le retrait volumique empêché entraîne le développement de contraintes sur l’anneau métallique déduites des mesures des déformations dans celui-ci, connaissant sa loi de comportement. Une analyse de MMC, tenant compte des conditions aux limites mécaniques et géométriques permet ainsi de remonter à l’état de contraintes mécaniques internes dans le matériau argileux.

La démarche expérimentale suivie consiste d’abord à valider la méthode de l’essai à l’anneau ASTM sur un mortier de ciment standard, pour étendre ensuite cette technique à une kaolinite pure et un mélange sable-kaolinite.

IV.1. Matériaux et méthodes

IV.1.1. Matériaux

Les matériaux étudiés dans ce chapitre sont :

- La kaolinite P300, identifiée précédemment dans le Chapitre 3.
- Un mélange sable-kaolinite P300. Le sable utilisé est un sable de maçonnerie de fraction granulaire 0-4 mm.
- Un mortier de ciment normalisé selon la norme européenne EN 998-2. Son débit massique d’absorption de l’eau est de $0.5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ et sa résistance à la compression à 28 jours est de 10 MPa (catégorie M10). La teneur en eau initiale du mélange est de 14 %. Les détails des proportions du mélange sont donnés dans le Tableau 10.

Identification du mélange (W/C)	Eau	Ciment	Sable (0-4mm)
0.8	0.8	1	4.8

Tableau 10: Proportions massiques du mortier de ciment.

IV.1.2. Méthodes

IV.1.2.1. Essai à l'anneau : Dispositif Ring-Test ASTM C1581

Le dispositif de l'essai à l'anneau (Ring-Test), permet de mesurer les déformations subies par l'anneau en acier à l'aide des jauges de déformation collées sur sa circonférence intérieure. Par la suite, connaissant la loi de comportement de cet anneau, on remonte à l'état de contrainte à l'interface anneau métallique/matériau.

Le dispositif standard ASTM C 1581 est une version normalisée du Ring-Test proposée par l'American Society for Testing Materials [ASTM, 2016] pour étudier les phénomènes de retrait des matériaux cimentaires (mortiers, bétons, ...). Ce dispositif consiste en deux anneaux coaxiaux, entre lesquels le matériau testé sera placé (Figure 84). L'anneau intérieur est en acier 1.0553, connu auparavant sous le nom d'acier ST52-3 S355 J0. Son module de Young est d'environ 210 GPa et son coefficient de poisson est 0.3. Cet anneau possède un diamètre intérieur de 305 mm et un diamètre extérieur de 330 mm. Quatre jauges de déformations sont collées de manière axisymétrique sur sa circonférence intérieure et reliées à un système d'acquisition, afin d'enregistrer les déformations circonférentielles subies par l'anneau au cours de l'essai. La déformation fournie par le logiciel représente la moyenne des quatre mesures enregistrées. La précision de mesure de ces jauges est de $0.5 \cdot 10^{-6}$ m/m. De même, le système d'acquisition est équipé de thermocouples permettant de mesurer la température dans l'atmosphère ambiante. L'anneau extérieur est un anneau amovible en PVC, son diamètre intérieur est de 406 mm. Le rôle de cet anneau est d'assurer le coffrage de l'échantillon lors de sa mise en œuvre. L'échantillon étudié est donc un anneau d'épaisseur 38 mm et de hauteur 150 mm. Les deux anneaux intérieur et extérieur sont munis de ridoirs et de tiges filetées avec écrous papillon permettant de les maintenir lors de la mise en œuvre du matériau.

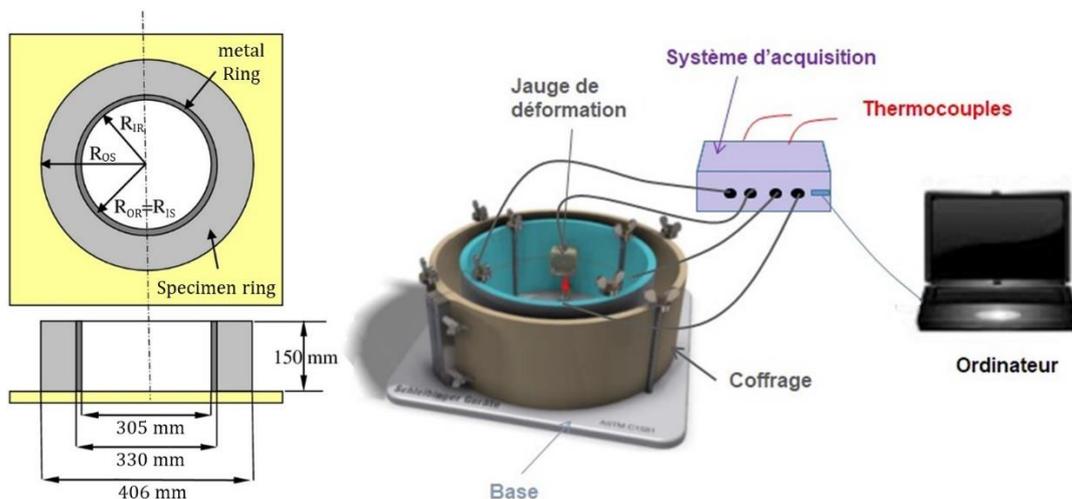


Figure 84 : Schéma descriptif du dispositif Ring-Test ASTM C1581.

IV.1.2.2. Interprétation de l'essai : Modèle analytique

Les contraintes qui se développent dans l'échantillon sont dérivées des déformations mesurées par les jauges situées au niveau de la circonférence interne de l'anneau métallique. En supposant que :

- l'échantillon à tester est un matériau isotrope élastique,
- l'effet de la pesanteur sur l'échantillon est négligeable,
- il n'existe pas de pression radiale exercée sur la circonférence extérieure de l'échantillon,
- les déformations dans l'échantillons sont planes,
- les contraintes radiales à l'interface métal/béton sont continues,

la théorie de mécanique des milieux continus nous permet de remonter à l'état de contrainte dans l'échantillon.

La méthode de calcul consiste à séparer le problème en deux parties : l'anneau métallique est considéré comme étant soumis à une pression externe sur sa surface extérieure et l'échantillon étudié soumis à une pression interne (pression d'interface fictive) sur sa surface intérieure, égale et opposée à la pression externe (Figure 85).

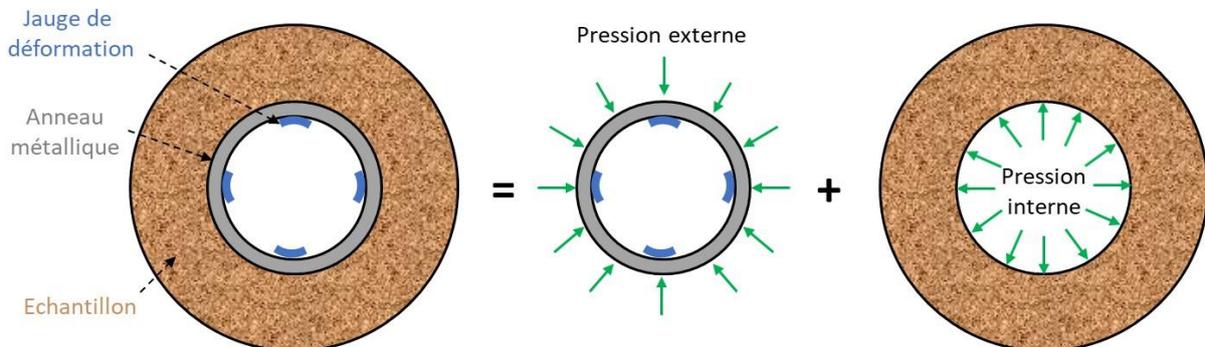


Figure 85: Vue de surface du Ring-Test montrant la méthodologie utilisée dans le calcul analytique.

La pression d'interface fictive (P_{int}) peut être déterminée comme étant la pression nécessaire pour générer une déformation équivalente à celle mesurée sur la circonférence interne de l'anneau métallique. Cette pression d'interface fictive est donc égale aux pressions interne et externe à l'interface anneau métallique/matériau. En supposant un retrait uniforme dans la totalité de l'échantillon et en tenant compte de l'élasticité de l'anneau métallique, la pression exercée par l'échantillon sur cet anneau métallique, lors des déformations de retrait, peut être déterminée en utilisant la solution d'une contrainte élastique dans un cylindre sous pression [Amarisiri, 2014] :

$$P_{\text{int}} = -\varepsilon_{R|_{(r=R_{\text{OR}})}} E_R \frac{R_{\text{OR}}^2 - R_{\text{IR}}^2}{2 R_{\text{OR}}^2} \quad (14)$$

Avec : $\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_R : \text{déformation circonférentielle mesurée au niveau du rayon intérieur de l'anneau métallique} \\ E_R : \text{module d'Young de l'anneau métallique} \\ R_{\text{IR}} : \text{rayon intérieur de l'anneau métallique (Figure 84)} \\ R_{\text{OR}} : \text{rayon extérieur de l'anneau métallique} \end{array} \right.$

De même, dans l'échantillon étudié, le déplacement dans la direction radiale (U_s), la contrainte de traction circonférentielle (σ_θ) ainsi que la contrainte de compression radiale (σ_r) peuvent être calculés en fonction de la pression d'interface (P_{int}) comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_s(r) = \frac{1 - \nu_s}{E_s(K^2 - 1)} P_{\text{int}} r + \frac{(1 + \nu_s)}{E_s(K^2 - 1)} P_{\text{int}} \frac{R_{\text{OS}}^2}{r} \\ \sigma_r(r) = \frac{P_{\text{int}} R_{\text{OR}}^2}{R_{\text{OS}}^2 - R_{\text{OR}}^2} \left(1 - \frac{R_{\text{OS}}^2}{r^2} \right) \\ \sigma_\theta(r) = \frac{P_{\text{int}} R_{\text{OR}}^2}{R_{\text{OS}}^2 - R_{\text{OR}}^2} \left(1 + \frac{R_{\text{OS}}^2}{r^2} \right) \end{array} \right. \quad (15)$$

$$\sigma_r(r) = \frac{P_{\text{int}} R_{\text{OR}}^2}{R_{\text{OS}}^2 - R_{\text{OR}}^2} \left(1 - \frac{R_{\text{OS}}^2}{r^2} \right) \quad (16)$$

$$\sigma_\theta(r) = \frac{P_{\text{int}} R_{\text{OR}}^2}{R_{\text{OS}}^2 - R_{\text{OR}}^2} \left(1 + \frac{R_{\text{OS}}^2}{r^2} \right) \quad (17)$$

Avec : $\left\{ \begin{array}{l} E_s : \text{module de déformation de l'échantillon} \\ \nu_s : \text{coefficient de Poisson de l'échantillon} \\ R_{\text{OS}} : \text{rayon extérieur de l'échantillon, soit } K = \frac{R_{\text{OS}}}{R_{\text{OR}}} \text{ (Figure 84)} \end{array} \right.$

De même, étant donné que la contrainte circonférentielle qui se développe dans l'échantillon atteint sa valeur maximale à l'interface anneau métallique/matériau (pour $r = R_{\text{OR}} = R_{\text{IS}}$), la contrainte maximale de traction ($\sigma_{\theta_{\text{max}}}$) peut être déterminée à l'aide de l'équation suivante :

$$\sigma_{\theta_{\text{max}}} = -\varepsilon_{R|_{(r=R_{\text{OR}})}} E_R \frac{R_{\text{OR}}^2 - R_{\text{IR}}^2}{2 R_{\text{OR}}^2} \frac{R_{\text{OS}}^2 + R_{\text{OR}}^2}{R_{\text{OS}}^2 - R_{\text{OR}}^2} \quad (18)$$

L'échantillon étudié est soumis à une contrainte circonférentielle de traction dans le plan ($\sigma_{\theta\theta}$), à une contrainte radiale de compression (σ_{rr}) ainsi qu'à une contrainte de cisaillement ($\sigma_{r\theta}$). La Figure 86 montre un élément du matériau testé avec l'état de contraintes représenté dans le plan en coordonnées polaires, où r et θ sont respectivement les coordonnées radiales et angulaires. De même, le sol se déforme en suivant le tenseur de déformation ε_{rr} , $\varepsilon_{\theta\theta}$ et $\varepsilon_{r\theta}$ définis respectivement comme déformation radiale, déformation circonférentielle et distorsion.

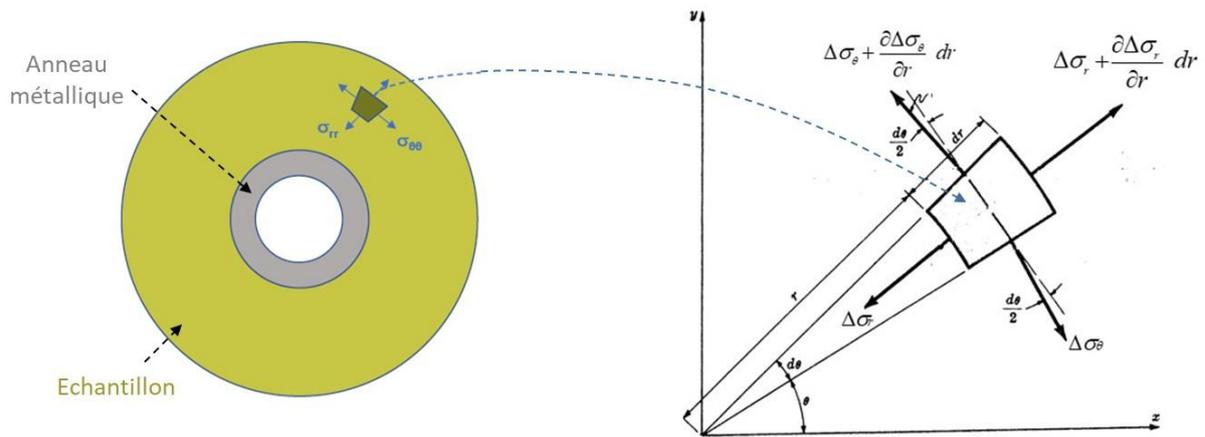


Figure 86: Un élément de l'anneau en béton présentant l'état de contraintes dans le plan (x,y) en coordonnées polaires.

IV.2. Programme expérimental et mise en œuvre

IV.2.1. Mortier de ciment

L'essai de dessiccation sur le mortier de ciment est un essai de référence permettant de valider le dispositif ASTM. La teneur en eau de préparation du mortier recommandée est de 14 %. Avant la mise en œuvre du matériau, l'anneau intérieur en acier (de couleur bleue) et l'anneau extérieur servant comme coffrage (de couleur noire) sont détenus par des ridoirs (de couleur rouge) et des tiges filetées avec écrous papillon, afin d'éviter toute perturbation lors de la mise en œuvre et tout drainage d'eau lorsque l'échantillon est très humide pendant les premiers jours de séchage. Une couche d'huile de silicone est pulvérisée sur le coffrage pour faciliter l'opération du décoffrage. Le coulage s'est fait par couches de 5 cm d'épaisseur à l'aide d'un entonnoir pour limiter la hauteur de chute du matériau et éviter les risques de ségrégation. Chaque couche est remuée à l'aide d'une spatule, afin de chasser les bulles d'air emprisonnées dans l'échantillon et d'homogénéiser au mieux sa porosité.

Par ailleurs, des essais de compression simple et de traction indirecte par fendage (essai brésilien) sont réalisés sur ce mortier, afin de déterminer les résistances de référence, à comparer avec ceux obtenus par le Ring-Test ASTM. Les éprouvettes sont de forme cylindrique de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur, soit un élanement de 2. Ces essais mécaniques sont réalisés après 5 jours de temps de séchage, de manière à avoir le même âge que le mortier testé dans le Ring-Test ASTM. La presse est pilotée en déplacement avec une vitesse de 0.5 mm/min.

IV.2.2. Kaolinite P300

Deux teneurs en eau initiales sont adoptées pour la préparation de la pâte d'argile : une teneur en eau égale à une fois et demi la limite de liquidité du matériau ($1.5 w_L$) et une autre légèrement supérieure à sa limite de liquidité ($1.1 w_L$). Le matériau, est malaxé dans un malaxeur de laboratoire pendant 15 minutes pour obtenir une pâte d'aspect homogène. Ensuite, cette pâte est conservée dans un récipient scellé pendant 24 heures afin d'homogénéiser la teneur en eau. La Figure 87 montre une vue du dessus du dispositif Ring-Test avec l'échantillon d'argile. L'environnement expérimental est contrôlé en température $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ et en humidité relative $HR = 40 \%$. La mise en œuvre de la pâte dans le Ring-Test est identique à celle du mortier de ciment, à la différence près qu'un film plastique soit glissé entre le coffrage et l'échantillon pour éviter l'adhérence de l'argile au coffrage, susceptible d'endommager l'échantillon lors du décoffrage. Une couche d'huile de silicone est également pulvérisée sur ce film plastique dans le but de faciliter l'opération du décoffrage.

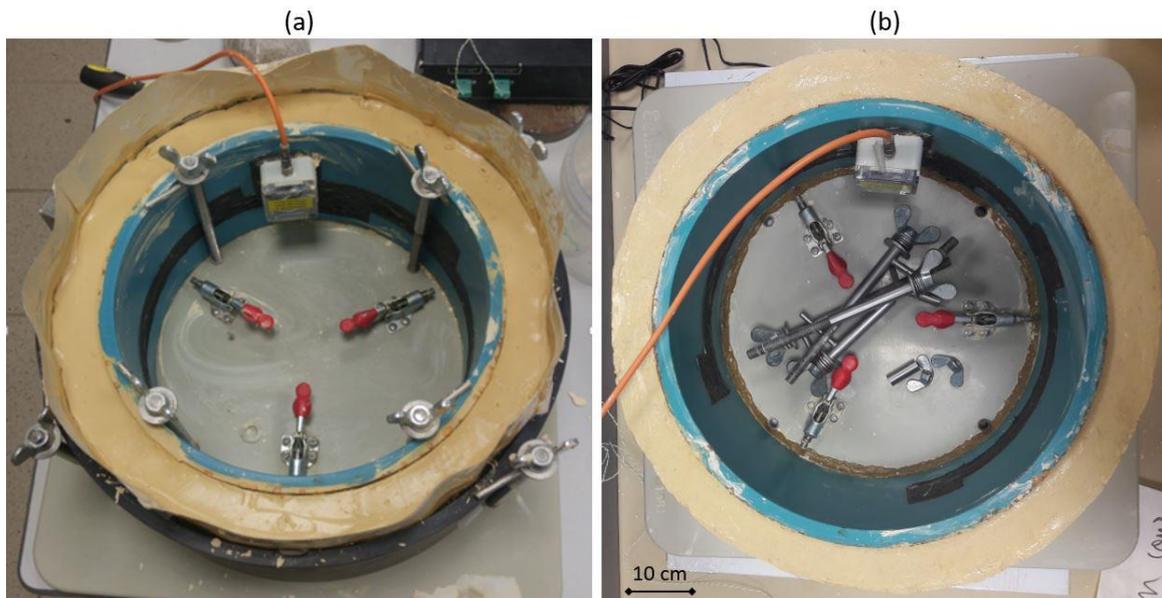


Figure 87: Vue du dessus du Ring-Test (a) après la mise en œuvre du matériau ; (b) après le décoffrage.

IV.2.3. Mélanges sable-kaolinite P300

Afin d'étudier l'effet d'un amendement granulaire de la kaolinite sur son retrait et sa fissuration, deux mélanges massiques sable-kaolinite sont préparés : un mélange 75 % de kaolinite et de 25% de sable (75K 25S : $w_L = 32 \%$) et un mélange de 50 % de kaolinite et de 50 % de sable (50K 50S : $w_L = 25 \%$). Rappelons que la kaolinite P300 a une limite de liquidité $w_L = 40 \%$. La mise en œuvre de ces mélanges dans le Ring-Test suit le même protocole que celui de la kaolinite P300.

La Figure 88 résume l'ensemble des essais réalisés à l'aide du Ring-test ASTM.

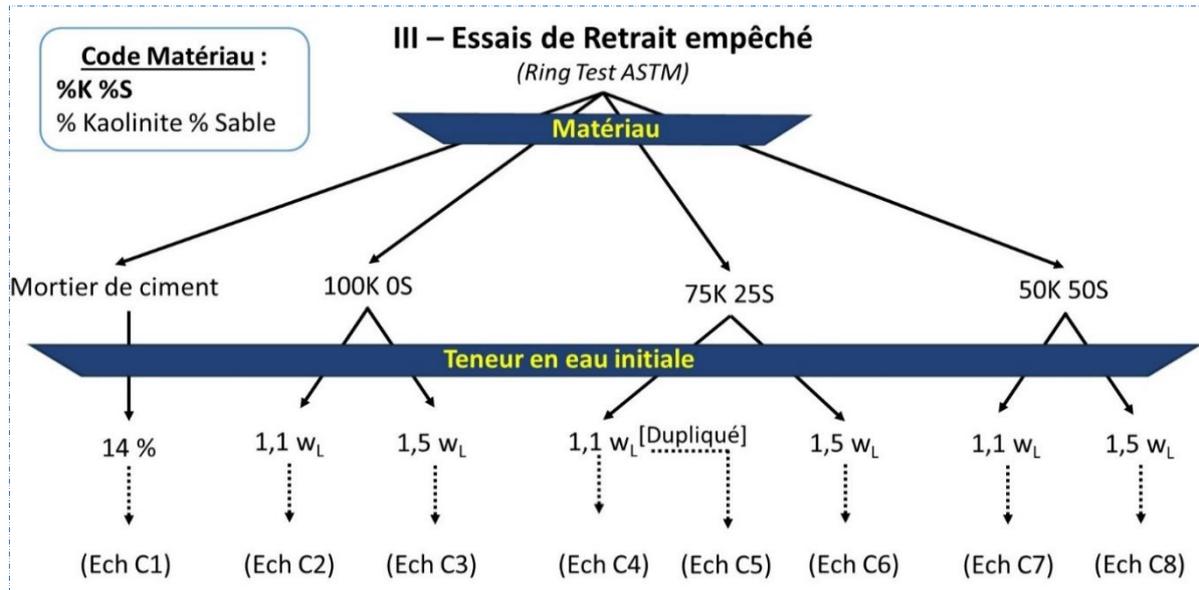


Figure 88: Essais de retrait empêché traitant l'effet de la teneur en eau initiale et de l'amendement de l'argile à l'aide d'une fraction granulaire de sable.

IV.3. Résultats et discussions

IV.3.1. Mortier de ciment

IV.3.1.1. Retrait empêché

Une vue du dessus de l'échantillon C1 après la mise en œuvre du mortier est présentée dans la Figure 89(a). Le desserrage des tiges filetées de l'anneau intérieur ainsi que le relâchement des ridoirs sont effectués juste après la mise en œuvre du mortier, tandis que le desserrage des tiges filetées de l'anneau extérieur et le décoffrage de l'échantillon sont effectués 18 heures après sa mise en œuvre.

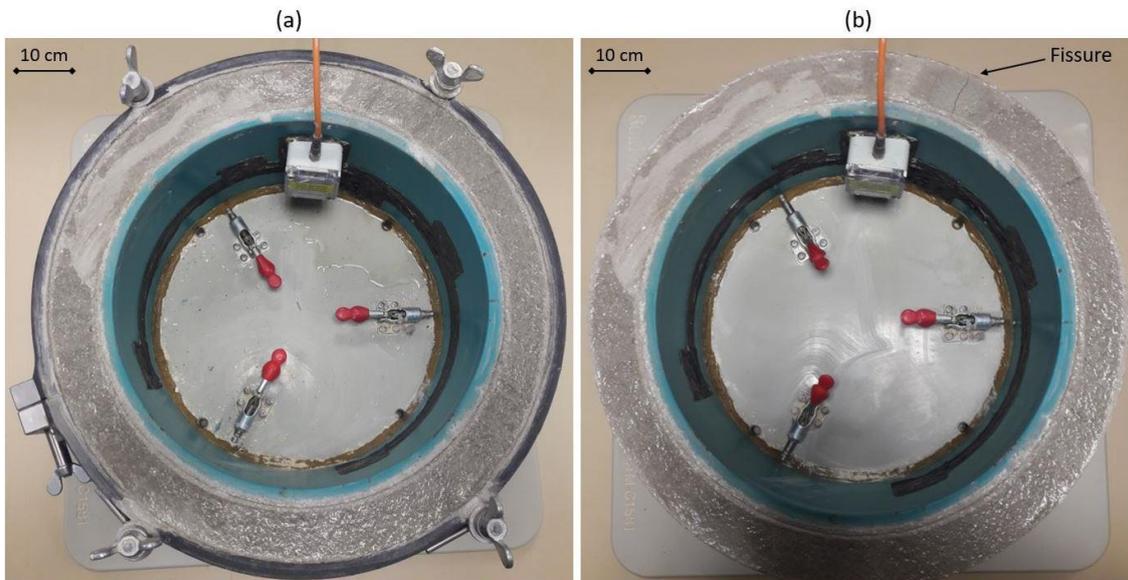


Figure 89: Vue du dessus (a) après la mise en œuvre du mortier ; (b) après la fissuration de l'échantillon C1.

La Figure 90 montre l'évolution de la déformation circonférentielle de l'anneau en acier au cours du séchage. Cette déformation mesurée correspond à la réponse des jauges aux contraintes appliquées par le mortier sur la circonférence extérieure de l'anneau en acier. On observe qu'à partir de 8 heures après le coulage du mortier (0.3 jour), l'anneau en acier commence à se déformer avec une pente moyenne de $-4 \mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$. Le saut observé dans la déformation, à 0.75 jour de temps de séchage, est dû aux perturbations du décoffrage de l'échantillon. Ensuite, la déformation de l'anneau s'accélère à partir de 1.5 jour de temps de séchage avec une pente de $-9 \mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$ jusqu'à la fissuration de l'échantillon, apparue au bout de 5.3 jours pour une déformation ultime de $-32 \mu\text{m}/\text{m}$. Notons qu'une déformation négative signifie que la circonférence de l'anneau est en train de se comprimer. La fissuration de l'échantillon est matérialisée par une chute brutale de la déformation mesurée (diminution de la compression). Dans la Figure 89(b), une fissure d'épaisseur 1 mm environ est observée sur toute la largeur de l'échantillon. Après l'apparition de cette fissure, l'anneau qui était comprimé, se détend jusqu'à atteindre la valeur de déformation de départ ($\epsilon = 1 \mu\text{m}/\text{m}$) au bout de 7 jours. Ceci peut être attribué au fait que la fissuration de l'échantillon dissipe complètement les contraintes appliquées par l'échantillon sur l'anneau en acier.

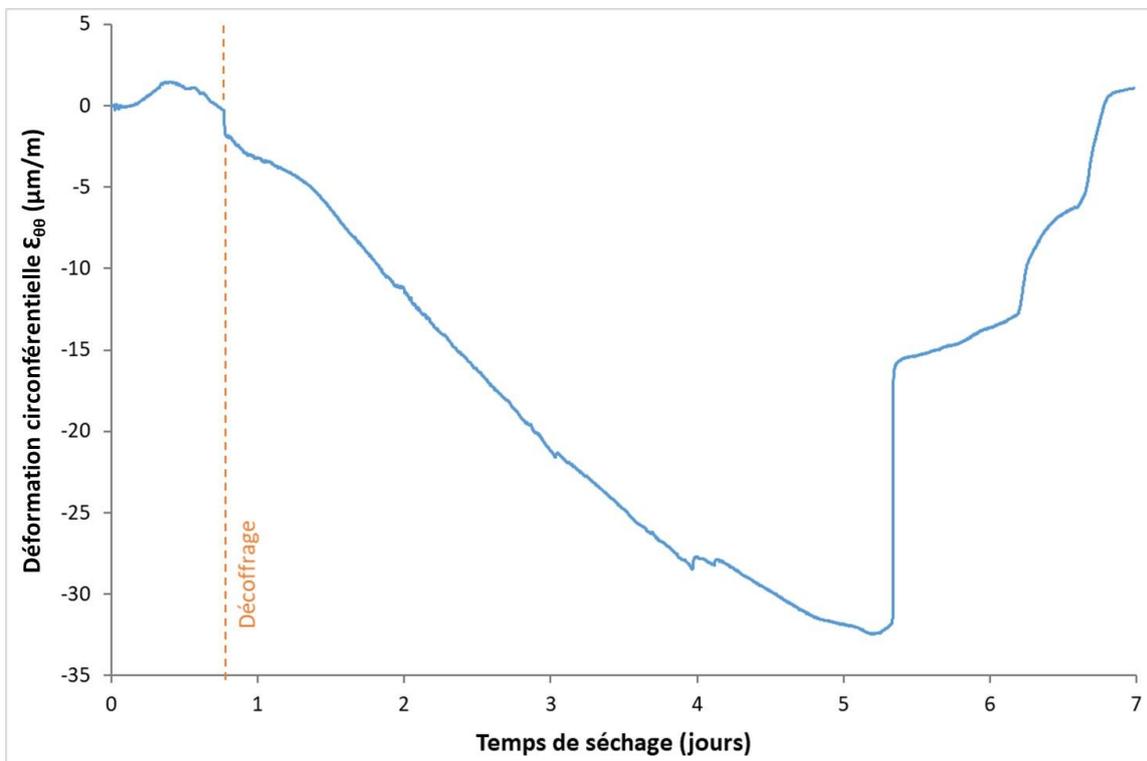


Figure 90: Evolution de la déformation circonférentielle de l'anneau en acier au cours du séchage.

A partir des mesures des déformations, les contraintes à l'interface acier/béton sont calculées à l'aide de l'équation (18). La Figure 91 présente une comparaison entre l'évolution des contraintes de traction dans la direction circonférentielle $\sigma_{\theta\theta}$ de l'échantillon C1 et celles de la littérature, réalisé sur un mortier similaire par Haouas [Haouas, 2007] qui a utilisé un dispositif Ring-Test qu'il a développé avec des dimensions différentes de celui de l'ASTM. Cependant, on remarque que les deux échantillons montrent un comportement mécanique analogue avec une contrainte de traction maximale d'environ 2 MPa. Par conséquent, cette contrainte maximale peut être considérée comme une résistance à la traction annulaire de ce mortier.

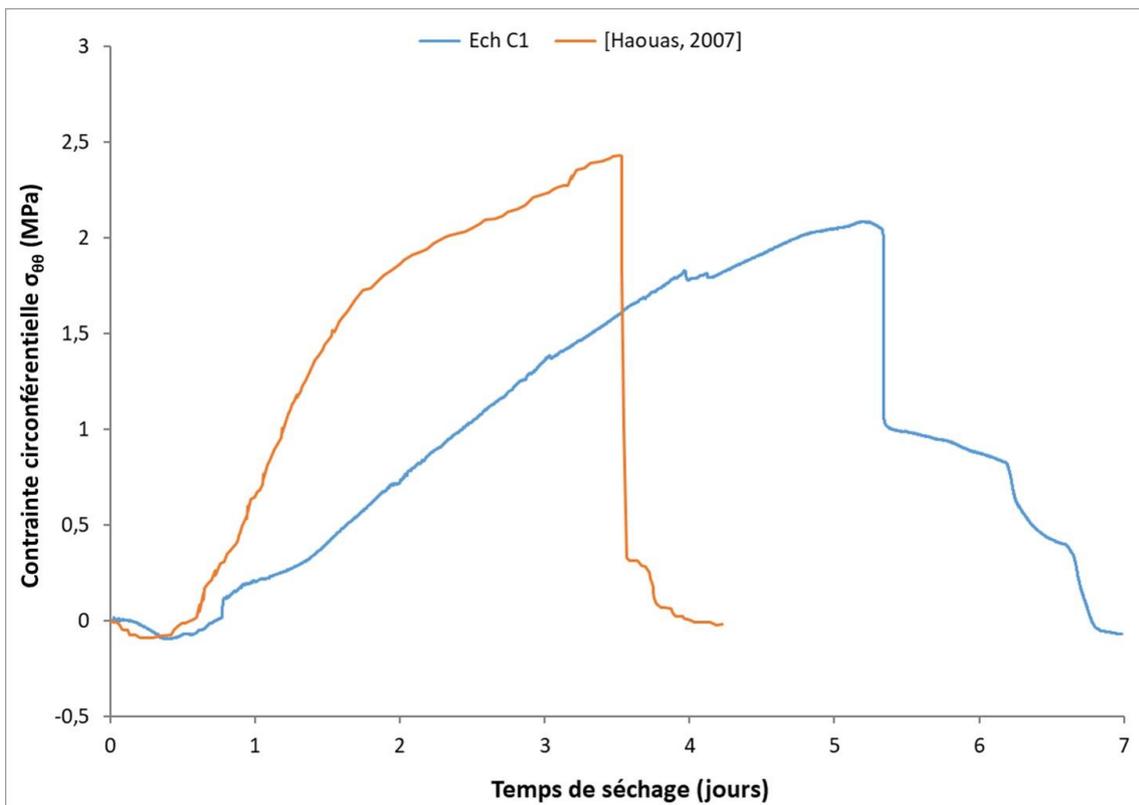


Figure 91: Comparaison des contraintes de traction entre l'échantillon C1 et les résultats de [Haouas, 2007].

La Figure 92 montre l'évolution des contraintes circonférentielles $\sigma_{\theta\theta}$ et radiales σ_{rr} calculées à l'aide des équations (16) et (17), en fonction du rayon du dispositif Ring-Test, au moment de la rupture de l'échantillon (au bout de 5.3 jours de temps de séchage). On observe une continuité des contraintes radiales à l'interface acier/béton, tandis que les contraintes circonférentielles présentent un écart de 9 MPa. De même, les contraintes circonférentielles de traction sont largement supérieures aux contraintes radiales de compression au niveau de cette interface. Par conséquent, il s'agit bien d'une rupture par traction de l'échantillon de mortier.

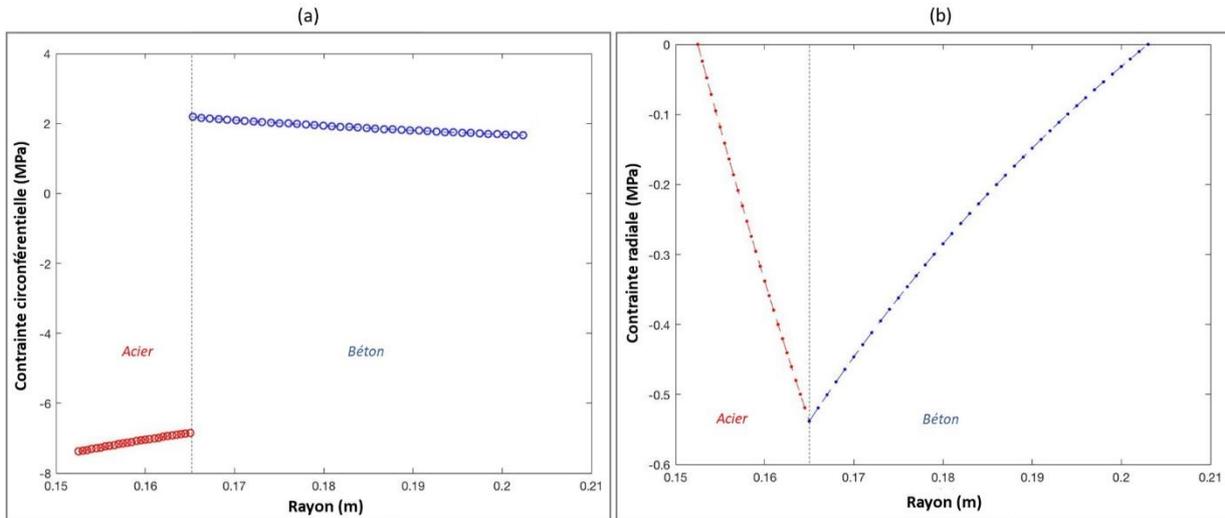


Figure 92: Evolution des (a) contraintes circouférentielles ; (b) contraintes radiales ; en fonction du rayon du dispositif Ring-Test, au moment de la rupture de l'échantillon (temps de séchage = 5.3 jours).

IV.3.1.2. Essais mécaniques

Dans le but de comparer la résistance à la traction indirecte annulaire du mortier (Ring-Test) avec les résistances à la compression et à la traction indirecte par fendage (essai brésilien), nous avons réalisé sur le même mortier trois essais de compression simple et trois essais de traction par fendage. Les Figures 93(a) et 93(b) présentent les résultats des essais de compression simple et de traction par fendage. Les essais de compression simple montrent une résistance à la compression de l'ordre de 7 MPa. De même, le faciès de rupture dans ces essais présente des fissures verticales indiquant une rupture conforme au modèle MMC [Bavelard, 2006]. Selon l'Eurocode 2 [Roux, 2009], la valeur moyenne de la résistance à la traction axiale d'un béton f_{ctm} peut être estimée à partir de sa résistance à la compression f_{ck} d'après la relation suivante :

$$f_{ctm} = 0.3 f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 0.3 \times 7^{\frac{2}{3}} = 1.1 \text{ MPa} \quad (\text{pour } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}) \quad (19)$$

Pour les essais de traction par fendage, la rupture de l'éprouvette est supposée au centre du disque. Selon le critère de Griffith, l'état de contrainte à ce point est [Hondros, 1959] :

$$\sigma_x = -3 \frac{F}{\pi (d/2)L} \quad (20)$$

$$\sigma_\theta = \frac{F}{\pi (d/2)L} \quad (21)$$

Avec :

- σ_x : contrainte radiale de compression au centre du disque (en MPa)
- σ_θ : contrainte circouférentielle de traction au centre du disque (en MPa)
- F : force maximale (en N)
- d : diamètre de l'éprouvette (en mm)
- L : longueur de l'éprouvette (en mm)

D'après le critère de Griffith, la contrainte de compression est trois fois plus élevée au centre du disque que la contrainte de traction. Néanmoins, la rupture de l'éprouvette se fait en traction, du fait que la résistance à la compression du mortier est beaucoup plus élevée que sa résistance à la traction.

La Figure 93(b) montre une résistance à la traction par fendage du mortier de l'ordre de 1.1 MPa. Cette résistance mesurée est en accord avec celle estimée à partir de la résistance à la compression du mortier (Equation (19)). De même, le faciès de rupture dans ces essais montre une seule fissure verticale suivant les deux génératrices opposées du disque, indiquant une rupture des éprouvettes conforme au modèle MMC [Fairhurst, 1964].

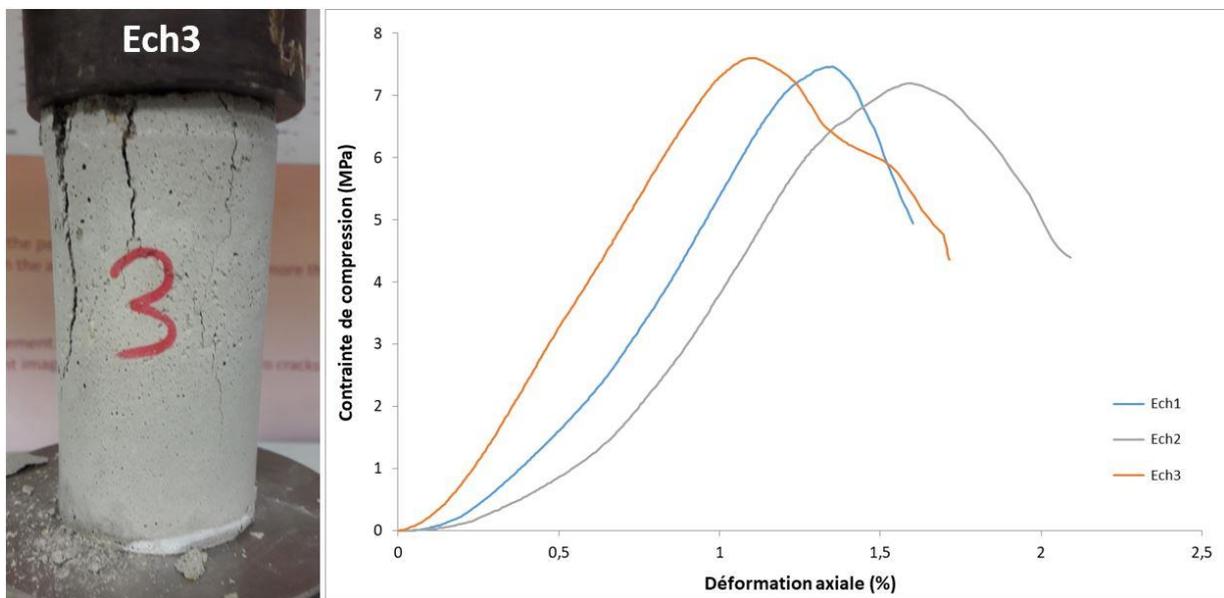


Figure 93(a): Résultats des essais de compression simple réalisés sur le mortier.

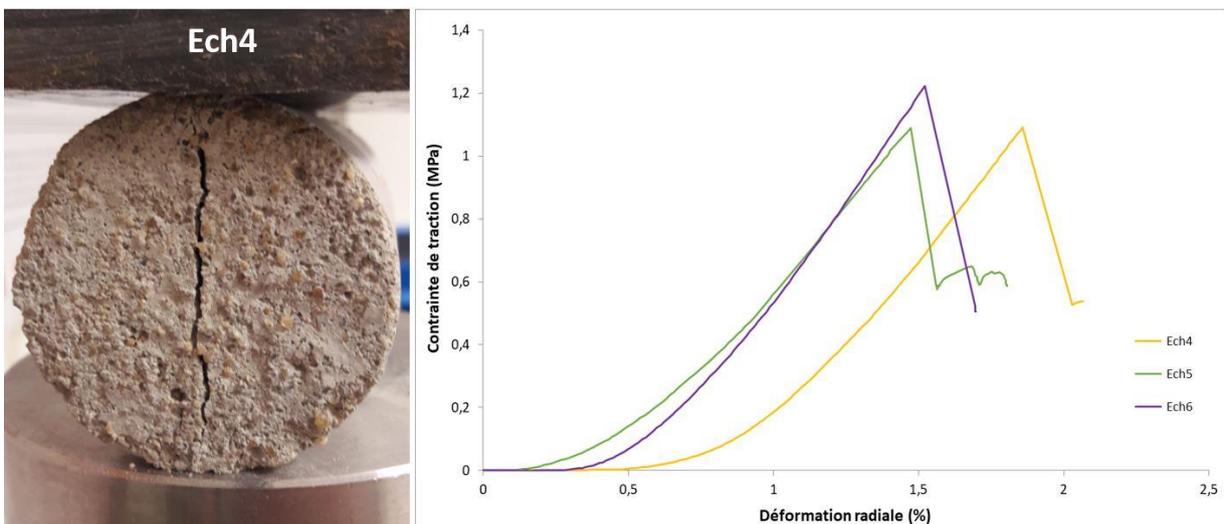


Figure 93(b): Résultats des essais de traction par fendage réalisés sur le mortier.

En comparant la résistance à la traction par fendage de ce mortier (1.1 MPa) avec sa résistance à la traction annulaire estimée à partir de l'essai Ring-Test (2 MPa), on trouve qu'il existe un ratio d'environ 2 entre ces deux techniques de mesure de la traction indirecte. En effet, la problématique dans la mesure de la résistance à la traction est que les résultats obtenus pour un matériau donné varient en fonction du type d'essai utilisé et des dimensions de l'échantillon. La variation de la résistance à la traction en fonction des dimensions de l'échantillon est généralement attribuée à la présence de défauts locaux et à l'hétérogénéité de l'échantillon [Jaeger, 1969]. De même, Durelli et Parks [Durelli, 1962] ont constaté que la résistance à la traction des matériaux fragiles ne dépend pas seulement des dimensions de l'échantillon, mais elle est également influencée par la distribution des contraintes dans l'échantillon, ce qui explique la différence observée entre la résistance à la traction par fendage et la résistance à la traction annulaire. Harison et al. [Harison, 1994] ont également trouvé un ratio de 4.1 entre la résistance à la traction par fendage et la résistance à la traction annulaire.

Néanmoins, la technique de mesure de la résistance à la traction à l'aide du dispositif Ring-Test s'avère être plus efficace, du fait que la rupture de l'échantillon se produit par traction « quasi-simple », puisque les contraintes circonférentielles de traction sont largement supérieures aux contraintes radiales de compression (voir Figure 92). Alors que les contraintes de compression dans l'essai Brésilien (traction par fendage) sont trois fois plus élevées au centre du disque que les contraintes de traction (voir Equations (20) et (21)) [Hondros, 1959].

IV.3.2. Kaolinite P300

IV.3.2.1. Dessiccation et déformations de retrait

La Figure 94(a) présente l'évolution de la déformation circonférentielle de l'anneau en acier, mesurée à l'aide des jauges de déformation, depuis la mise en œuvre du matériau (exemple du cas de l'échantillon C3). Cette déformation est quasiment nulle lorsque l'anneau métallique est libre. Ensuite, le serrage des ridoirs et des tiges filetées, ainsi que le processus de coulage de l'argile induisent quelques perturbations. Ces perturbations sont considérées comme négligeables par rapport à la précision de mesure des jauges de déformation (0.5 $\mu\text{m}/\text{m}$). Après quatre jours de temps de séchage de l'argile, lorsque le matériau devient moins liquide évitant tout risque de drainage au niveau de la base, les tiges filetées sont desserrées. Ainsi, les ridoirs sont ensuite relâchés pour permettre à l'anneau en acier de se déformer librement suite aux déformations de retrait de l'échantillon en argile. Cette opération induit également une perturbation d'environ 0.5 $\mu\text{m}/\text{m}$ dans la direction circonférentielle au niveau de l'anneau en

acier (Figure 94(b)). Plus tard, lorsque le matériau devient un peu plus rigide à 13 jours de temps de séchage, le coffrage et le film plastique sont retirés, afin d'accélérer la cinétique de la dessiccation en permettant un séchage également par la surface circonférentielle extérieure de l'échantillon.

Pendant les jours précédents le décoffrage (0 à 13 jours), le sol n'a pas généré de contraintes mécaniques importantes détectables par les jauges de déformation. Les légères déformations mesurées sont dues à la variation de la température ambiante, comme le montre la Figure 94(b). Une fois le décoffrage effectué (à 13 jours de temps de séchage), le matériau commence à se déformer rapidement avec une pente moyenne de $-1.1 \mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$ jusqu'à la fissuration de l'échantillon correspondant à une déformation circonférentielle maximale d'environ $-3.3 \mu\text{m}/\text{m}$, après 16.4 jours de temps de séchage. De même, l'instabilité observée dans la pente de déformation est due à la variation de la température, comme le montre la Figure 94(b). Après la fissuration de l'échantillon, l'anneau se déforme en sens inverse avec une pente d'environ $+5 \mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$, correspondant à la décompression de l'anneau après la fissuration.

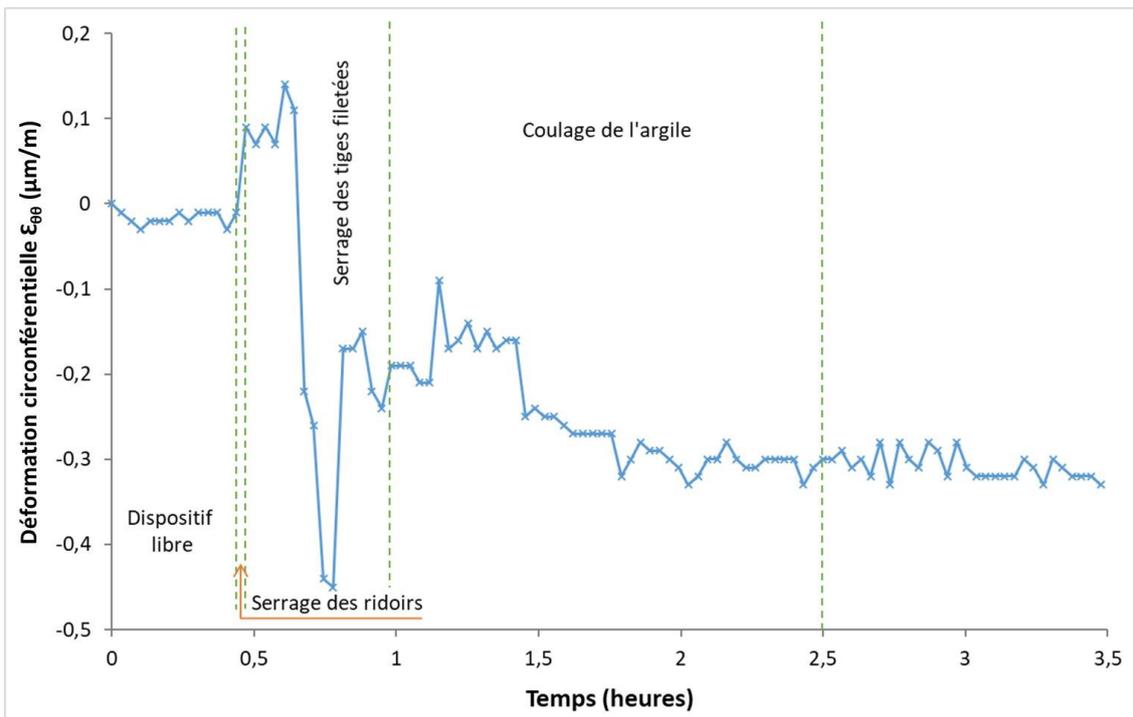


Figure 94: (a) Evolution de la déformation circonférentielle de l'anneau en acier lors de la mise en œuvre du matériau. Exemple du cas de l'échantillon C3.

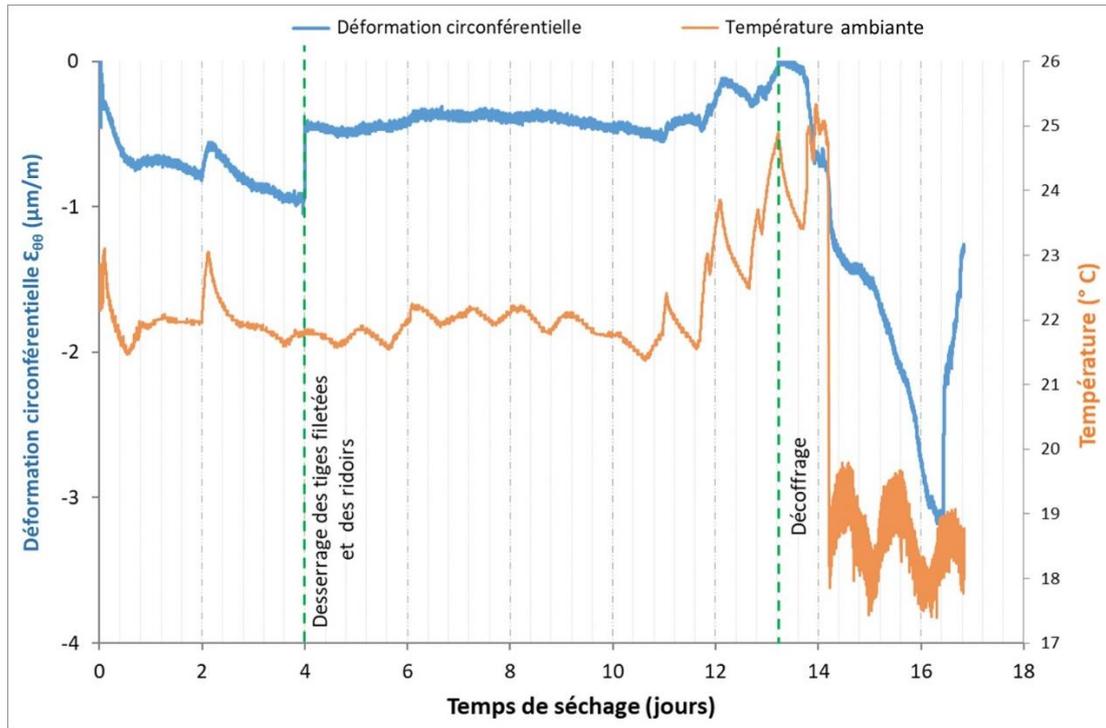


Figure 94: (b) Evolution de la déformation circonférentielle de l'anneau en acier et de la température ambiante au cours de la dessiccation de l'échantillon. Exemple du cas de l'échantillon C3.

La Figure 95 présente l'évolution des contraintes de traction dans la direction circonférentielle, déduites de l'équation (18), dans l'échantillon C3 au cours du séchage. On remarque que ces contraintes se développent sensiblement dans le matériau au bout de 13 jours de temps de séchage, correspondant au moment du décoffrage de l'échantillon. A partir de cet instant, les contraintes augmentent rapidement jusqu'à atteindre une valeur ultime d'environ 230 kPa lors de la rupture par fissuration du matériau.

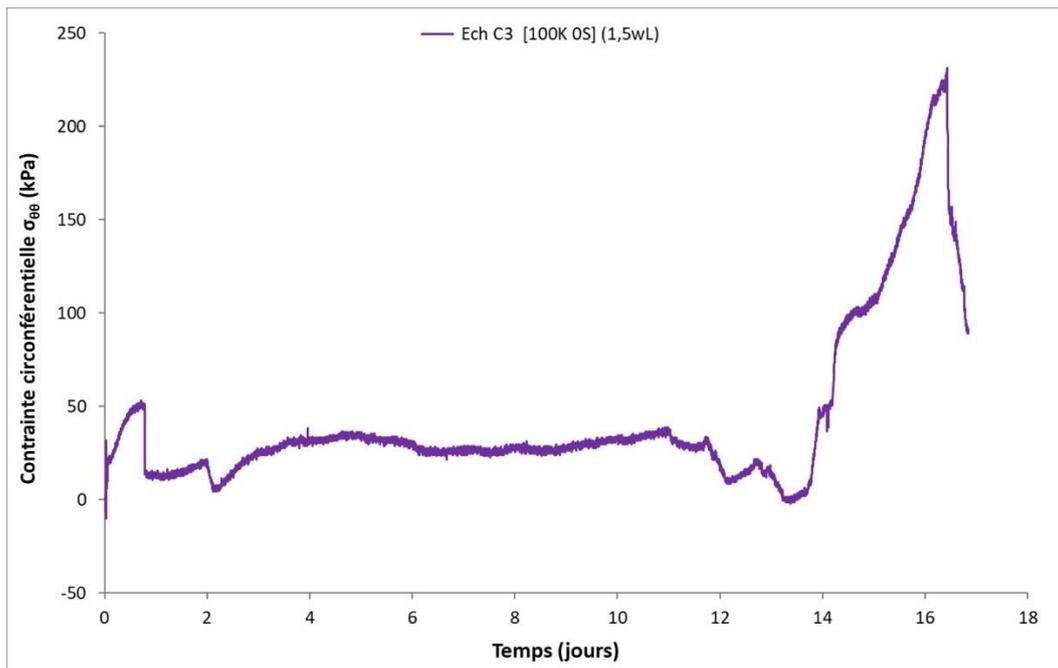


Figure 95: Evolution des contraintes de traction au cours du séchage. Exemple du cas de l'échantillon C3.

IV.3.2.2. Initiation et propagation de la fissuration

La Figure 96 montre l'initiation et la propagation des fissures provoquant la rupture de l'échantillon C3. Ces fissures sont observées sur les bords latéraux de l'échantillon. On remarque que la première fissure est apparue tout en bas de l'échantillon après 16.4 jours de temps de séchage, puis elle s'est propagée vers le haut (Figure 96(a)). Trois heures plus tard, la deuxième fissure est apparue tout en haut de l'échantillon après 16.5 jours de temps de séchage, sur le même axe vertical de la première fissure, puis elle s'est propagée vers le bas (Figure 96(b)). Néanmoins, la première fissure a subi une bifurcation vers le côté droit de la deuxième fissure, au lieu de se propager verticalement pour la joindre. Notons que l'apparition de la première fissure est observée avant d'atteindre le pic de déformation. La Figure 96(c) montre l'état de fissuration de l'échantillon C3, dix heures après l'apparition de la première fissure, ce qui correspond à 16.8 jours de temps de séchage. On remarque que la première fissure a subi une autre bifurcation vers la gauche pour rejoindre la partie haute de la deuxième fissure. Cette dernière a fini par rejoindre à son tour la partie basse de cette première fissure. La jonction de ces deux fissures a formé une ouverture d'environ 2 cm. Ce phénomène de bifurcation de fissures est également observé dans les échantillons C4 et C6.

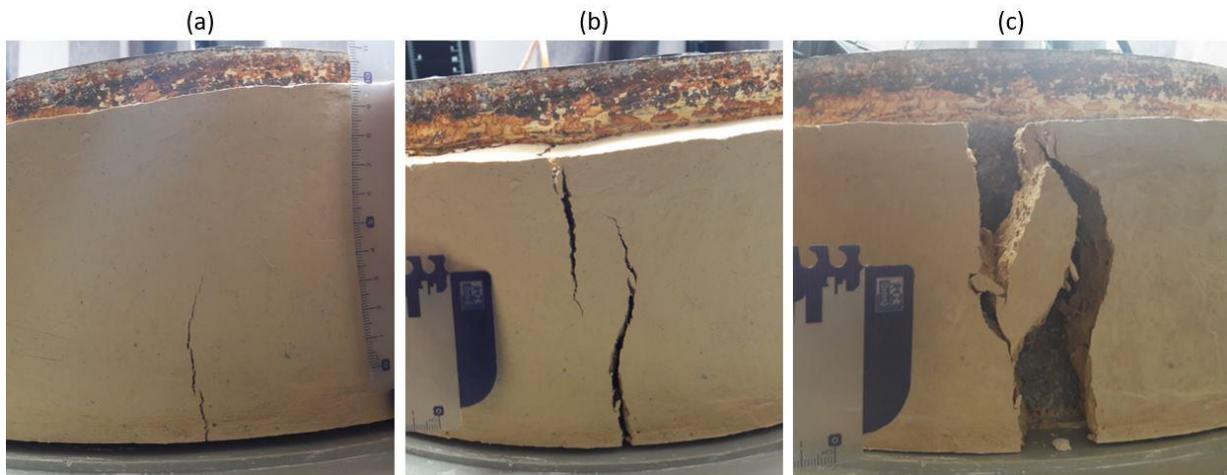


Figure 96: Initiation et propagation des fissures dans l'échantillon C3.

IV.3.2.3. Répartition de la teneur en eau finale

La Figure 97(a) présente l'état final de l'échantillon C3 après 16.8 jours de temps de séchage, correspondant à 10 heures après l'apparition de la première fissure. Comme mentionné plus haut, on observe l'apparition d'une seule fissure, avec une ouverture d'environ 2 cm au niveau du point A. Des mesures destructives de la teneur en eau sont réalisées à cet instant, afin d'étudier la répartition de la teneur en eau finale dans cet échantillon (Figure 97(b)). Quatre prélèvements sont effectués au niveau de chacun des points (de 'A' à 'H') indiqués dans la Figure 97(a) : deux prélèvements dans la partie haute au niveau des circonférences intérieure (Haut-int) et extérieure (Haut-ext), et deux autres prélèvements dans la partie basse au niveau des circonférences intérieure (Bas-int) et extérieure (Bas-ext). Notons que les prélèvements au niveau du point A sont réalisés derrière les lèvres de la fissure, afin de limiter l'effet du séchage accéléré à ce niveau à cause de l'exposition des lèvres de la fissure à l'air ambiant. On remarque que les teneurs en eau les plus faibles sont mesurées du côté de la fissure (partie gauche entre les points H et D). Ceci indique qu'il se peut que l'hétérogénéité du séchage a provoqué la fissuration dans l'échantillon. L'absence de mesures locales de la teneur en eau tout au long de la dessiccation ne permet pas de conclure sur l'origine de cette hétérogénéité de la teneur en eau.

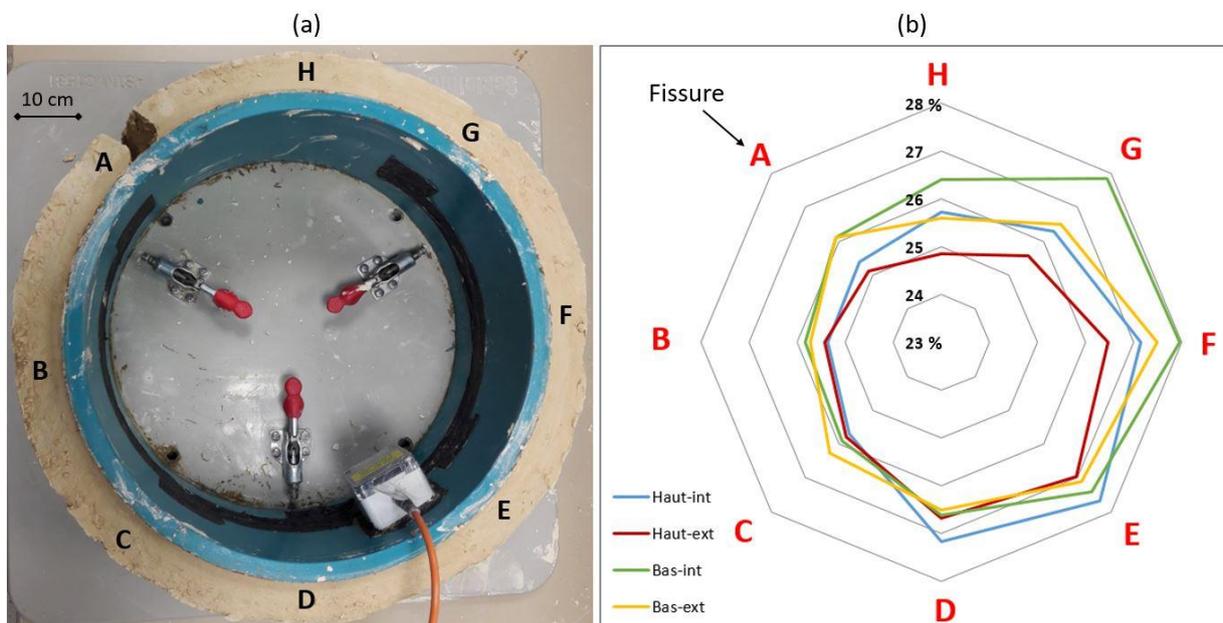


Figure 97: (a) Etat final de l'échantillon C3 ; (b) Répartition de la teneur en eau finale (en %) dans l'échantillon C3.

IV.3.3. Mélanges Sable-Kaolinite P300

Dans le but d'étudier l'effet de l'amendement de la kaolinite à l'aide d'une fraction granulaire sur sa cinétique de dessiccation et sa fissuration, nous avons réalisé 7 essais de retrait empêché à l'anneau sur deux mélanges d'argile et de sable (voir Figure 88). Dans ces essais, nous avons deux teneurs en eau initiales : une teneur en eau égale à une fois et demi la limite de liquidité du matériau ($1.5 w_L$) et une autre légèrement supérieure à sa limite de liquidité ($1.1 w_L$).

Les Figures 98(a), 98(b) et 98(c) présentent l'évolution des déformations circonférentielles dans l'anneau en acier du Ring-Test au cours de la dessiccation. Les matériaux étudiés sont le 75K25S (mélange de 75 % de Kaolinite et de 25 % de Sable) et 50K 50S (mélange de 50 % de Kaolinite et de 50 % de Sable). Comme référence, nous avons présenté aussi les résultats de la kaolinite pure 100K 0S (100 % de Kaolinite et 0 % de Sable). Les paramètres analysés dans cette étude sont d'une part la cinétique des déformations précédant la rupture de l'échantillon et d'autre part la déformation maximale atteinte à la rupture, en prenant comme point de départ (point zéro) la déformation mesurée au décoffrage de l'échantillon, afin d'éliminer les perturbations observées avant le décoffrage. On remarque que la teneur en eau initiale de l'échantillon n'a pas d'effet significatif sur les pentes de déformation d'un même matériau. De même, les déformations maximales atteintes à la rupture ne montrent pas une différence significative en fonction de la teneur en eau initiale pour un même matériau.

Par ailleurs, les résultats similaires des échantillons C4 et C5 ayant les mêmes caractéristiques mettent en évidence la reproductibilité de l'essai Ring-Test.

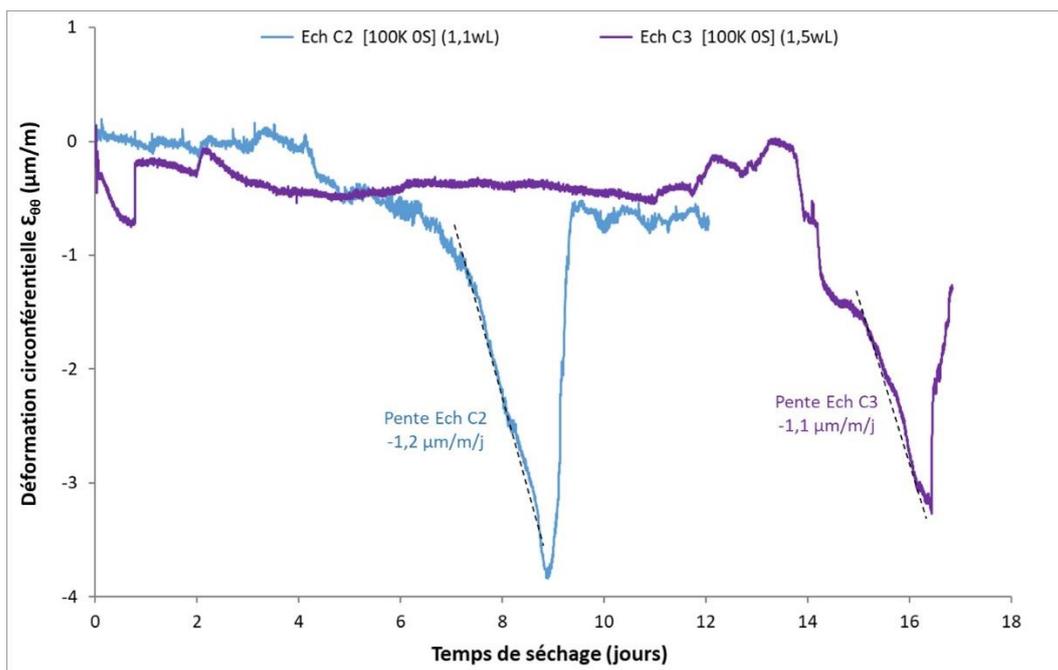


Figure 98: (a) Evolution des déformations dans l'anneau en acier au cours du séchage pour les échantillons de « 100K 0S ».

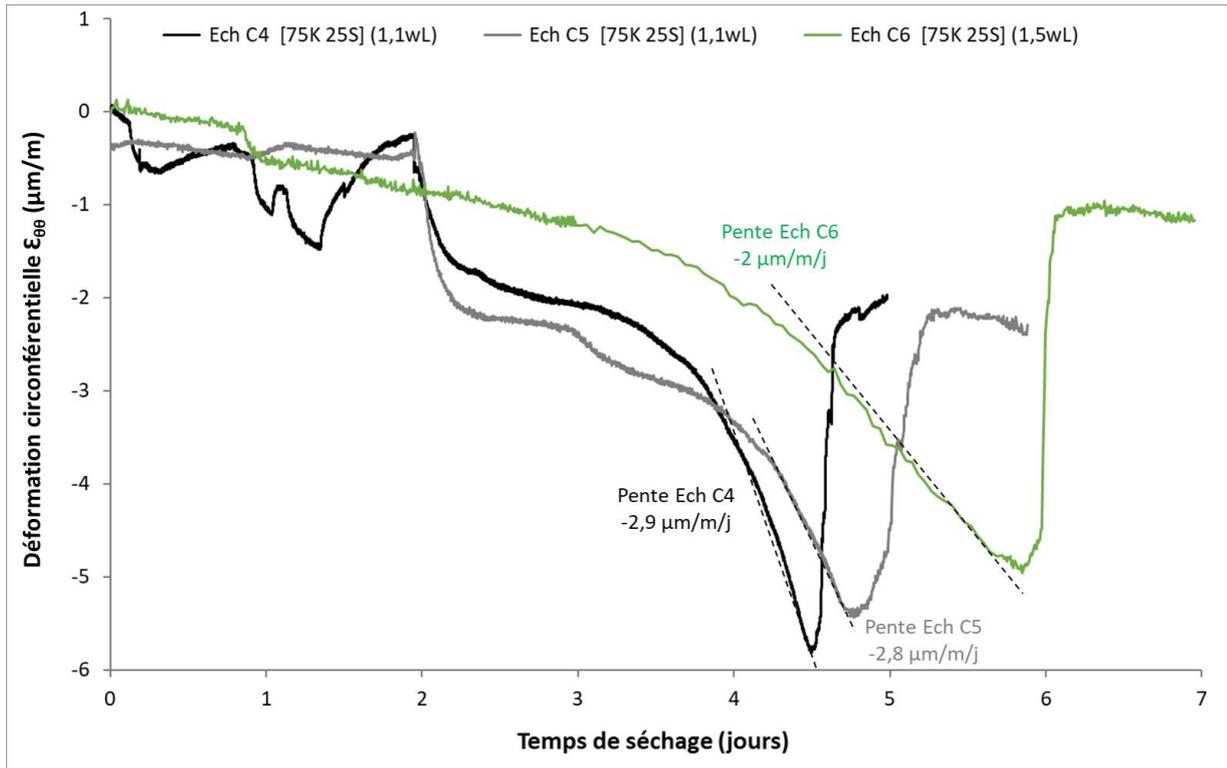


Figure 98 : (b) Evolution des déformations dans l'anneau en acier au cours du séchage pour les échantillons de « 75K 25S ».

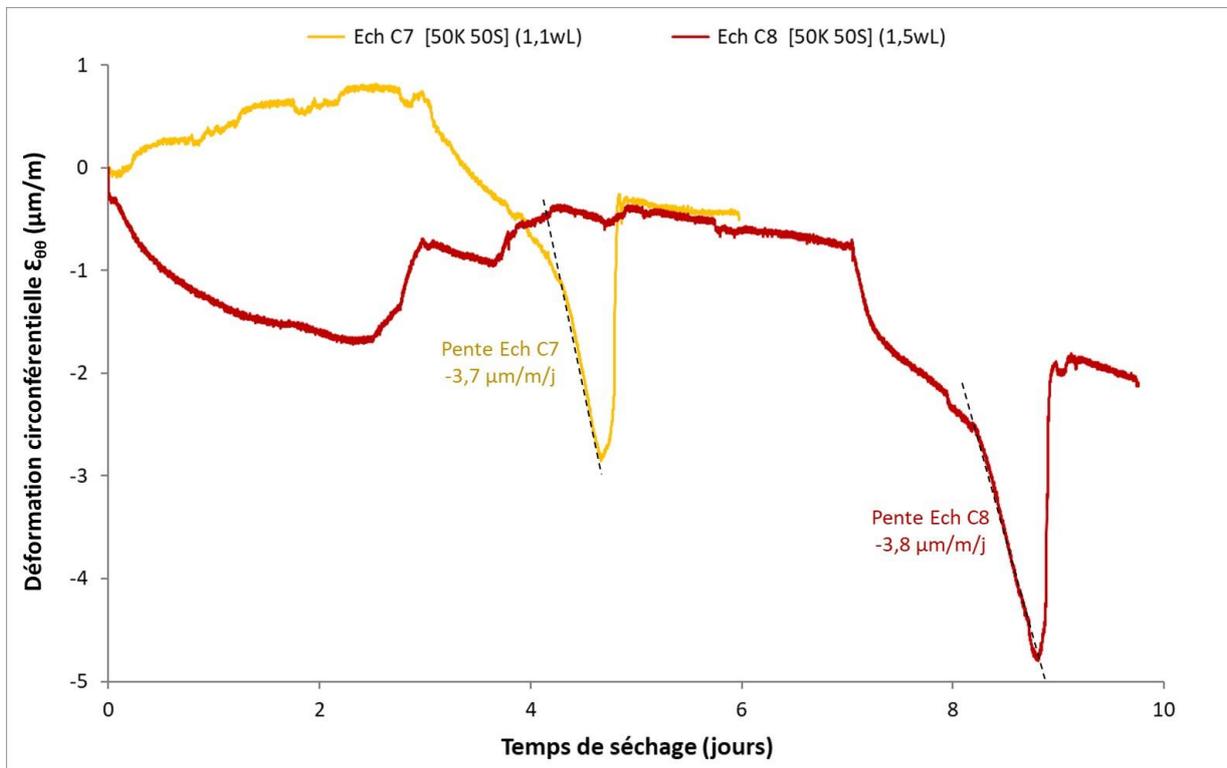


Figure 98 : (c) Evolution des déformations dans l'anneau en acier au cours du séchage pour les échantillons de « 50K 50S ».

Concernant l'effet de l'amendement de l'argile avec une fraction granulaire (sable), les Figures 99(a) et 99(b) présentent l'évolution des déformations circonférentielles de l'anneau en acier pour trois mélanges ayant la même teneur en eau initiale : le 100 K0S (100 % de Kaolinite et 0% de Sable), le 75K 25S (mélange de 75 % de Kaolinite et de 25 % de Sable) et 50K 50S (mélange de 50 % de Kaolinite et de 50 % de Sable). On remarque que la pente de déformation devient plus raide avec l'augmentation de la proportion du sable ajouté. Pour une teneur en eau initiale de $1.1w_L$, cette pente augmente de $-1.2 \mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$ à $-2.9 \mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$ en ajoutant 25 % du sable, puis elle augmente à $-3.7 \mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$ en ajoutant 50 % du sable (Figure 99(a)). De même, cette augmentation est également observée dans les échantillons ayant une teneur en eau initiale de $1.5w_L$ (Figure 99(b)). Ceci indique que l'amendement de l'argile avec une fraction granulaire rend la rupture du matériau plus rapide lors de la dessiccation. Cette rupture rapide peut être due à la diminution de la cohésion moyenne du matériau argileux lorsqu'il est mélangé avec un matériau granulaire non-cohésif [Dafalla, 2013].

Concernant la déformation maximale à la rupture, on observe que l'amendement de l'argile avec 25 % du sable (75K 25S) permet d'avoir la déformation la plus importante lors de la rupture du matériau, matérialisée par une chute brutale de la compression. En évaluant ce critère en termes de contraintes déduites de l'équation (18), on trouve que les matériaux contenant 0 % du sable (100K 0S) et 50 % du sable (50K 50S) possèdent une résistance à la traction variant entre 230 et 260 kPa, alors que le matériau contenant 25 % du sable (75K 25S) possède une résistance à la traction variant entre 350 et 380 kPa. Ceci montre que l'amendement de la kaolinite avec une fraction granulaire améliore les propriétés mécaniques dans un certain pourcentage de sable ajouté. Au-delà, on observe une chute de ces propriétés. La résistance mécanique relativement élevée des mélanges argile/sable est due au fait que la fraction granulaire sert à assurer la stabilité du mélange en mobilisant le frottement granulaire, tandis que l'argile forme une matrice cohésive qui a pour but de combler les vides et d'adhérer les particules de sable [Kenney, 1977].

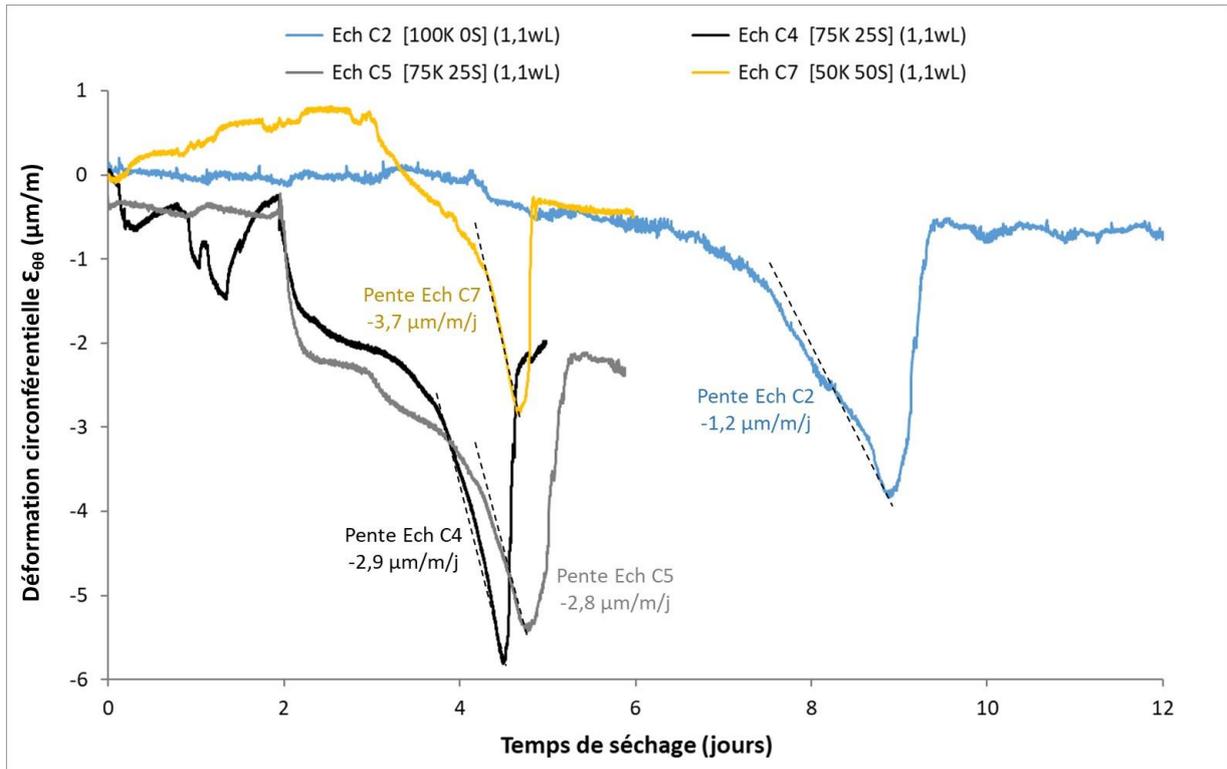


Figure 99: (a) Evolution des déformations dans l'anneau en acier au cours du séchage pour une teneur en eau initiale de $1.1w_L$.

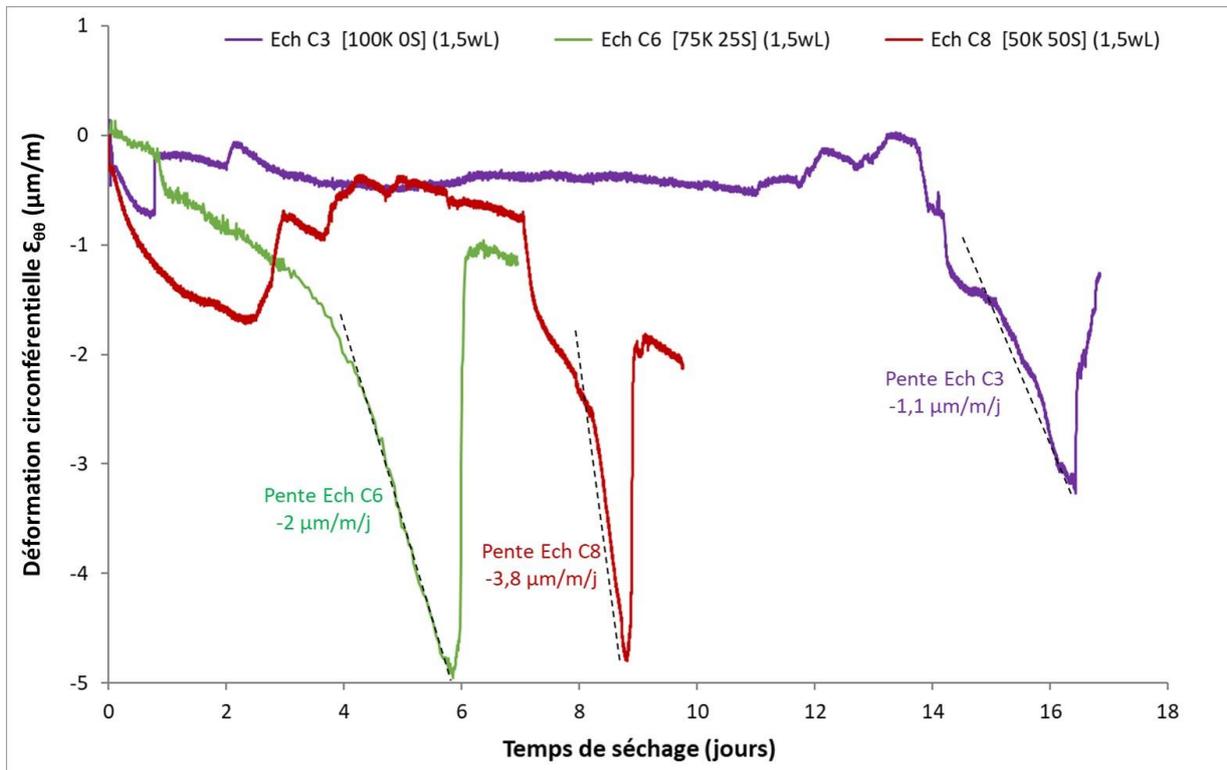


Figure 99: (b) Evolution des déformations dans l'anneau en acier au cours du séchage pour une teneur en eau initiale de $1.5w_L$.

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la fissuration par dessiccation des matériaux argileux à l'aide de la technique de l'essai à l'anneau (Ring-Test). En se basant sur la loi de comportement de l'anneau métallique empêchant le retrait centripète de l'échantillon étudié, nous avons estimé les contraintes mécaniques qui se développent dans le matériau argileux depuis l'état initial saturé et jusqu'à sa rupture par dessiccation.

L'essai préliminaire réalisé sur un mortier de ciment (Ech C1) est comparé à un résultat de la littérature obtenu sur le même matériau. Le bon accord entre les deux résultats a permis de valider le dispositif Ring-Test (ASTM C1581), dans le but de tenter de l'étendre aux matériaux argileux. De même, un essai sur un matériau argileux (EchC4 et EchC5) est dupliqué avec le dispositif Ring-Test et a montré une bonne reproductibilité des mesures.

Par ailleurs, la comparaison entre la résistance à la traction annulaire calculée à l'aide du dispositif Ring-Test et la résistance à la traction par fendage (essai brésilien) a montré qu'il existe un ratio d'environ 2 entre les deux valeurs. Néanmoins, la technique de mesure de la résistance à la traction à l'aide du dispositif Ring-Test s'avère être plus efficace, du fait que la rupture de l'échantillon se produit par traction « quasi-simple », puisque les contraintes circonférentielles de traction sont largement supérieures aux contraintes radiales de compression.

En revanche, l'amendement de l'argile avec une fraction granulaire a rendu la rupture du matériau plus rapide lors de la dessiccation. Ceci peut être due à la diminution de la cohésion globale du matériau argileux lorsqu'il est mélangé un matériau granulaire ayant une cohésion nulle. De même, l'amendement de l'argile avec une proportion de 25 % du sable a montré une résistance mécanique relativement élevée. Ceci montre que l'amendement de la kaolinite avec une fraction granulaire améliore les propriétés mécaniques dans un certain pourcentage de sable ajouté. Au-delà, on observe une chute de ces propriétés. La résistance mécanique relativement élevée des mélanges argile/sable est due au fait que la fraction granulaire sert à assurer la stabilité du mélange en mobilisant le frottement granulaire, tandis que l'argile forme une matrice cohésive qui a pour but de combler les vides et d'adhérer les particules de sable.

La durée de séchage assez importante des matériaux argileux dans ce dispositif Ring-Test (ASTM C1581) met en évidence la nécessité de développer un autre dispositif Ring-Test plus adapté à ce type de matériau. De même, le manque d'informations sur l'état de déformations dans l'échantillon étudié indique l'importance de coupler cette technique Ring-Test avec la

technique de corrélation d'images numériques (DIC), afin de pouvoir coupler le champ de déformation durant la dessiccation aux contraintes développées dans le matériau.

Partie -C-

Développement d'un dispositif prototype DIC-CRT

SOMMAIRE DE LA PARTIE -C-

Chapitre V : Conception d'un essai à l'anneau prototype adapté aux argiles : DIC-CRT.... 143

V.1. Mise au point du dispositif DIC-CRT	145
V.1.1. Dimensionnement du dispositif	145
V.1.1.1. Géométrie de l'échantillon	145
V.1.1.2. Géométrie et type de l'anneau intérieur	146
V.1.1.3. Description du dispositif DIC-CRT	148
V.1.2. Sélection du système d'extensométrie	150
V.1.2.1. Caractéristiques des jauges d'extensométrie.....	151
V.1.2.1.1. Système de codage des jauges d'extensométrie	151
V.1.2.1.2. Pont de Wheatstone.....	151
V.1.2.1.3. Compensation de l'effet thermique	154
V.1.2.2. Caractéristiques du conditionneur	154
V.1.2.2.1. Connectique des câbles.....	154
V.1.2.2.2. Réglage du gain	155
V.1.3. Calibration des jauges KFW	156
V.1.3.1. Etalonnage avec une sollicitation radiale isotrope	156
V.1.3.2. Dérive des jauges KFW	158
V.1.4. Re-sélection des jauges d'extensométrie.....	159
V.1.5. Calibration des jauges KFGS	160
V.1.5.1. Dérive des jauges KFGS.....	160
V.1.5.2. Etalonnage à l'aide d'une contrainte isotrope	161
V.1.5.3. Etalonnage à l'aide d'un essai de compression diamétrale	163
V.2. Mesure de la succion par tensiométrie	166
V.2.1. Développement d'un tensiomètre adapté au dispositif DIC-CRT	166
V.2.2. Calibration du tensiomètre	167
V.2.2.1. Test d'étalonnage.....	167
V.2.2.1.1. Pression positive	167
V.2.2.1.2. Pression négative	167
V.2.2.1.3. Stabilité du tensiomètre.....	168
V.2.2.2. Evaluation du temps de réponse	169
V.3. Conclusion	171

Chapitre VI : Etude du retrait empêché à l'aide du dispositif DIC-CRT..... 173

VI.1. Essai de retrait empêché sur la kaolinite	173
VI.1.1. Mise en œuvre	174
VI.1.2. Évolution de la teneur en eau et de la succion durant la dessiccation.....	175
VI.1.3. Déformations mesurées par la technique CRT	178

VI.1.4. Analyse du retrait et de la fissuration	180
VI.1.5. Déformations mesurées par la technique DIC	181
VI.1.5.1. <i>Déformations dans le plan (2D)</i>	181
VI.1.5.2. <i>Stéréo-corrélation (3D)</i>	187
VI.1.6. Corrélacion entre les techniques DIC et CRT	191
VI.2. Effet des conditions aux limites et de l'état hydrique initial sur le retrait et la fissuration des argiles	193
VI.2.1. Cinétique de séchage	193
VI.2.2. Déformations mesurées par la technique CRT	194
VI.2.3. Analyse du retrait et de la fissuration	196
VI.2.4. Déformations mesurées par la technique DIC	197
VI.2.4.1. <i>Déformations dans le plan (2D)</i>	197
VI.2.4.2. <i>Stéréo-corrélation (3D)</i>	199
VI.2.5. Corrélacion entre les techniques DIC et CRT	200
VI.3. Effet des renforts sur le retrait et la fissuration des argiles	205
VI.3.1. Matériaux des renforts	205
VI.3.1.1. <i>Treillis en acier</i>	205
VI.3.1.2. <i>Fibres végétales</i>	205
VI.3.2. Protocole de mise en œuvre	206
VI.3.3. Cinétique de séchage	207
VI.3.4. Déformations mesurées par la technique CRT	208
VI.3.5. Analyse du retrait et de la fissuration	211
VI.3.6. Déformations mesurées par la technique DIC	213
VI.3.7. Corrélacion entre les techniques DIC et CRT	217
VI.4. Effet de l'humidité relative ambiante sur le retrait et la fissuration des argiles	220
VI.4.1. Méthodes	220
VI.4.1.1. <i>Méthode de contrôle de l'humidité relative ambiante</i>	220
VI.4.1.2. <i>Relation succion - humidité relative</i>	222
VI.4.1.3. <i>Ré-calibration de la technique DIC suite à la présence de l'interface en verre</i>	223
VI.4.2. Effet de l'humidité relative ambiante sur la cinétique de séchage	224
VI.4.3. Déformations mesurées par la technique CRT	225
VI.4.4. Analyse du retrait et de la fissuration	229
VI.4.5. Déformations mesurées par la technique DIC	230
VI.5. Discussion : Contraintes mécaniques et succion.....	232
VI.5.1. Estimation de la contrainte totale dans l'argile	232
VI.5.2. Comparaison des contraintes DIC-CRT et ASTM Ring-Test.....	234
VI.5.3. Comparaison avec les résultats de la littérature	235
VI.5.4. Analyse de l'évolution des contraintes totales et de la succion dans l'argile au cours de la dessiccation.....	238
VI.6. Conclusion.....	240

Chapitre V : Conception d'un essai à l'anneau prototype adapté aux argiles : DIC-CRT

Dans les chapitres précédents, nous avons étudié la fissuration par dessiccation dans les argiles à travers les méthodes de retrait libre d'une part et de retrait empêché d'autre part. Dans la première méthode, nous avons utilisé la technique de corrélation d'images numériques (DIC) pour analyser l'état de déformations au sein du matériau durant toute la phase de dessiccation et jusqu'à sa rupture par fissuration. Dans la deuxième méthode, nous avons utilisé la technique de l'essai à l'anneau (Ring-Test ASTM) pour remonter à l'état de contraintes développées dans le matériau.

Dans ce chapitre, nous avons développé un dispositif expérimental adapté à l'étude de la dessiccation des argiles, appelé DIC-CRT (Digital Image Correlation - Clay Ring Test) [El Hajjar, 2020]. Ce dispositif vise à combiner les deux techniques expérimentales de corrélation d'images numériques et de l'essai à l'anneau. Le but étant d'évaluer les contraintes mécaniques internes qui se développent au sein du matériau durant la dessiccation, et de les associer aux déformations de retrait aboutissant à l'initiation et la propagation des fissures. La relation entre l'état de déformations et l'état de contraintes permet de mettre en évidence le comportement mécanique du matériau argileux. En outre, nous avons équipé ce dispositif de tensiomètres permettant de suivre l'évolution de la succion pendant le séchage.

V.1. Mise au point du dispositif DIC-CRT

V.1.1. Dimensionnement du dispositif

V.1.1.1. Géométrie de l'échantillon

Le choix de la hauteur des échantillons est fait après une étude d'optimisation basée sur plusieurs essais de retrait libre effectués dans un moule carré de dimensions de 200 x 200 mm sur la kaolinite et la montmorillonite (Chapitre 3). Ces essais ont montré que la géométrie de l'échantillon joue un rôle important sur son comportement hydro-mécanique durant la dessiccation. Ces analyses ont abouti au choix d'une hauteur de 30 mm, afin de limiter l'effet des conditions aux limites, d'assurer des déformations homogènes sans soulèvement, de limiter l'effet du gradient de teneur en eau vertical et d'avoir une durée de dessiccation raisonnable, estimé à une dizaine de jours environ.

Concernant les dimensions dans le plan, nous avons opté pour un rayon extérieur de 200 mm, ordre de grandeur similaire aux dimensions du moule carré (200 x 200 mm) étudié au Chapitre 3. Cette dimension permet d'avoir une section plane conséquente, propice au suivi du champ de déformation par la DIC, ainsi que l'amorce et la propagation de la fissuration durant la dessiccation.

V.1.1.2. Géométrie et type de l'anneau intérieur

La géométrie de l'anneau métallique est déterminée en tenant compte des contraintes de retrait théoriques générées par l'échantillon lors de la dessiccation et du champ de vision des caméras 2D/3D-DIC. Différents géométries et types de matériaux sont étudiés afin de trouver la solution la plus appropriée, économique, pratique et permettant d'obtenir des résultats compatibles avec les matériaux argileux.

Concernant le rayon intérieur de l'anneau métallique, nous avons choisi un rayon de 25 mm. Ce rayon permet d'avoir un périmètre de 157 mm, permettant ainsi d'avoir 4 points de mesure des déformations sur l'anneau positionnés à 90° l'un de l'autre pour une meilleure précision.

Pour définir le type du matériau et la géométrie de l'anneau intérieur, nous avons effectué une simulation numérique, basée sur la formulation de l'équation. En tenant compte de la gamme de mesure des jauges de déformation choisies (référence : Kyowa KFW-5-120-C1-11L1M2R), nous avons adopté une plage de déformation circonférentielle comprise entre 1.10^{-6} et 5.10^{-5} m/m, afin d'avoir des mesures suffisamment précises d'une part et d'éviter de dépasser la gamme de mesure des jauges de déformation d'autre part. Ainsi, le choix du type de matériau de l'anneau est fait de manière que les contraintes circonférentielles engendrées par les déformations de retrait de l'argile ne dépassent pas cette plage de déformation circonférentielle. Notons que les essais de retrait empêché que nous avons réalisés sur des matériaux argileux (Chapitre 4) ont donné des contraintes circonférentielles variantes entre 50 kPa et 400 kPa. Par mesure de sécurité, nous avons retenu une plage de contrainte circonférentielle comprise entre 10 kPa et 500 kPa (soit entre 1.10^4 et 5.10^5 Pa). En fixant par exemple l'épaisseur de l'anneau à 5 mm, nous avons réalisé une simulation numérique pour analyser les relations contrainte-déformation sur trois types de matériaux : plexiglas, aluminium et acier (Figure 100(a)). L'intersection entre l'intervalle de contrainte sélectionnée (1.10^4 à 5.10^5 Pa) et l'intervalle de déformation (1.10^{-6} à 5.10^{-5} m/m) permet de définir l'aluminium ($E = 72$ GPa) comme un meilleur choix pour l'anneau intérieur.

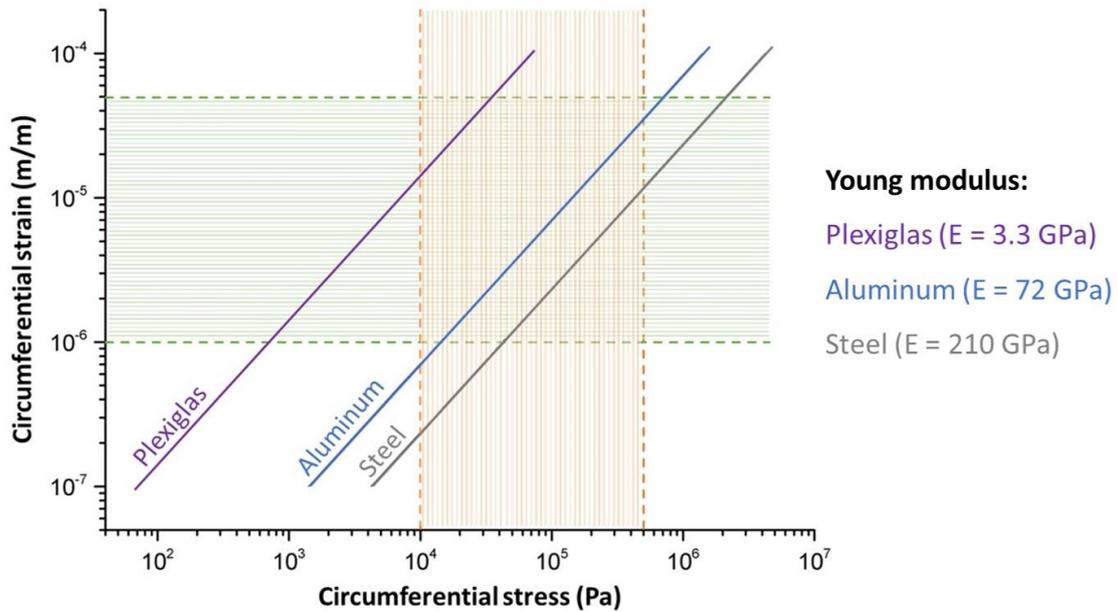


Figure 100: (a) Simulation numérique des déformations circonférentielles induites par les déformations de retrait des matériaux argileux pour trois types de matériaux.

Par ailleurs, nous avons réalisé une simulation numérique pour optimiser cette fois l'épaisseur de l'anneau en aluminium de diamètre intérieur de 25mm (Figure 100(b)). L'intersection entre l'intervalle de contrainte sélectionnée ($1 \cdot 10^4$ à $5 \cdot 10^5$ Pa) et l'intervalle de déformation ($1 \cdot 10^{-6}$ à $5 \cdot 10^{-5}$ m/m) permet de choisir l'épaisseur de 5 mm ($R_1=25\text{mm}$; $R_2=30\text{mm}$) comme meilleure épaisseur de l'anneau métallique intérieur.

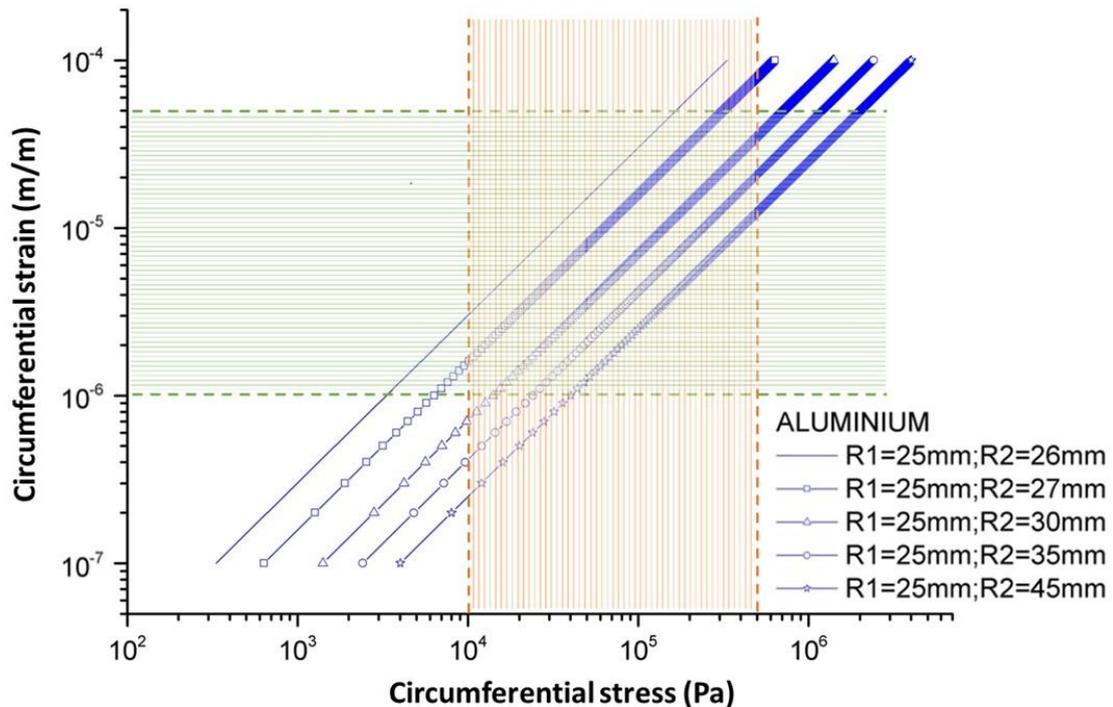


Figure 100 : (b) Simulation numérique des déformations circonférentielles induites par les déformations de retrait des matériaux argileux en fonction des différentes épaisseurs d'un anneau en aluminium.

V.1.1.3. Description du dispositif DIC-CRT

Suite aux analyses ci-dessus, nous avons choisi l'aluminium 2017a-AU4G comme matériau de l'anneau intérieur. Ce métal est conforme avec les recommandations de standard NF EN 754-2 et NF EN 755-2. Son module de Young est de 72 GPa, sa limite élastique est de 280 MPa, son coefficient de poisson est de 0.33 et sa masse volumique est de 2790 kg/m³. C'est un anneau cylindrique de 25 mm de rayon intérieur, 30 mm de rayon extérieur (soit 5 mm d'épaisseur) et 30 mm de hauteur. L'argile, constituant l'échantillon à étudier, sera coulée autour de la face externe de l'anneau métallique jusqu'à un rayon externe de 100 mm (soit 70 mm de largeur entre rayons interne et externe du sol). Le coffrage extérieur de l'échantillon d'argile consiste en un anneau amovible en PVC d'épaisseur 5 mm. Ce coffrage est fixé à l'aide d'ancrages métalliques amovibles pendant la mise en œuvre de l'échantillon. Quatre jauges de déformation sont fixées à mi-hauteur sur la circonférence interne de l'anneau en aluminium. Ces jauges sont connectées à un conditionneur-amplificateur VISHAY. Par ailleurs, trois tensiomètres en céramique, ayant une gamme de mesure entre 0 et 90 kPa, sont insérés dans la base de l'appareil en contact avec l'échantillon d'argile, afin de permettre le suivi de la variation de la succion au cours de la dessiccation. Ces tensiomètres sont équipés d'un capteur de pression absolue alimenté par un générateur d'électricité. Les caractéristiques des jauges d'extensométrie et des capteurs tensiométriques seront détaillées dans les sections suivantes.

L'appareil DIC-CRT et l'échantillon d'argile sont placés sur une balance électronique d'une précision de 0.05 g et d'une capacité de pesée de 6000 g, permettant de suivre l'évolution du poids de l'échantillon tout au long du processus de séchage et d'en déduire sa teneur en eau moyenne. Pour la qualité d'imagerie de la technique DIC, le banc expérimental est éclairé à l'aide d'une lumière froide et enveloppé d'un rideau occultant pour éviter les lumières parasites. L'ensemble du dispositif expérimental est contrôlé en termes de température et d'humidité relative (selon les conditions de chaque essai). Par ailleurs, l'aspect moucheté est réalisé avec une poudre de PVC de couleurs blanche et noire, étalé sur la surface de l'échantillon pour permettre une bonne qualité de corrélation d'images numériques. La prise de vue est assurée à l'aide de deux types d'appareils : Un appareil photo Canon 600D pour l'analyse 2D-DIC, et deux appareils de type FL-CC2514-2M, pour l'analyse 3D-DIC. Le système d'imagerie, piloté par ordinateur, permet des prises de vues monochromatiques (en niveaux de gris) à des intervalles de temps réguliers. Les paramètres du système 2D/3D-DIC sont détaillés dans le Chapitre III (voir paragraphe III.1.3.1).

Un schéma descriptif du dispositif DIC-CRT est illustré dans la Figure 101.

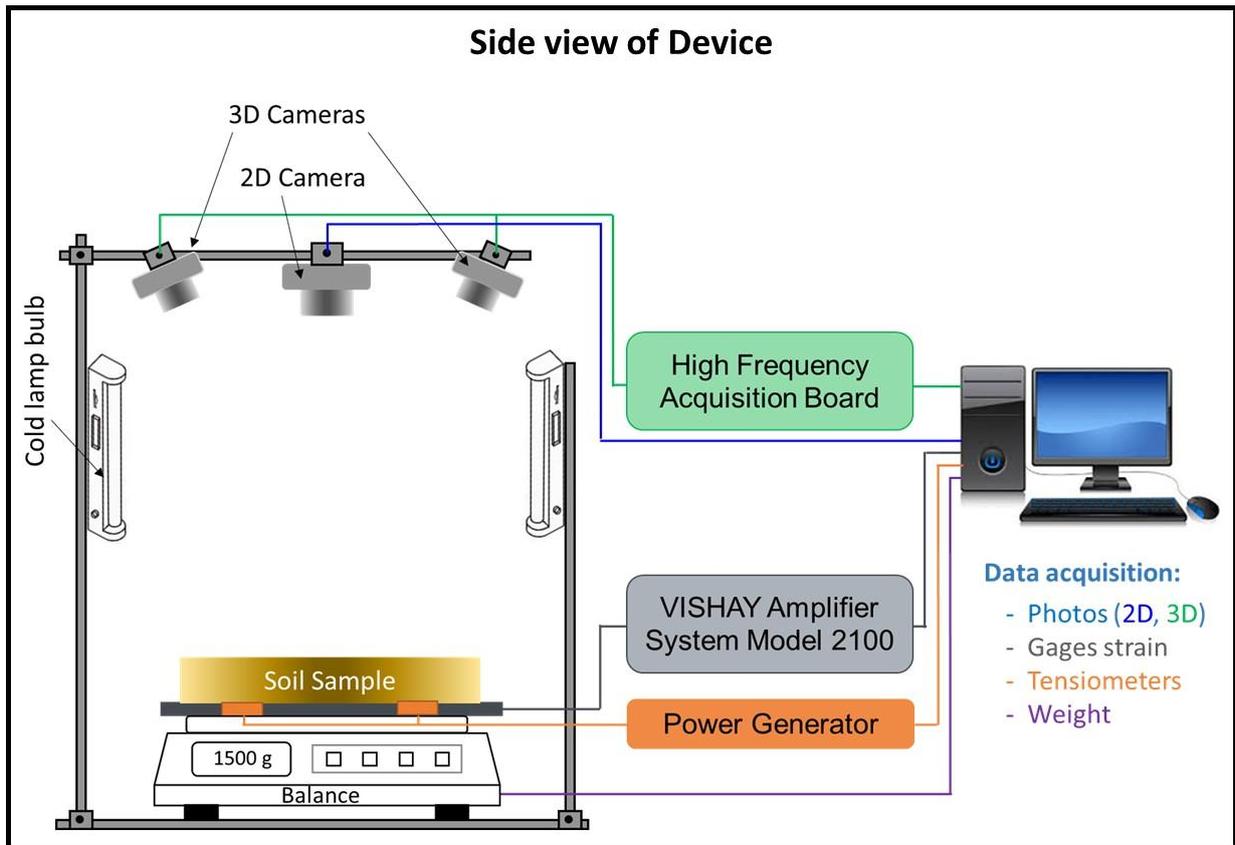


Figure 101(a): Schéma descriptif du dispositif expérimental DIC-CRT (vue générale).

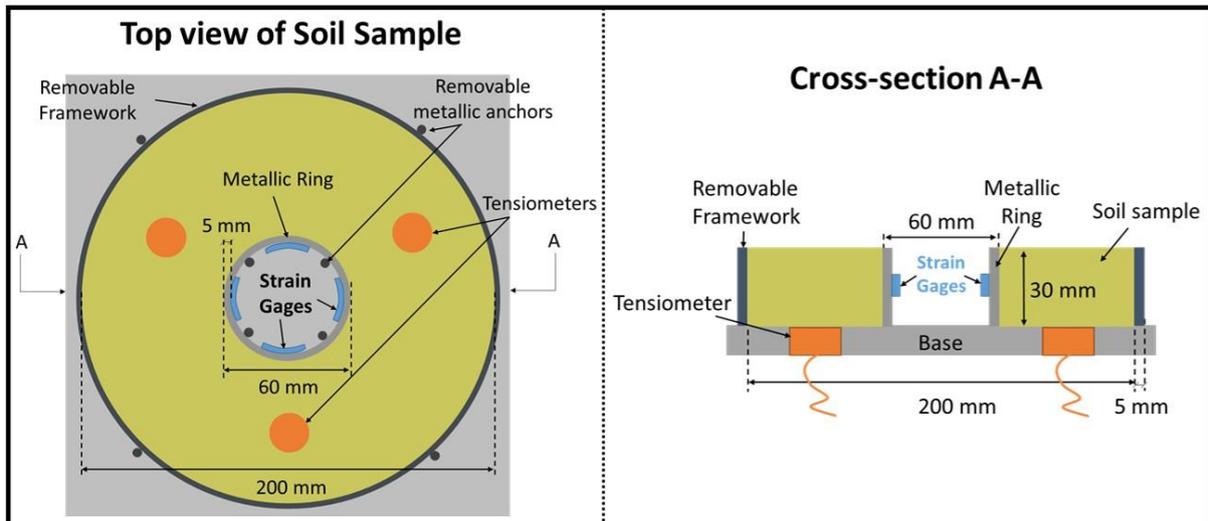


Figure 101(b): Schéma descriptif du dispositif expérimental DIC-CRT (vue de dessus et coupe transversale).

V.1.2. Sélection du système d'extensométrie

Les jauges de déformation (ou de contrainte) sont des composants électroniques dont la résistance varie en fonction de leur allongement dans la direction de mesure. L'objectif des jauges de déformation est de convertir la déformation d'un échantillon en une variation de résistance électrique. Une jauge de déformation est généralement constituée d'une fine feuille de métal (quelques μm d'épaisseur) et d'un isolant électrique, qui est traité comme une carte de circuit imprimé. Cette feuille de métal se compose d'un fil très fin enroulé selon une direction préférentielle sous forme des spires rapprochées (Figure 102). La résistance R de ce fil (en Ω) est régie par trois paramètres : sa longueur L (en m), sa section a (en m^2) et sa résistivité électrique ρ (en $\Omega\cdot\text{m}$) qui dépend du matériau constituant le fil.

$$R = \rho \cdot L/A \quad (22)$$

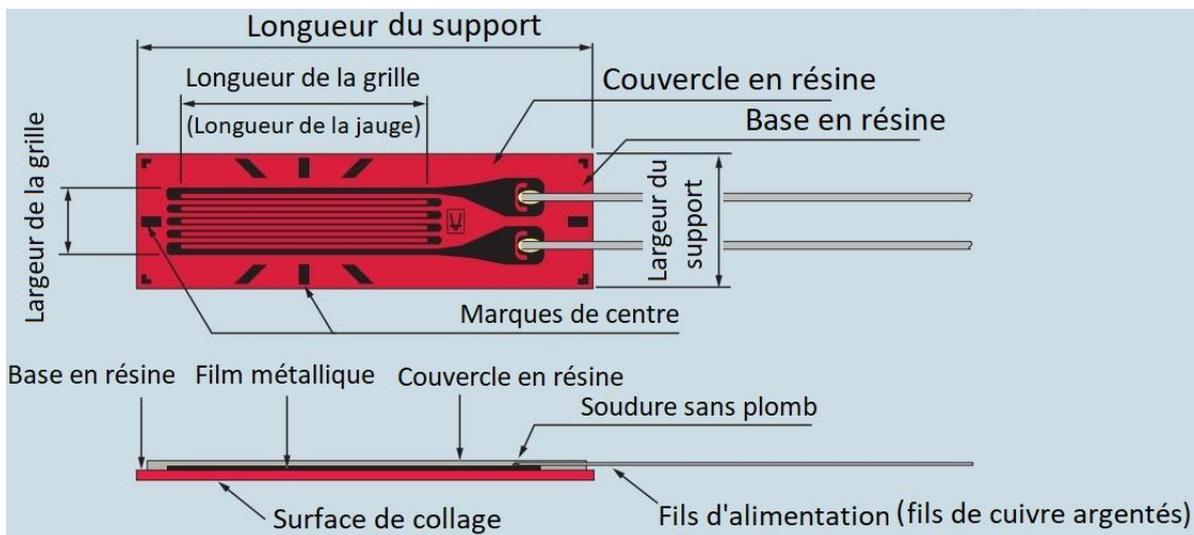


Figure 102: Structure d'une jauge de déformation.

Un paramètre fondamental de la jauge de contrainte est sa sensibilité à la déformation, exprimée quantitativement en tant que facteur de jauge K . Le facteur de jauge est défini comme le rapport de la variation fractionnelle de la résistance électrique à la variation fractionnelle de la longueur (déformation) :

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad (23)$$

K est une constante qui dépend des matériaux considérés et de la température. L'alliage le plus couramment utilisé pour la fabrication des jauges est le Constantan (45 % du Cuivre et 55 % du Nickel).

V.1.2.1. Caractéristiques des jauges d'extensométrie

Le choix des jauges d'extensométrie à utiliser dans une expérimentation est toujours très délicat, car cela dépend de nombreux paramètres comme l'étendue de mesure, sa durée, le type de support sur lesquelles elles doivent être fixées, les fluctuations de température ambiante, ... Dans notre cas, nous disposions au niveau du laboratoire d'un lot de jauges de marque KYOWA KFW-5-120-C1-11L1M2R qui ont été expérimentées dans le domaine de la géotechnique et nous avons décidé d'exploiter dans un premier temps ce modèle, pour voir sa compatibilité avec nos conditions expérimentales, y compris des durées moyennes relativement longues de nos essais et les dérives associées.

V.1.2.1.1. Système de codage des jauges d'extensométrie

Le système de codage des jauges de déformation permet de définir très précisément leurs caractéristiques, ce qui est important pour choisir le type de jauge adapté à leur utilisation. Les jauges utilisées sont de type : KFW-5-120-C1-11L1M2R. Leur facteur de jauge est de 2.08.

Leur système de codage est défini de la manière suivante :

KFW : Jauges de déformation en feuille imperméables de marque KYOWA.

5 : longueur de la jauge (en mm).

120 : résistance de la jauge (en Ω).

C1 : la géométrie de la jauge est uniaxiale et les fils d'alimentation sont d'une seule extrémité.

11 : coefficient de dilatation linéaire applicable (en ppm/°C), cette valeur correspond à des fils en acier ordinaire.

L1M2R : câble d'alimentation uniaxial et plat en 2 fils revêtus de vinyle, ayant une longueur de 1 m et qui supporte une température variante entre -10 °C et 80 °C.

V.1.2.1.2. Pont de Wheatstone

Pour qu'une jauge de contrainte puisse mesurer une déformation, elle devra être connectée à un circuit électrique capable de détecter les changements infimes de résistance correspondant à la déformation. Pour mesurer ces faibles variations de résistance et compenser la sensibilité à la température, les jauges sont toujours utilisées dans une configuration en pont avec une source de tension ou de courant d'excitation. Le pont de Wheatstone (1843), illustré dans la Figure 103(a), se compose de quatre branches résistives avec une tension d'excitation V appliquée sur le pont.

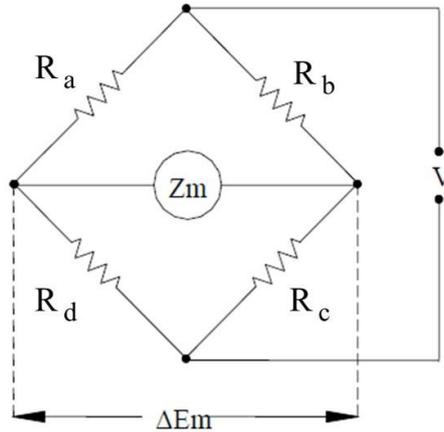


Figure 103: (a) Pont de Wheatstone

Notons que les variations des résistances ΔR_a , ΔR_b , ΔR_c et ΔR_d , l'équation du voltage à la sortie du pont de Wheatstone sera :

$$\Delta E_m = (\delta a - \delta b + \delta c - \delta d) \cdot V/4 \quad \text{avec } \delta i = \Delta R_i / R_i \quad (24)$$

D'après cette équation, on trouve qu'en plaçant deux jauges de même type dans des branches adjacentes, on peut éliminer les effets parasites dans les variations de résistance des jauges tel que l'effet thermique.

Un pont de Wheatstone peut être configuré selon un montage de quart de pont, de demi-pont ou de pont complet en fonction de l'objectif de la mesure effectuée :

i) Montage en quart de pont (système à 1 jauge) :

Avec un montage en quart de pont, une jauge de contrainte sera connectée à une branche du pont, alors que des résistances fixes seront connectées à chacune des trois autres branches (Figure 103(b)). Ce système, qui est simple à configurer, est largement utilisé dans la mesure générale des déformations. L'inconvénient de ce type de montage est qu'il est très influencé par la dilatation des fils due aux variations de la température ainsi qu'au réchauffement des fils par le courant électrique.

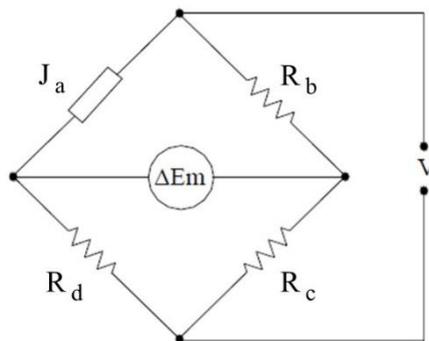


Figure 103: (b) Montage en quart de pont

ii) **Montage en demi-pont (système à 2 jauges) :**

En utilisant deux jauges de contrainte dans le pont, on peut minimiser l'effet de la température. Dans ce type de montage, deux jauges (une active J_a qui subit la déformation mécanique et une autre passive J_b) seront connectées au pont, chacune à des branches adjacentes ou opposées avec des résistances fixes insérées dans les autres branches (Figure 103(c)). En cas des jauges adjacentes, comme la variation de la température est identique dans les deux jauges, l'application de l'équation (24) aboutit à la compensation de l'effet thermique. Ainsi, on obtient uniquement la variation de voltage due à la déformation mécanique de la jauge active.

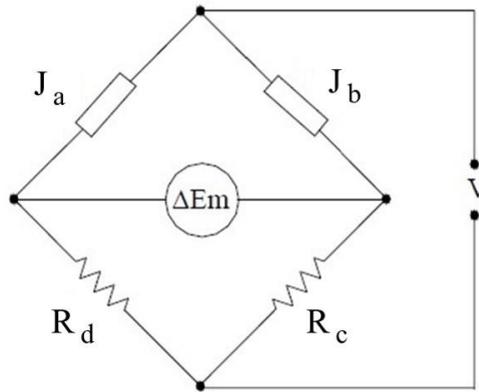


Figure 103: (c) Montage en demi-pont

iii) **Montage en pont complet (système à 4 jauges) :**

Le système de pont complet est constitué de 4 jauges de contrainte connectées à chacune des 4 branches du pont (Figure 103(d)). Ce type de montage est utilisé pour accroître davantage la sensibilité aux grandeurs cherchées, surtout lorsque la surface de l'élément qui subit la déformation permet l'installation de plusieurs jauges. De même, ce système est indispensable pour mesurer les déformations biaxiales ou en torsion.

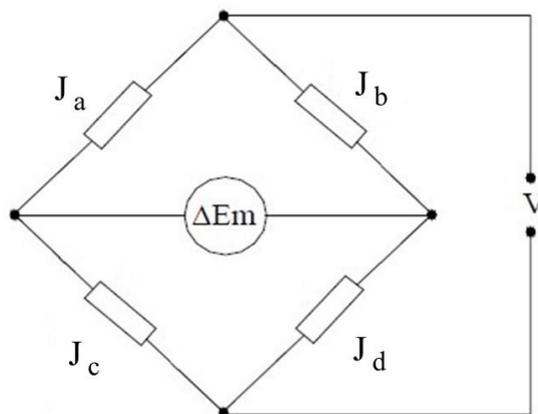


Figure 103: (d) Montage en pont complet

V.1.2.1.3. Compensation de l'effet thermique

Supposons que la variation de la résistance unitaire due à l'effet thermique est δi_t et celle due au chargement mécanique est δi_m . Ainsi, la variation apparente de la résistance unitaire de la jauge sera $\delta i = \delta i_m + \delta i_t$. Afin de permettre de mesurer que l'effet mécanique la jauge active J_a , on procède aux montages en demi-pont ou en pont complet. Dans le cas du demi-pont, la forme développée de l'équation (24) sera :

$$\Delta E_m = [(\delta a_m + \delta a_t) - (\delta b_m + \delta b_t) + \delta c - \delta d]. V/4 \quad (25)$$

Si les deux jauges ont les mêmes propriétés physiques et sont soumis aux mêmes conditions d'interférence, elles devront avoir le même effet thermique ($\delta a_t = \delta b_t$). Etant donné que la jauge J_b est une jauge passive non sollicitée mécaniquement ($\delta b_m = 0$), on aura donc une compensation systématique de l'effet thermique.

Dans notre cas, nous avons opté dans le dispositif DIC-CRT pour un montage en demi-pont afin d'assurer la compensation de l'effet thermique.

V.1.2.2. Caractéristiques du conditionneur

Les jauges d'extensométrie sont connectées à un conditionneur de marque VISHAY et de modèle 2120A. Ce conditionneur permet d'alimenter le secteur électrique en reliant les différentes tensions d'alimentation des ponts au voltmètre de contrôle de l'alimentation. De même, il a pour rôle de recevoir les signaux électriques de bas niveau et les amplifier en sorties de haut niveau adaptées à l'enregistrement dynamique simultané sur plusieurs canaux.

V.1.2.2.1. Connectique des câbles

Différents types de câblages peuvent être envisagés selon la nature des essais réalisés, statiques ou dynamiques. Pour des essais dynamiques, le but est de minimiser les bruits induits dans les jauges et les câblages ; alors que pour des essais statiques, le but est de minimiser les effets de la température ambiante sur les fils de liaison. Les Figure 104(a) et Figure 104(b) montrent la description des faces avant et arrière du conditionneur VISHAY 2120A.

Les connecteurs d'entrée adaptés à ce modèle sont des connecteurs cylindriques à 10 bornes de modèle MIL-DTL-26482, permettant d'assurer un montage en quart de pont, en demi-pont ou en pont complet. Pour un montage en demi-pont (Figure 104(c)), le fil positif de la jauge active devra être relié à la borne B, et celui de la jauge passive à la borne C, alors que les fils négatifs des deux jauges devront être reliés à la borne A. De même, le fil de terre (GND) des deux jauges

devra être relié à la borne F. En cas du quart de pont ou du demi-pont, les bornes D et E devront être court-circuitées.

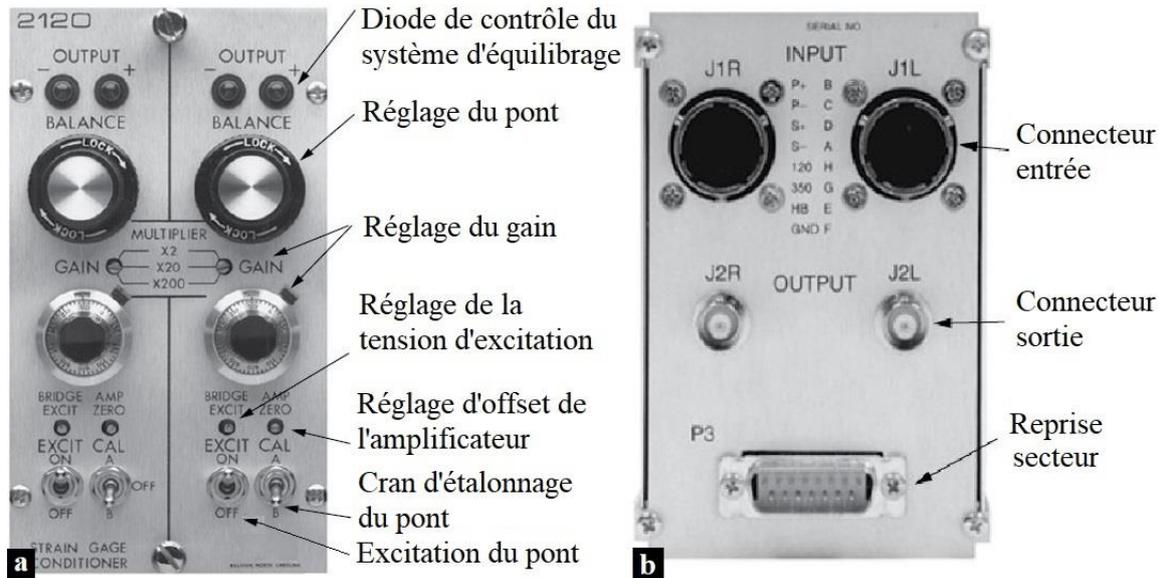


Figure 104: (a) Face avant et (b) Face arrière ; du conditionneur VISHAY 2120A.

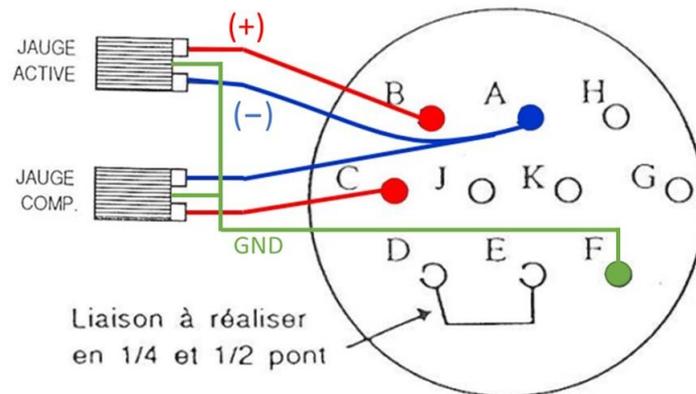


Figure 104 : (c) Câblage des fils des jauges active et passive dans le connecteur d'entrée du conditionneur.

V.1.2.2.2. Réglage du gain

Il existe deux méthodes pour ajuster le gain dans le conditionneur :

i) **méthode théorique** : pour un facteur de jauge $K = 2.08$ et une tension d'excitation $E = 2$ V, par exemple, une déformation $\epsilon = \Delta L/L = 1000 \mu\text{m}/\text{m}$ correspond à un signal de sortie « e » défini par la relation :

$$\frac{e}{E} = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} \quad \text{avec} \quad \frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} \quad (26)$$

$$\text{D'où} \quad e = \frac{E}{4} K \frac{\Delta L}{L} = \frac{2}{4} \times 2.08 \times 1000 \cdot 10^{-6} = 0.00104 \text{ V} = 1.04 \text{ mV.}$$

Si on souhaite obtenir un signal de sortie $e' = 1$ V, il faudra donc amplifier notre signal 1000 fois. Ainsi, le potentiomètre du gain sera réglé sur la valeur 1000.

ii) **méthode empirique** : grâce à la méthode d'étalonnage « shunt », on peut faire une simulation d'une déformation de $1000 \mu\text{m/m}$ en basculant le cran d'étalonnage du pont sur la position A. Il suffit donc d'ajuster légèrement le potentiomètre du gain de manière que l'écran d'affichage indique un signal de sortie $e' = 1000 \text{ mV}$.

Pratiquement, la méthode théorique sert à approcher le réglage, la finition étant par suite obtenue à travers la méthode empirique.

V.1.3. Calibration des jauges KFW

Afin de vérifier la fiabilité des mesures effectuées à l'aide des jauges de déformation KFW, il est indispensable de valider la précision des déformations mesurées à court terme et à long terme. Dans ce cadre, une étude comparative de résultats théoriques et expérimentaux est réalisée.

V.1.3.1. Etalonnage avec une sollicitation radiale isotrope

Une simulation numérique, basée sur la formulation de l'Equation (14), est effectuée afin d'estimer la déformation théorique subie par l'anneau métallique suite à une pression radiale appliquée sur sa surface externe. La Figure 105 représente l'évolution de la déformation circonférentielle ($\varepsilon_{\theta\theta}$) au niveau du rayon intérieur de l'anneau métallique en fonction de la pression d'interface fictive (P_{int}). A titre d'exemple, pour une pression radiale de $1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ (100 kPa), la circonférence interne de l'anneau se déforme de $-8.5 \cdot 10^{-6} \text{ m/m}$ ($-8.5 \mu\text{m/m}$). De même, pour une pression radiale de $2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ (200 kPa), la circonférence interne de l'anneau se déforme de $-1.7 \cdot 10^{-5} \text{ m/m}$ ($-17 \mu\text{m/m}$).

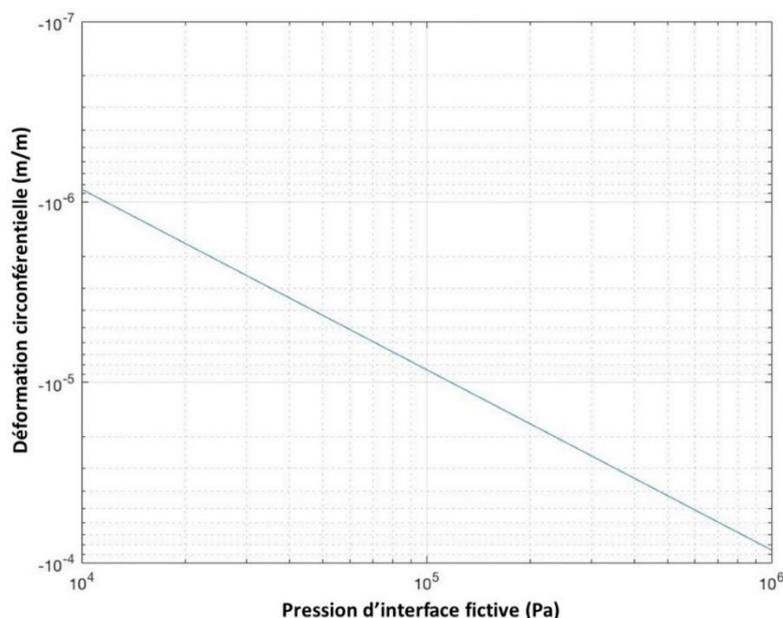


Figure 105: Déformation circonférentielle théorique de l'anneau métallique en fonction d'une pression d'interface fictive.

L'étalonnage des jauges de déformation KFW, collées dans la direction circonférentielle au niveau du rayon intérieur de l'anneau métallique et raccordées en demi-pont, est réalisé à l'aide d'une pression radiale appliquée à l'aide d'un contrôleur de pression (STDDPC) sur la surface externe de l'anneau dans une cellule triaxiale. Des incréments de 100 kPa et 200 kPa sont appliqués en mesurant simultanément l'évolution de la déformation des jauges d'extensométrie. La Figure 106 montre l'évolution de la déformation des jauges en fonction des pressions radiales appliquées. Pour des incréments de 200 kPa, on mesure des déformations de 15.5, 19.5, 14 et 18 $\mu\text{m}/\text{m}$ respectivement au niveau des jauges J1, J2, J3 et J4 (moyenne = 16.8 $\mu\text{m}/\text{m}$). En comparant ces mesures avec la déformation théorique (17 $\mu\text{m}/\text{m}$) correspondant à un incrément de 200 kPa, on peut constater un bon accord entre les résultats théoriques et expérimentaux, avec des écarts ne dépassant pas 3 $\mu\text{m}/\text{m}$. De même, pour un incrément de 100 kPa, on mesure des déformations de 8.5, 9.5, 6 et 10.5 $\mu\text{m}/\text{m}$ respectivement au niveau des jauges J1, J2, J3 et J4 (moyenne = 8.6 $\mu\text{m}/\text{m}$). Ces résultats montrent également un bon accord avec la déformation théorique (8.5 $\mu\text{m}/\text{m}$) correspondant à un incrément de 100 kPa. Un tableau récapitulatif de ces déformations théorique et expérimentale est présenté ci-dessous (Tableau 11).

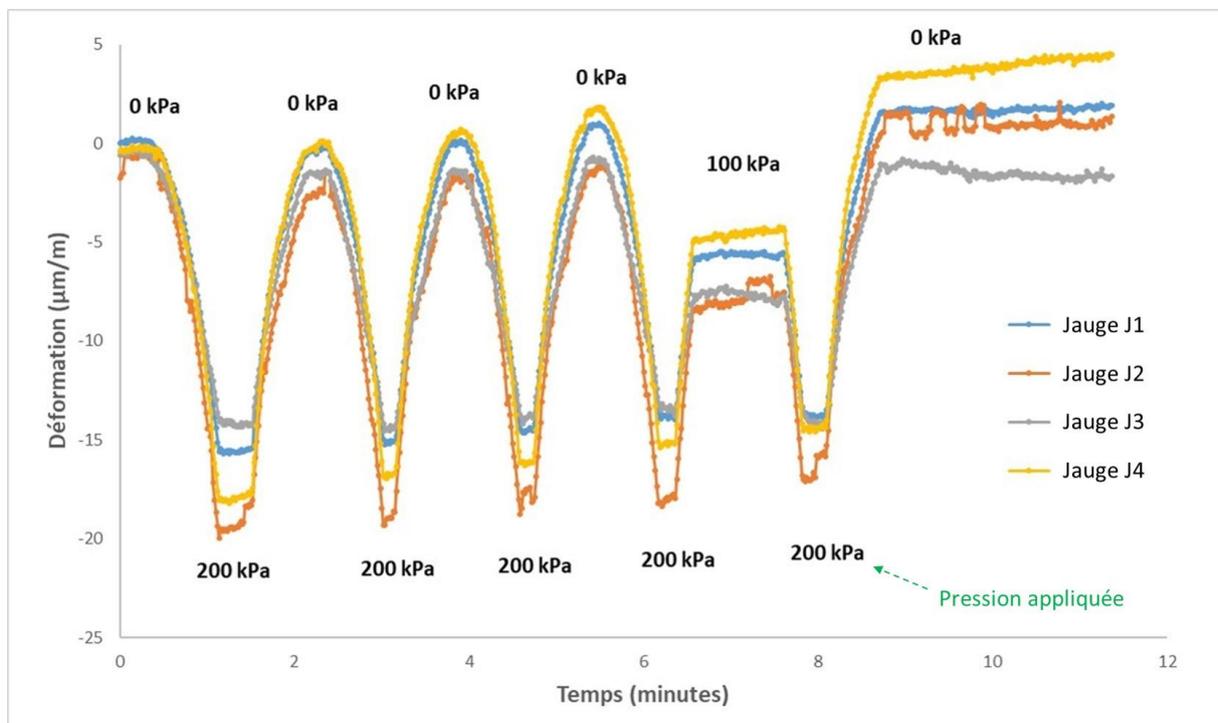


Figure 106: Déformations mesurées par les jauges d'extensométrie KFW suite à des incréments de 100 kPa et 200 kPa.

Jauge	200 kPa (Déf. théorique)	200 kPa (Déf. expérimentale)	100 kPa (Déf. théorique)	100 kPa (Déf. expérimentale)
J1	16.8	15.5	8.5	8.5
J2		19.5		9.5
J3		14		6
J4		18		10.5

Tableau 11: Etude comparative entre les déformations théorique et expérimentale pour des incréments de 200 et 100 kPa. Etalonnage des jauges d'extensométrie KFW avec une sollicitation radiale isotrope.

V.1.3.2. Dérive des jauges KFW

Etant donné que nos essais expérimentaux peuvent durer plusieurs jours, nous avons réalisé un essai à vide (sans sollicitation mécanique) pour évaluer la dérive de jauges KFW dans le temps. Sans déformation de l'anneau, une mesure d'une déformation "nulle" était attendue en fonction du temps, la compensation thermique étant déjà assurée par le montage en demi-pont. La Figure 107 montre l'évolution de la déformation des jauges au cours du temps. On observe une dérive de 40 $\mu\text{m}/\text{m}$ sur une période de 24 heures, alors que notre dispositif expérimental DIC-CRT est conçu pour mesurer des déformations mécaniques de l'ordre de 20 $\mu\text{m}/\text{m}$ sur une période de 4 jours. Ainsi, les déformations expérimentales de l'anneau métallique seront masquées par cette dérive de 40 $\mu\text{m}/\text{m}$. Par conséquent, nous constatons que les jauges KFW sont efficaces pour des mesures instantanées de la déformation, mais pas pour des mesures effectuées sur le long-terme.

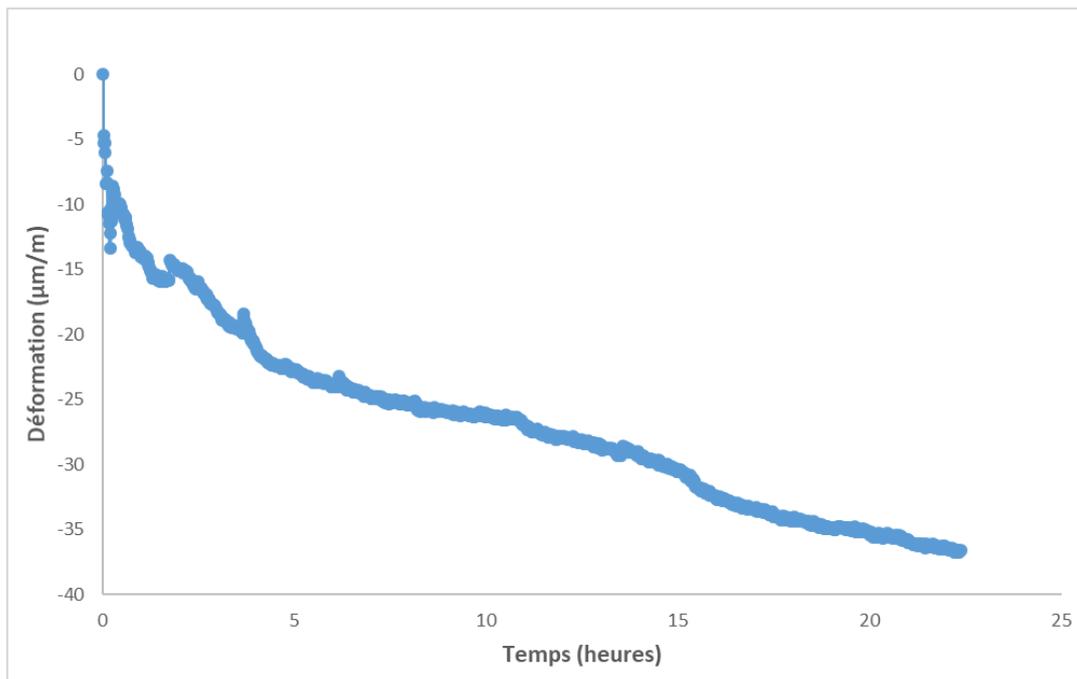


Figure 107: Déformations mesurées par les jauges d'extensométrie KFW pour un essai à vide.

V.1.4. Re-sélection des jauges d'extensométrie

Après avoir discuté avec des spécialistes en extensométrie, nous avons constaté qu'une mesure assez précise (de l'ordre de 20 $\mu\text{m}/\text{m}$) de la déformation mécanique des jauges d'extensométrie à long terme nécessite une mise en œuvre spéciale (collage à chaud, protection vernis, isolement électrique des soudures...). En outre, le modèle classique des jauges « KFW-5-120-C1-11L1M2R », considéré comme efficace pour des mesures instantanées (Figure 106), n'est pas adapté aux mesures sur des longues périodes. Ainsi, nous avons procédé à l'utilisation des jauges d'extensométrie de modèle « KFGS-1-350-C1-11N30C2 », recommandées par une entreprise spécialisée en extensométrie. Leur facteur de jauge K est de 2.11. Le système de codage de ces jauges se définit de la manière suivante :

KFGS : Jauges de contrainte KYOWA en aluminium à usage général.

1 : longueur de la jauge (en mm).

350 : résistance de la jauge (en Ω).

C1 : la géométrie de la jauge est uniaxiale et les fils d'alimentation sont d'une seule extrémité.

11 : coefficient de dilatation linéaire applicable (en $\text{ppm}/^\circ\text{C}$), cette valeur correspond à des fils en acier ordinaire.

N30C2 : câble d'alimentation en 2 fils de cuivre revêtus de polyester, ayant une longueur de 30 cm et qui supporte une température variante entre -196°C et 150°C .

Ces jauges sont également collées à mi-hauteur sur la circonférence interne de chacun des anneaux actif et passif (Figures 108(a) et 108(b)). Notons que, dans un montage en demi-pont, l'anneau actif portant les jauges actives (J1, J2, J3 et J4) sert à mesurer les sollicitations mécaniques, alors que l'anneau passif portant les jauges passives (J5, J6, J7 et J8) a pour rôle de compenser l'effet thermique. Ainsi, la déformation mesurée représente la différence entre la déformation subie par la jauge active J_a et celle subie par la jauge passive J_b correspondante (voir principe de montage en demi-pont dans Figure 103(c)). Pour plus de détails, un exemple du cas de la jauge active J1 et la jauge passive J5 dans un montage en demi-pont est présenté dans la Figure 108(c). Seul l'anneau actif sera expérimenté, tandis que l'anneau passif sera mis de côté dans la même atmosphère ambiante que l'anneau actif. La colle de fixation utilisée dans le collage des jauges est de type M-610, les cosses de relais sont de type CPF-75C et les soudures de type 361A-20. Ces jauges sont protégées par un silicone de type M-COAT A et un autre de type RTV-3145 CLEAR.

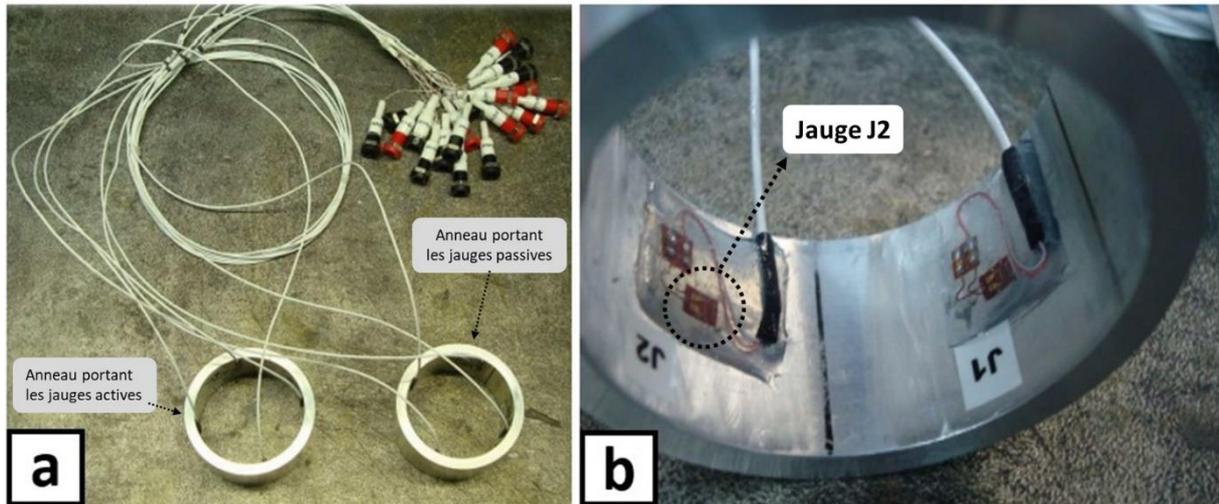


Figure 108: (a) Vue globale des anneaux portant les jauges actives et passives ;
(b) Méthode d'application des jauges d'extensométrie sur la circonférence interne de l'anneau métallique.

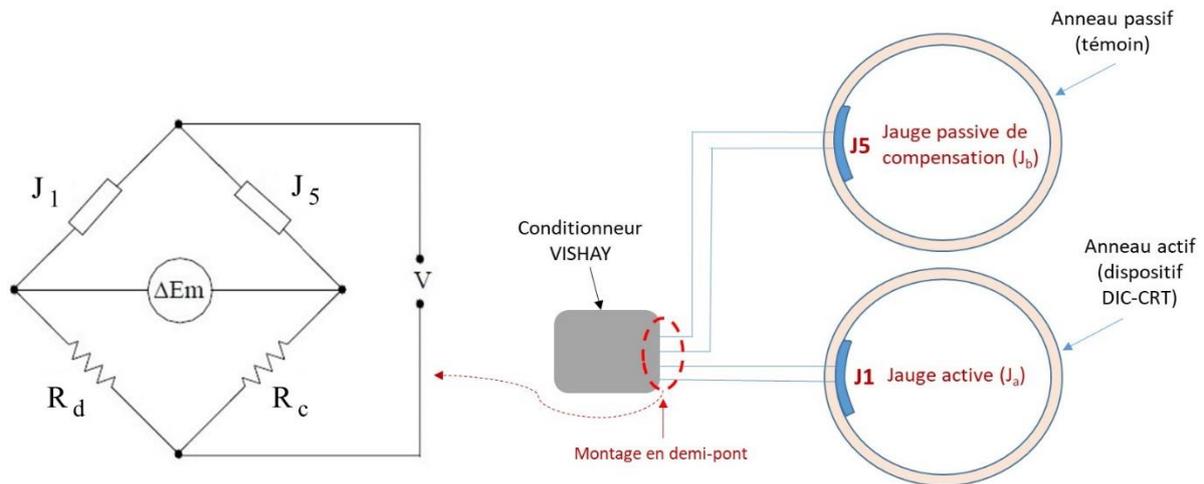


Figure 108(c): Schéma descriptif du montage en demi-pont des jauges active et passive.
Exemple du cas de la jauge active J1 et la jauge passive J5.

V.1.5. Calibration des jauges KFGS

De la même manière que les jauges KFW, des essais de calibration sont effectués avec les jauges KFGS afin de vérifier la fiabilité de leurs mesures et de valider la précision des déformations mesurées par ces jauges à court terme et à long terme.

V.1.5.1. Dérive des jauges KFGS

Un essai à vide est réalisé afin de vérifier la dérive de jauges KFGS. La Figure 109 montre l'évolution de la déformation des jauges au cours du temps. On observe une dérive maximale de $6 \mu\text{m/m}$ sur une période de 12 jours. De même, une mise sous tension préalable du conditionneur 24 heures avant le début des essais expérimentaux permet de réduire la dérive

mesurée au cours au temps à $3 \mu\text{m}/\text{m}$. Cette valeur considérée comme acceptable par rapport aux déformations qu'on vise à avoir dans nos essais (de l'ordre de $20 \mu\text{m}/\text{m}$), sera prise en compte dans les déformations mesurées par les jauges KFGS.

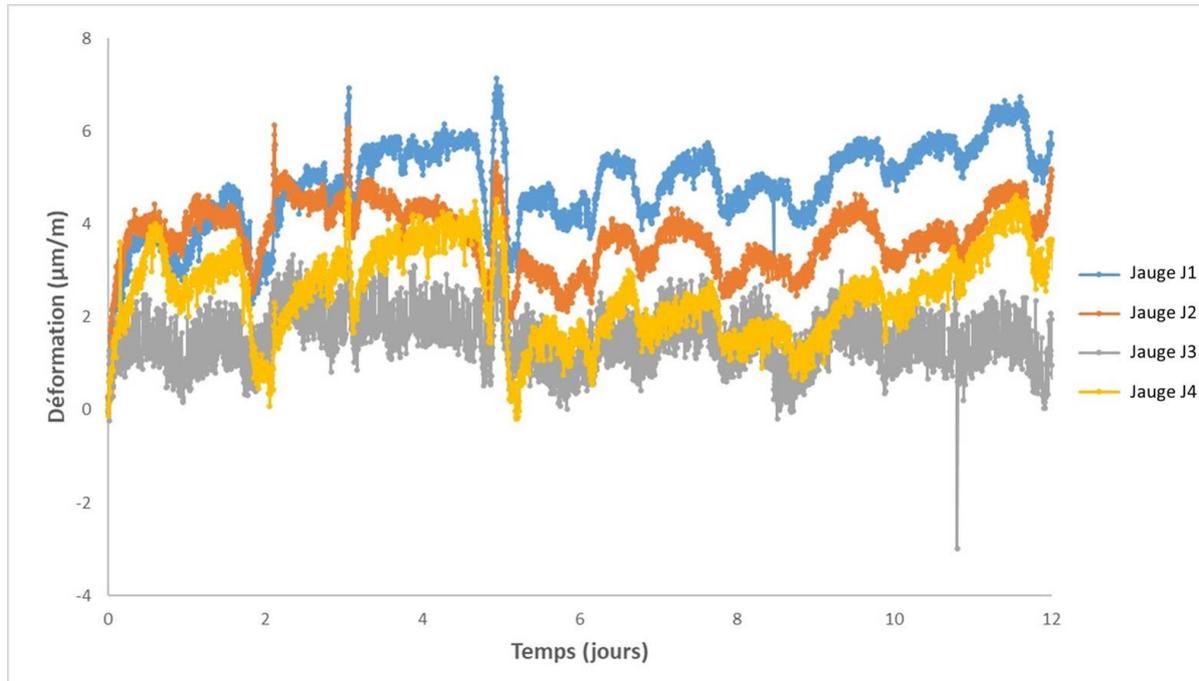


Figure 109: Déformations mesurées par les jauges d'extensométrie KFGS pour un essai à vide.

V.1.5.2. Etalonnage à l'aide d'une contrainte isotrope

Afin d'éviter de prendre le risque d'un court-circuit en introduisant ces jauges dans une cellule triaxiale remplie d'eau, nous avons procédé à réaliser l'étalonnage de ces jauges à l'aide d'un système réalisé au laboratoire avec une chambre à air pour l'application d'une contrainte radiale isotrope. Cette chambre est placée dans un cylindre rigide en PVC (Figure 110), et l'application de la pression radiale est réalisée à l'aide du contrôleur de pression (STDDPC).

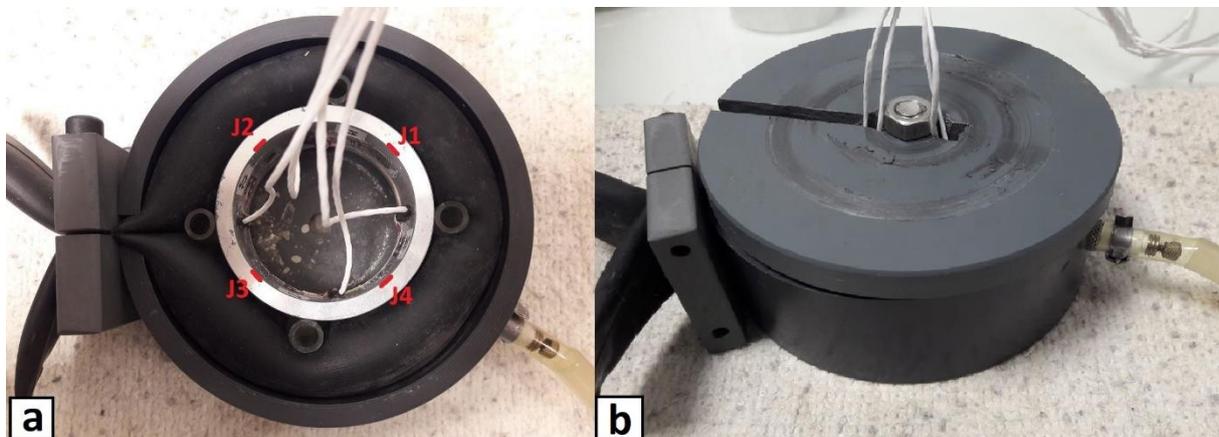


Figure 110: (a) Vue du dessus de la chambre à air enfermée dans une boîte cylindrique en PVC ;
(b) Mise en place du couvercle de la boîte en PVC.

Des incréments de pression de 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa et 200 kPa sont appliqués en mesurant simultanément la déformation des jauges d'extensométrie. La Figure 111 présente l'évolution de la déformation des jauges en fonction des pressions appliquées. Nous avons constaté que seules les jauges J3 et J4 montrent une réponse logique, en suivant les incréments appliqués, tout en présentant un écart important entre les déformations théorique et expérimentale. Cet écart, ajouté aux réponses erronées des jauges J1 et J2 peuvent être dus au mauvais contact de la membrane de la chambre à air avec l'anneau métallique. En effet, lors du gonflement de la membrane, des plis singuliers se forment au niveau du contact avec l'anneau rendant la pression localement non isotrope. Nous avons tenté de résoudre ce défaut en y insérant de petits cylindres en polypropylène pour assurer la continuité de la pression au niveau de ces plis, mais sans succès (Figure 110(a)). Par conséquent, nous avons considéré que ce dispositif d'étalonnage n'est pas concluant.

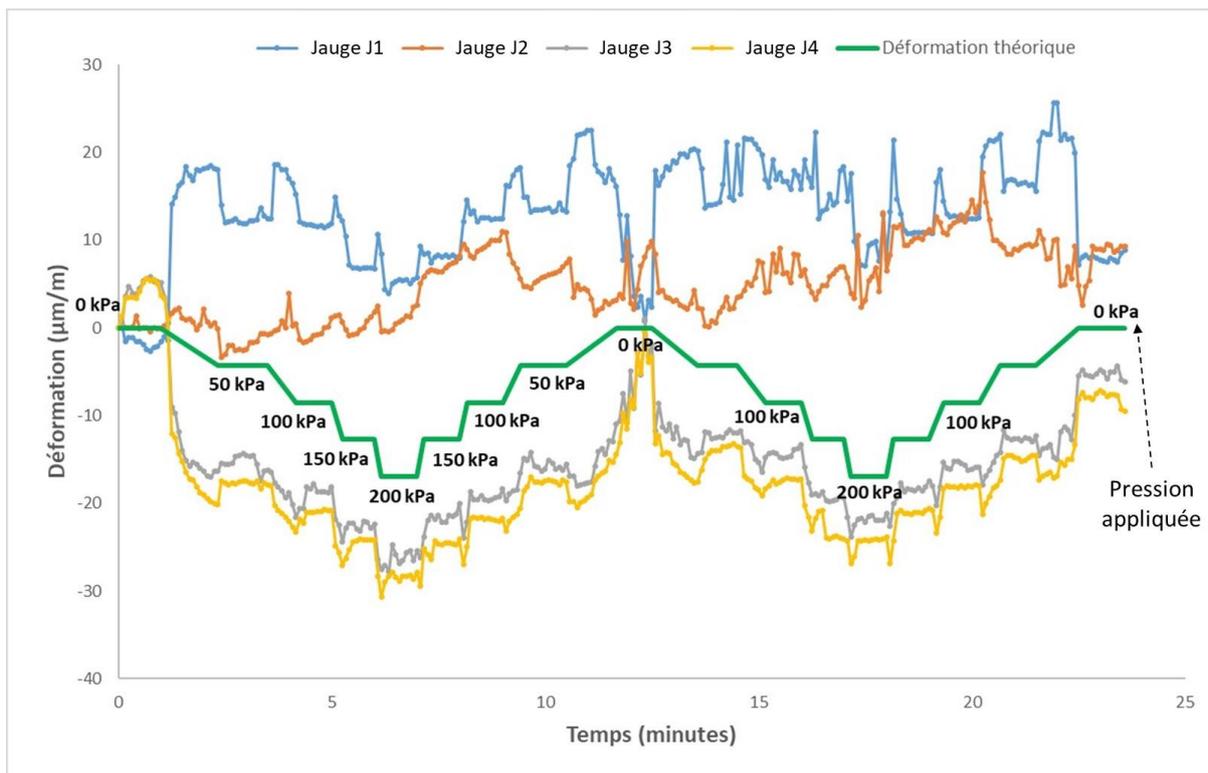


Figure 111: Déformations mesurées par les jauges KFGS suite à des incréments de 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa et 200 kPa.

V.1.5.3. Etalonnage à l'aide d'un essai de compression diamétrale

Après avoir constaté que le dispositif isotrope n'est pas adapté pour étalonner les jauges d'extensométrie fixées sur l'anneau métallique, nous avons décidé de réaliser cet étalonnage à l'aide d'un essai de compression diamétrale appliqué à l'anneau métallique. Cet essai consiste à appliquer deux forces suivant les deux génératrices opposées de l'anneau. Une modélisation par éléments finis a permis de simuler les déformations circonférentielles élastiques dans l'anneau métallique résultant de ce chargement diamétral.

Pour une simulation d'une force ponctuelle de 10 N appliquée suivant les génératrices de l'anneau, nous avons obtenu une contrainte circonférentielle de 730 kPa aux points A et B situés sur l'intersection de la circonférence interne de l'anneau avec son axe vertical (Figure 112(a)), et une contrainte de 472 kPa aux points C et D situés sur l'intersection de la circonférence interne de l'anneau avec son axe horizontal (Figure 112(b)). De même, pour une force de 20 N, nous avons obtenu une contrainte de 1450 kPa et de 920 kPa sur l'intersection de la circonférence intérieure de l'anneau respectivement avec ses axes vertical et horizontal.

Les déformations circonférentielles élastiques sont calculées à partir des contraintes circonférentielles en utilisant la loi de Hooke généralisée :

$$\sigma = \frac{E}{1 + \nu} \left(\varepsilon + \frac{\nu}{1 - 2\nu} \text{Tr}(\varepsilon) \cdot I \right) \quad (27)$$

Avec :

- σ : contrainte appliquée (en kPa)
- ε : déformation résultante (en m/m)
- E : module de Young de l'aluminium 2017a = $72 \cdot 10^6$ kPa
- ν : coefficient de poisson de l'aluminium 2017a = 0.33
- I : matrice identité

En négligeant les contraintes radiales dans l'anneau, on obtient :

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\sigma_{\theta}}{E} (1 - \nu^2) \quad (28)$$

En appliquant cette formule sur les contraintes circonférentielles, on obtient pour un chargement de 10 N, une déformation circonférentielle de 8.97 $\mu\text{m/m}$ sur l'intersection de la circonférence intérieure de l'anneau avec son axe vertical, et une déformation de 5.8 $\mu\text{m/m}$ sur son intersection avec l'axe horizontal. De même, pour un chargement de 20 N, on obtient une déformation de 17.8 $\mu\text{m/m}$ et de 11.3 $\mu\text{m/m}$ sur l'intersection de la circonférence intérieure de l'anneau respectivement avec ses axes vertical et horizontal.

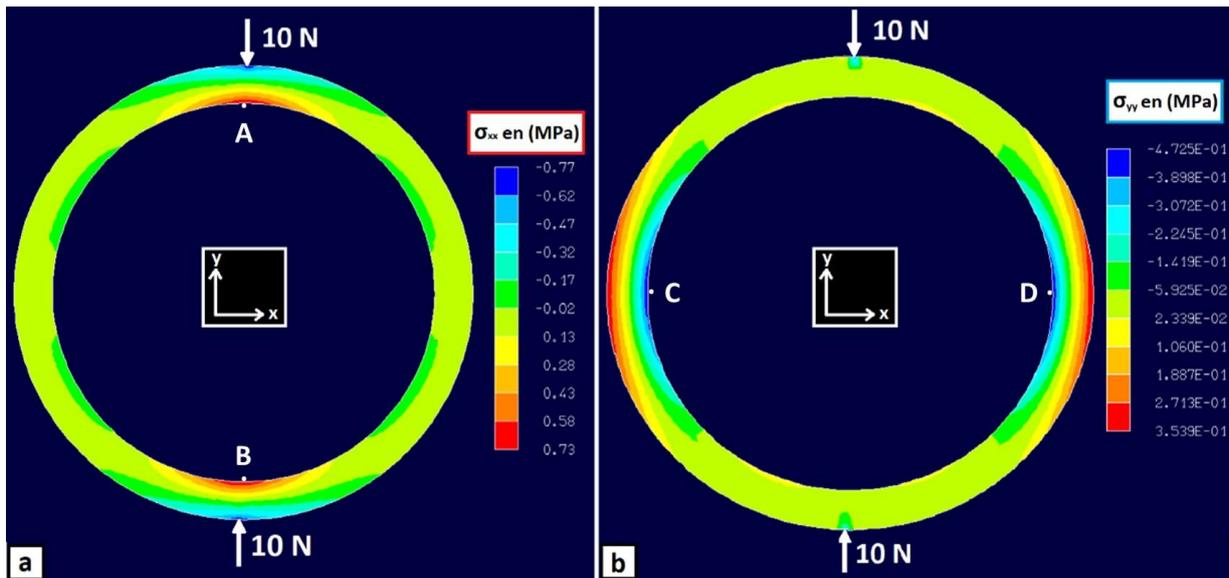


Figure 112: Répartition des contraintes théoriques (a) σ_{xx} et (b) σ_{yy} dans l'anneau métallique pour un chargement de 10 N.

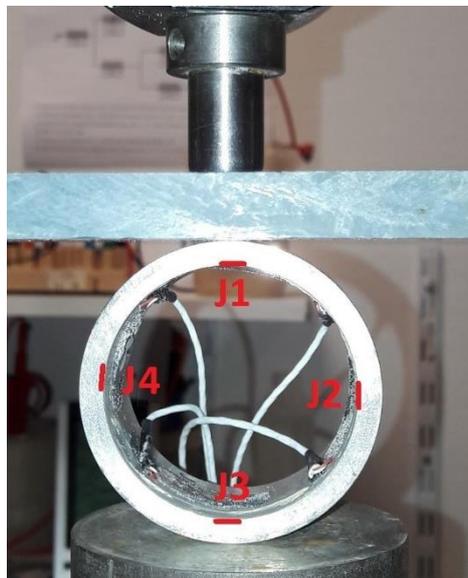


Figure 112: (c) Position de l'anneau lors du premier test d'étalonnage

Deux tests d'étalonnage sont réalisés dans ce contexte. Dans le premier test, les jauges J1 et J3 sont placées suivant les génératrices de l'anneau (Figure 112(c)), alors que dans le deuxième test, ce sont les jauges J2 et J4 qui sont placées suivant les génératrices.

La Figure 113(a) montre les déformations des jauges mesurées lors du premier test d'étalonnage dans lequel trois cycles de chargement par paliers respectivement de 10 N et 20 N sont appliqués. On remarque que les courbes théoriques et expérimentales se superposent avec des écarts dans certains cas ne dépassant pas 3 $\mu\text{m}/\text{m}$.

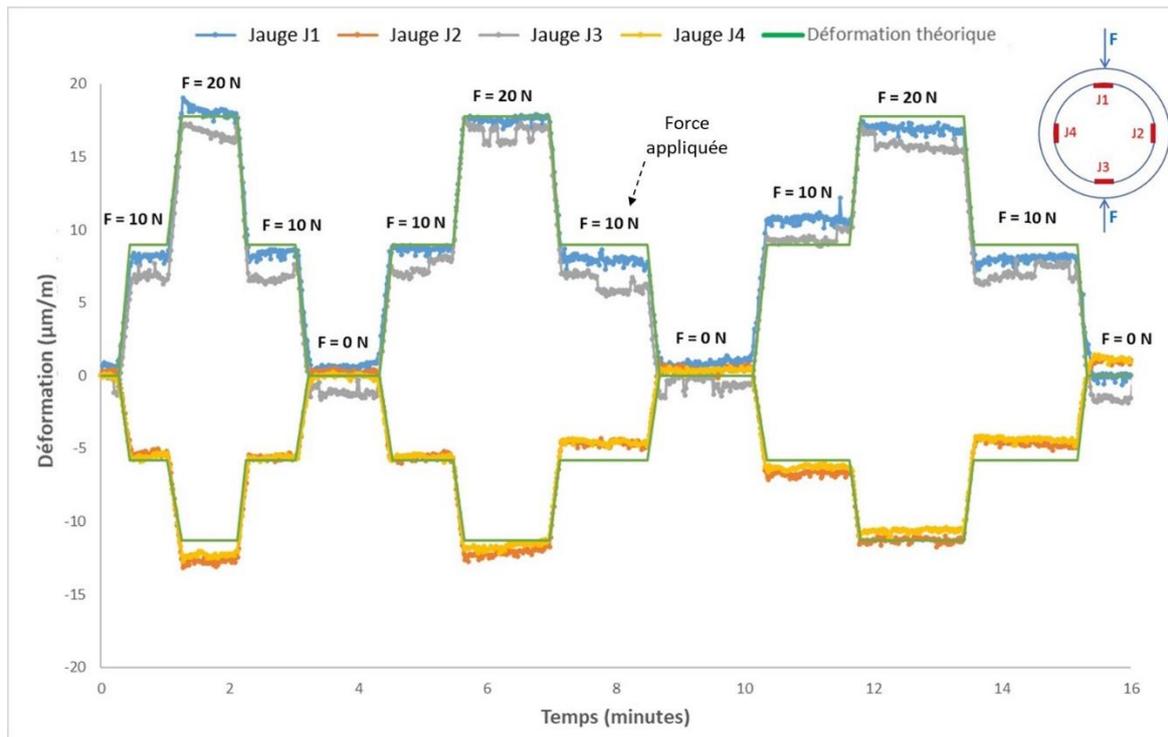


Figure 113: (a) Déformations des jauges d'extensométrie lors du premier test d'étalonnage dans lequel les jauges J1 et J3 sont placées suivant les génératrices de l'anneau.

Les mêmes résultats peuvent être observés pour le deuxième test (Figure 113(b)). Les petits écarts observés sont dus d'une part à des phénomènes de relaxation observés à chaque palier de chargement, et d'autre part aux petites incertitudes liées à la localisation des points de collage des jauges. On peut constater néanmoins, un bon accord entre les déformations théoriques et expérimentales avec des écarts ne dépassant pas 3 $\mu\text{m}/\text{m}$.

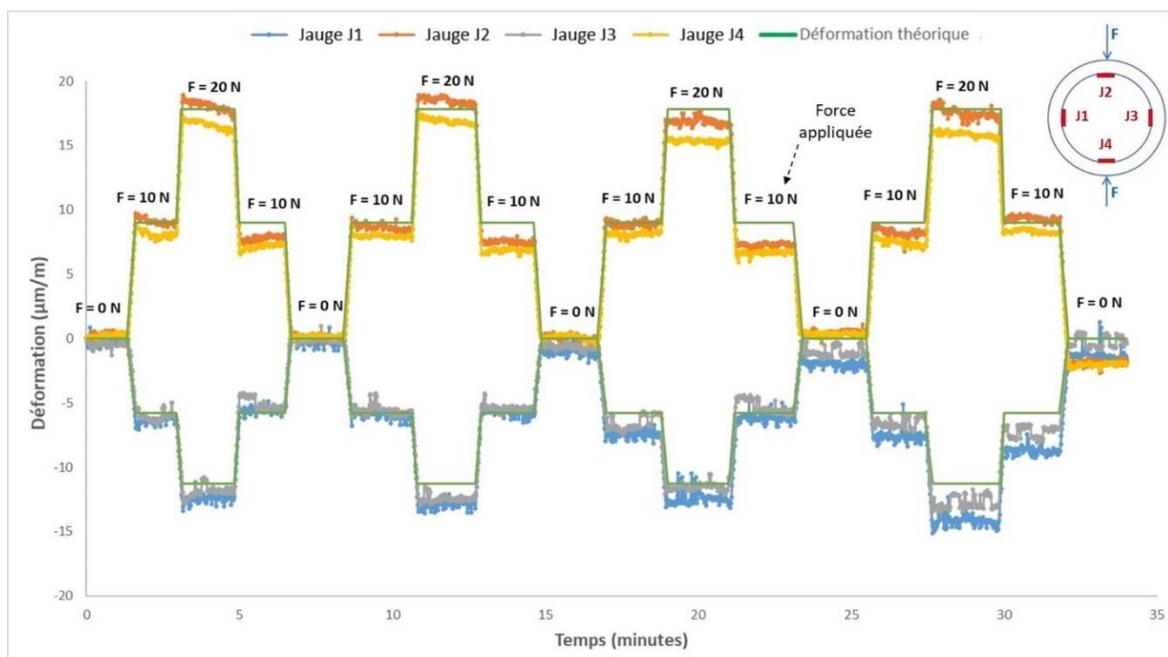


Figure 113: (b) Déformations des jauges d'extensométrie lors du deuxième test d'étalonnage dans lequel les jauges J2 et J4 sont placées suivant les génératrices de l'anneau.

V.2. Mesure de la succion par tensiométrie

V.2.1. Développement d'un tensiomètre adapté au dispositif DIC-CRT

La succion, qui est la pression négative de l'eau interstitielle, développée dans le sol est mesurée à l'aide de tensiomètres. Le tensiomètre développé est composée d'une céramique de 12 mm de diamètre et de 3 mm d'épaisseur reliée à un réservoir d'eau désaéré ayant un volume relativement faible, de l'ordre de 0.6 cm^3 (Figure 114(a)). Ce tensiomètre sera inséré dans la base du dispositif DIC-CRT en contact avec l'échantillon d'argile (Figure 114(b)). La pression négative de l'eau est mesurée à l'aide d'un capteur de pression absolue placé à la base du réservoir d'eau. Ce capteur consiste en un transmetteur de pression de type A-10 qui mesure une pression absolue variant entre 0 et 1600 kPa, au moyen d'un signal de sortie 0 à 10 VDC, avec une précision de 2 %.

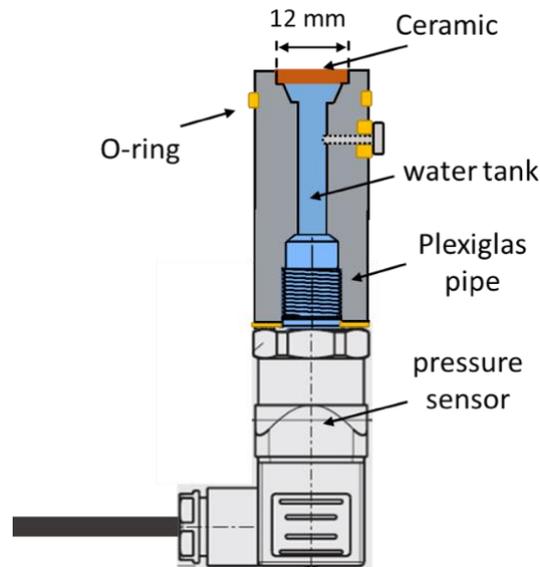


Figure 114(a): Schéma descriptif du tensiomètre développé.

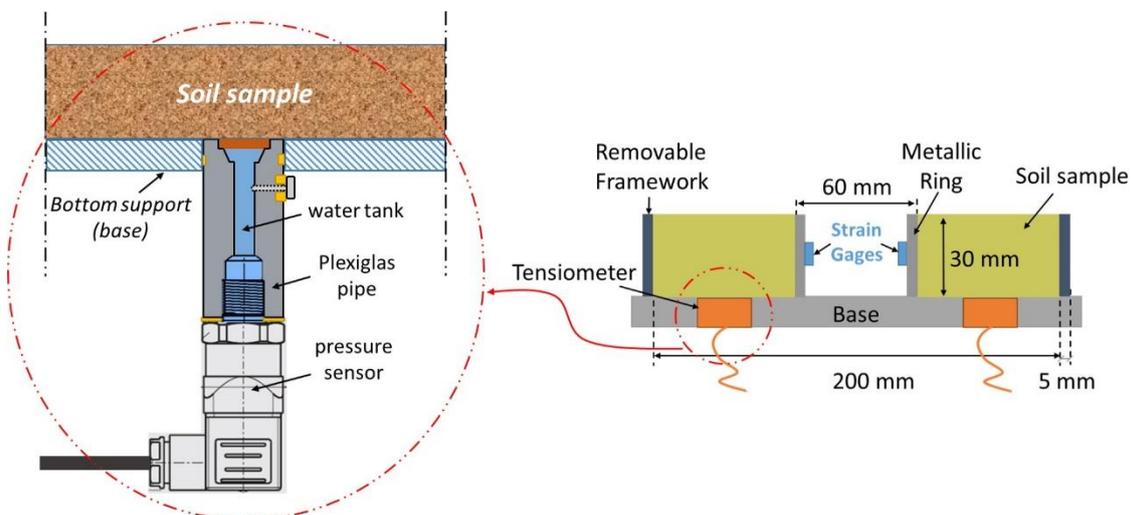


Figure 114(b): Méthode d'insertion du tensiomètre développé dans le dispositif DIC-CRT.

V.2.2. Calibration du tensiomètre

V.2.2.1. Test d'étalonnage

V.2.2.1.1. Pression positive

Afin de vérifier la fiabilité des pressions mesurées à l'aide du tensiomètre développé via la céramique saturée, nous avons appliqué de faibles pressions positives par l'intermédiaire d'une colonne d'eau. Pour ce faire, un tube gradué est branché en position verticale à la céramique. La Figure 115(a) présente l'évolution de la pression absolue mesurée par le tensiomètre en fonction de la pression de colonne d'eau appliquée. Au début de l'essai, le tensiomètre a indiqué une pression absolue de 102 kPa correspondant à la pression atmosphérique. Par la suite, la pression mesurée évolue suivant la pression imposée, avec des écarts ne dépassant pas le 10 % de la pression imposée. On peut constater un bon accord entre les pressions positives appliquées et celles mesurées par le tensiomètre.

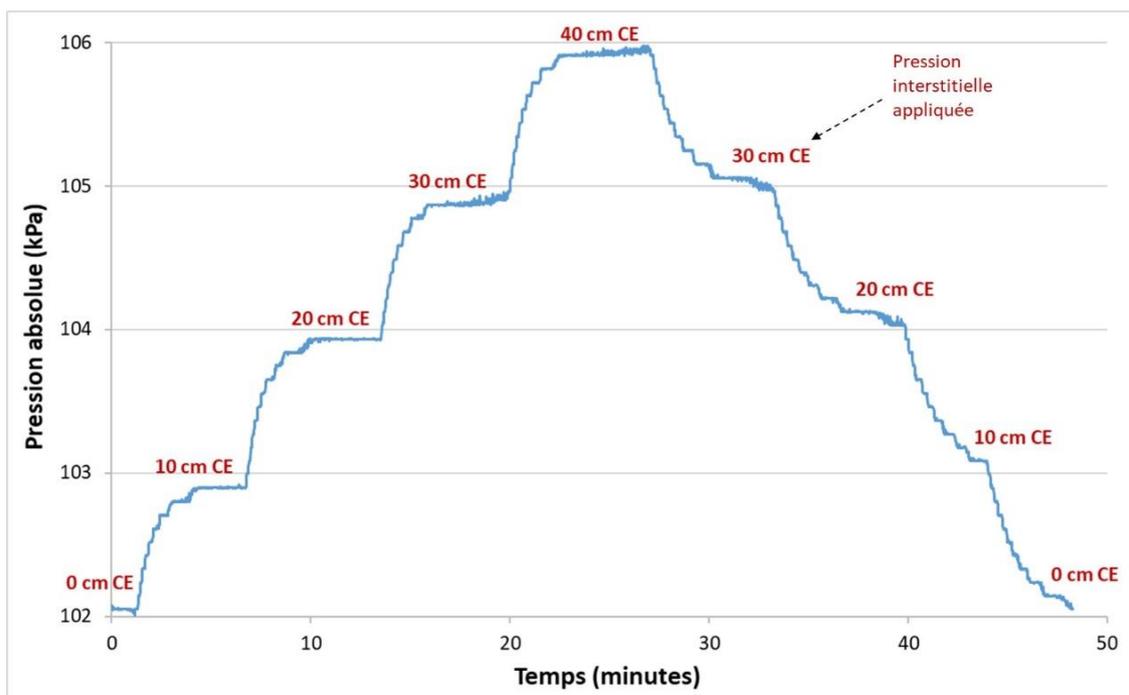


Figure 115: (a) Etalonnage du tensiomètre à l'aide d'une pression interstitielle positive.

V.2.2.1.2. Pression négative

Après avoir validé l'étalonnage du tensiomètre en pression positive, nous avons procédé à l'étalonnage à l'aide d'une pression interstitielle négative appliquée également au niveau de la céramique du tensiomètre. Pour ce faire, une masse de 100 g d'une argile de type kaolinite, initialement préparée à une teneur en eau de 60 % ($w = 1.5w_L$), est mise en contact avec la céramique du tensiomètre. Cette pâte d'argile était exposée à l'air ambiant pour sécher.

L'ensemble est placé sur une balance de précision 0.01 g permettant des acquisitions de la perte d'eau en continue. En se basant sur la courbe de rétention (SWRC) de cette argile (Figure 16), la succion correspondante est estimée en fonction de la teneur en eau. La Figure 115(b) présente l'évolution de la succion mesurée par le tensiomètre en fonction de la succion déduite de la courbe de rétention (SWRC). On trouve un bon accord général entre la pression interstitielle négative appliquée et celle mesurée par le tensiomètre dans le domaine 0-90 kPa de succion.

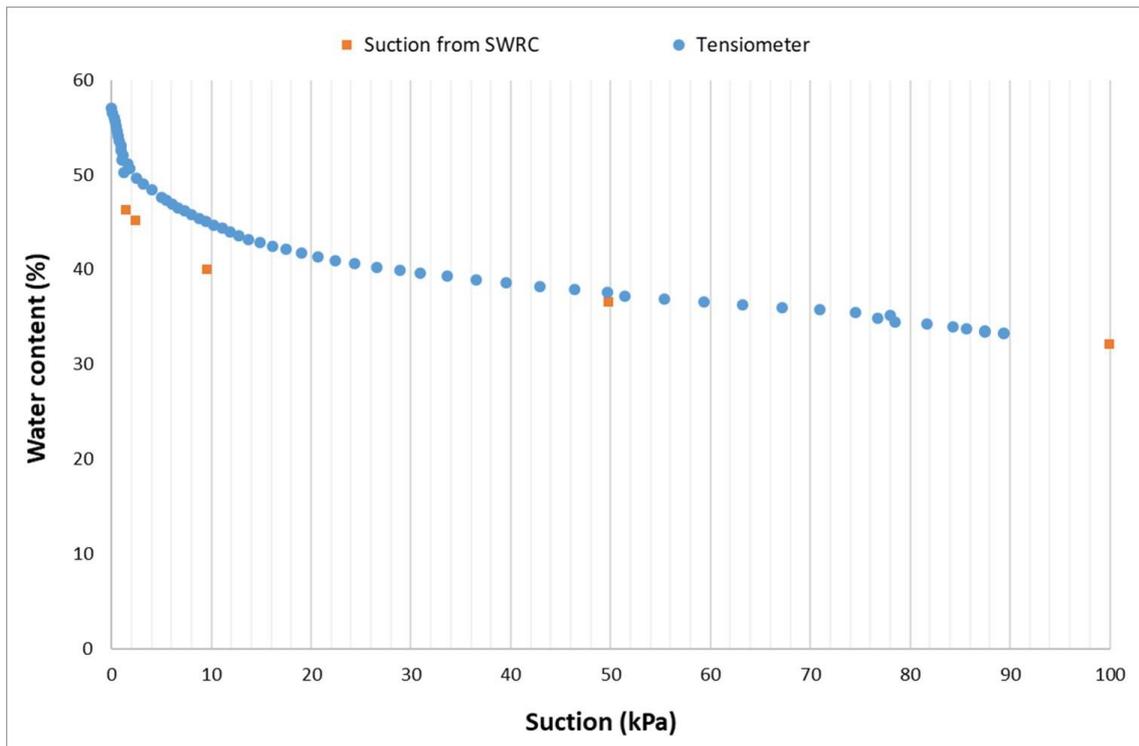


Figure 115: (b) Etalonnage du tensiomètre à l'aide d'une pression interstitielle négative déduite de la SWRC.

V.2.2.1.3. Stabilité du tensiomètre

Dans le but de vérifier la stabilité de la lecture donnée par le tensiomètre au cours du temps, nous avons réalisé un test d'étalonnage avec une pression positive constante. Pour ce faire, et afin de vérifier la qualité du contact argile-céramique, une masse de 100 g d'une argile de type kaolinite, initialement préparée à une teneur en eau de 60 %, est mise en contact avec la céramique du tensiomètre. Cette pâte d'argile était placée dans un récipient clos, pour éviter toute évaporation entraînant un séchage de l'argile au cours du temps. La Figure 115(c) présente l'évolution de la pression absolue mesurée par le tensiomètre au cours du temps. On remarque que cette pression s'est maintenue pendant 10 heures de mesures avec une légère diminution de l'ordre de 0.4 kPa. La stabilité observée indique que la dérive du capteur de pression est très faible.

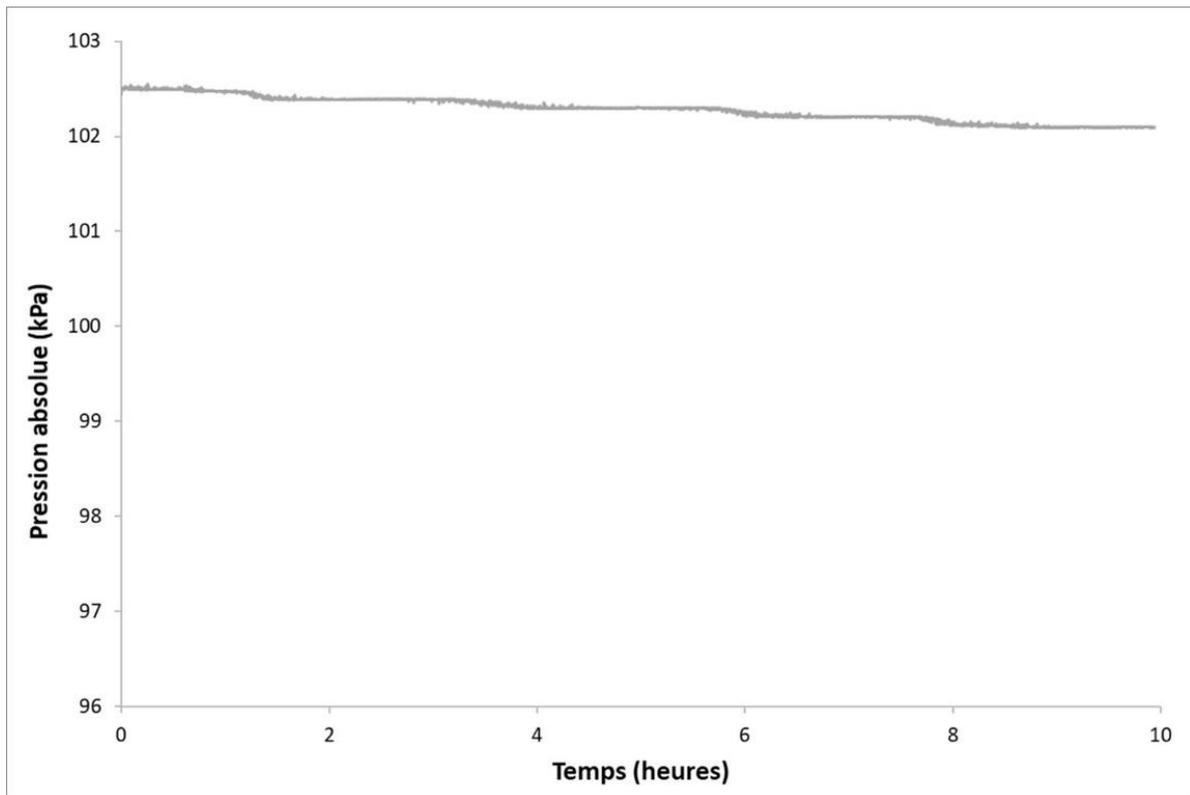


Figure 115: (c) Pression absolue mesurée par le tensiomètre suite à une pression interstitielle constante imposée.

V.2.2.2. Evaluation du temps de réponse

Afin d'évaluer le temps de réponse du tensiomètre, des mesures de succion sont effectuées sur un échantillon d'argile non saturée. Les résultats de ces essais sont présentés dans la Figure 116. Ces mesures de succion sont comparées avec celle données par un tensiomètre du commerce (courbe en couleur marron), pris comme référence. Au début de chaque essai (avant le point A), le capteur tensiométrique est exposé à la pression atmosphérique. Ainsi, une pression absolue de 102 kPa est mesurée. Ensuite, au point A, le tensiomètre est mis en contact avec l'échantillon d'argile. De ce fait, la pression mesurée commence à décroître jusqu'à atteindre une valeur seuil qui correspond à la limite de la mesure du tensiomètre.

Le premier essai d'évaluation du temps de réponse du tensiomètre développé (courbe en couleur verte) montre une pression absolue de 30 kPa, atteinte au bout de 0.6 heure, soit une succion de 72 kPa. Par la suite, la pression remonte à 102 kPa du fait de la cavitation de l'eau du réservoir d'eau. Pour améliorer ce temps de réponse relativement lent, nous avons procédé à réduire le volume du réservoir d'eau, ce qui limite la possibilité d'avoir des bulles d'air dans l'eau du réservoir. Néanmoins, cette modification n'a pas amélioré le temps de réponse du tensiomètre (courbe en couleur jaune), sauf qu'elle a retardé la cavitation de l'eau qui s'est produite au bout de 1.3 heure. Ainsi, nous avons tenté d'améliorer le temps de réponse du tensiomètre en

améliorant l'étanchéité du réservoir d'eau au niveau du taraudage entre le capteur et le réservoir d'eau en plexiglas. Cette modification a significativement amélioré la limite de la succion mesurée, ainsi que le temps de réponse du tensiomètre, qui a montré une pression absolue d'environ 10 kPa, atteinte au bout de 0.2 heure (courbe en couleur bleue), soit une succion de 92 kPa. Cette pression correspond à une succion mesurée de 90 kPa. Cependant, cet essai a cavité au bout de 1.5 heure. Pour réduire encore le temps de réponse d'une part et augmenter la durée de cavitation d'autre part, nous avons cherché à lubrifier les parois internes du réservoir afin d'éviter la stagnation des bulles d'air dans le réservoir par frottement contre la paroi. Pour cela, nous avons injecté quelques gouttelettes d'un liquide de rinçage (commercial) dans le réservoir d'eau. Cette solution a permis d'avoir un temps de réponse de 0.15 heure (9 minutes), ainsi qu'une durée de cavitation de 2.5 heures (courbe en couleur grise). Par conséquent, la succion mesurée de l'ordre de 90 kPa représente la succion maximale pouvant être mesurée par ce capteur tensiométrique.

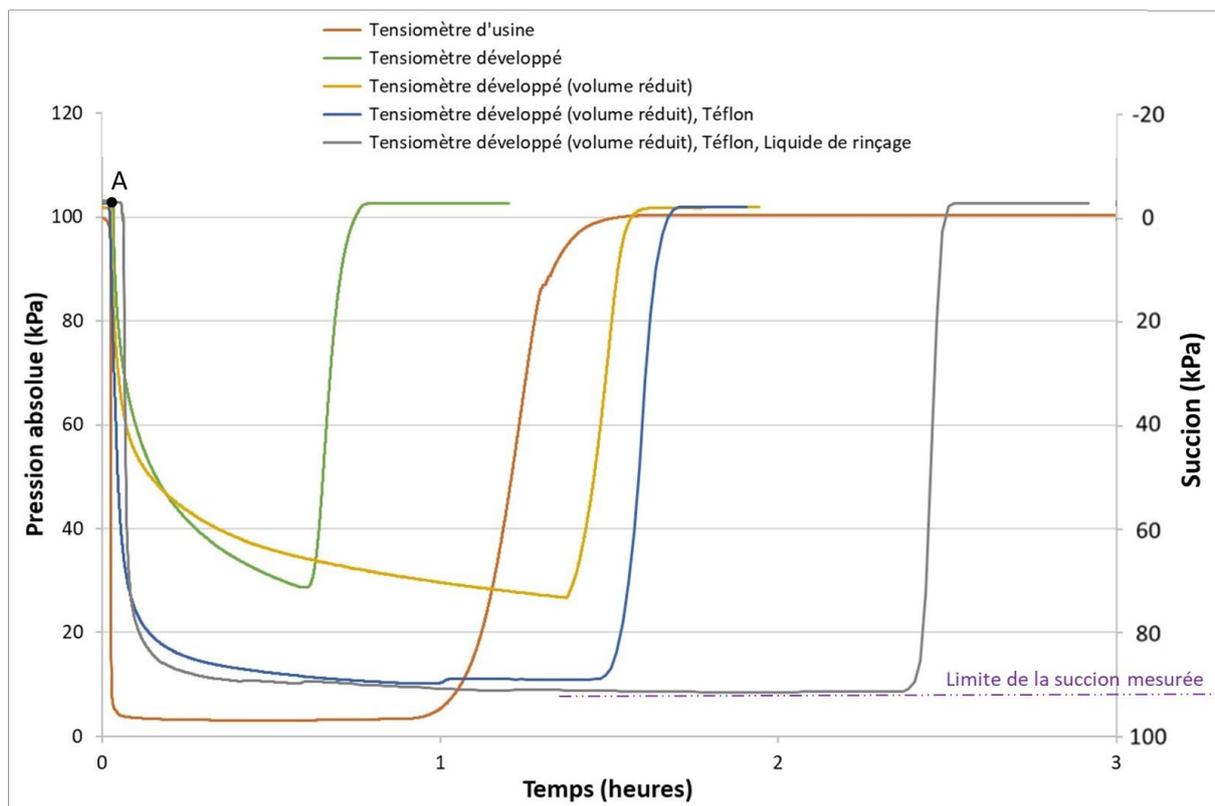


Figure 116: Mesures du tensiomètre sur un échantillon d'argile sèche.

V.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un nouveau dispositif expérimental appelé (DIC-CRT), permettant d'étudier les déformations de retrait et la fissuration par dessiccation dans les sols fins argileux. Ce dispositif combine trois techniques de mesure : la corrélation d'images numériques (2D/3D-DIC) pour le suivi du champ de déformation durant la dessiccation, l'essai à l'anneau pour le suivi des contraintes développée au sein de l'argile durant la dessiccation, et la mesure de la succion à l'aide de tensiomètres durant la dessiccation.

La technique de l'essai à l'anneau est assurée à l'aide des jauges d'extensométrie installées au niveau de la circonférence interne de l'anneau métallique. L'aluminium est le métal qui paraît le mieux adapté pour cet anneau au cas des argiles. Des jauges d'extensométrie de modèle KFGS sont indispensables pour réaliser des mesures de déformation suffisamment précises sur des longues périodes. Un montage des jauges en demi-pont de Wheatstone est essentiel afin de permettre la compensation de l'effet thermique des jauges. La méthode retenue pour étalonner les jauges du dispositif DIC-CRT est l'essai de compression diamétrale appliquée à un cylindre creux.

Le tensiomètre développé a nécessité beaucoup de tâtonnement pour améliorer la gamme de mesure et le temps de réponse. Malgré la surface réduite de la céramique en contact avec l'échantillon d'argile, nous sommes parvenus à avoir une plage de mesure 0-90 kPa de succion et un temps de réponse d'une dizaine de minutes.

Chapitre VI : Etude du retrait empêché à l'aide du dispositif DIC-CRT

Après avoir présenté dans le Chapitre 5 le dispositif expérimental développé DIC-CRT, son instrumentation, ses équipements et sa calibration, nous étudions dans ce chapitre le comportement en dessiccation de la kaolinite P300 à l'aide de ce dispositif. L'approche proposée consiste à suivre simultanément les champs de déformation, les contraintes mécaniques et la succion dans le matériau, tout au long du chemin de dessiccation, depuis l'état initial sous forme de pâte saturée, en passant par l'amorce et la propagation des fissures et jusqu'à la dessiccation complète avec atteinte de la limite de retrait et la teneur en eau résiduelle.

Après avoir appliqué cette démarche à la kaolinite et quantifié les paramètres pertinents relatifs à la fissuration, nous avons cherché à minimiser ces phénomènes de retrait et de fissuration à l'aide de renforts en fibres végétales orientés, dans le but de tenter de comprendre les mécanismes de leurs actions.

VI.1. Essai de retrait empêché sur la kaolinite

Un premier essai de dessiccation est réalisé avec le dispositif DIC-CRT sur la kaolinite P300. L'échantillon est préparé initialement à une teneur en eau initiale $w_i = 1.5w_L$, afin d'obtenir une pâte saturée. La base de cet échantillon, intitulé Ech D1, est tapissée d'une feuille de Téflon d'épaisseur 1 mm, ayant un coefficient de frottement statique compris entre 0.08 et 0.10 selon la norme ASTM D1894 (voir caractéristiques du matériau dans le Chapitre 3). L'ensemble du dispositif expérimental est contrôlé en termes de température $T = 22 \text{ °C}$ et d'humidité relative $HR = 40 \%$. D'après la loi de Kelvin, ces conditions thermiques et hydriques correspondent à une succion imposée de 125 MPa. Cet essai prototype sera pris comme référence par rapport aux autres essais réalisés sur cette argile. Dans le but de vérifier la reproductibilité des essais menés avec le dispositif DIC-CRT, ce premier essai de dessiccation est dupliqué avec un autre échantillon, intitulé Ech D2. De même, une comparaison est menée entre les résultats de ces deux échantillons D1 et D2 réalisés avec le dispositif DIC-CRT, et les résultats de l'échantillon Ech C3, ayant les mêmes caractéristiques, réalisé avec le dispositif standard Ring-Test ASTM C1581 et présenté dans le Chapitre 4.

VI.1.1. Mise en œuvre

La Figure 117 présente les différentes étapes de mise en œuvre de l'échantillon D1. Un anneau amovible en PVC est utilisé lors de la mise en œuvre pour assurer le coffrage externe de l'argile. Trois tensiomètres (T1, T2 et T3), avec une gamme de mesure comprise entre 0 kPa et 90 kPa, sont installés dans la base du dispositif de manière à éviter toute perturbation de l'échantillon lors du retrait. Ces tensiomètres permettent d'avoir une mesure directe de la succion au cours de la dessiccation. Afin d'empêcher le matériau de s'écouler après le décoffrage en raison de sa teneur initiale en eau importante, la circonférence externe de l'échantillon est enveloppée avec un ruban en papier. Pour maintenir l'anneau métallique et le coffrage externe fixes pendant la mise en œuvre de l'argile, des ancrages métalliques sont utilisés comme le montrent la Figure 117(S1).

Une couche d'huile de silicone est pulvérisée sur la base Téflon afin de réduire au maximum possible les effets de frottement. Le coulage d'argile est réalisé en trois couches d'épaisseur 1 cm chacune, et vibrées à l'aide d'une spatule cuillère, afin de réduire les bulles d'air emprisonnées dans l'échantillon et d'homogénéiser au mieux sa porosité (étape S2).

Une fois le coulage de l'argile terminé, la surface extérieure de l'échantillon est nivelée à l'aide d'une spatule, pour éviter d'avoir des aspérités locales à la surface du matériau (Figure 117(S3)).

Par la suite, les ancrages métalliques et le coffrage sont retirés afin de permettre une déformation libre de l'échantillon et de l'anneau métallique. Un aspect moucheté, réalisé avec des particules fines de PVC de couleurs blanche et noire, est ensuite étalé sur la surface de l'échantillon. Ce mouchetis permet au logiciel de corrélation d'images numériques de détecter le déplacement des pixels sur la surface supérieure de l'échantillon (étape S4).

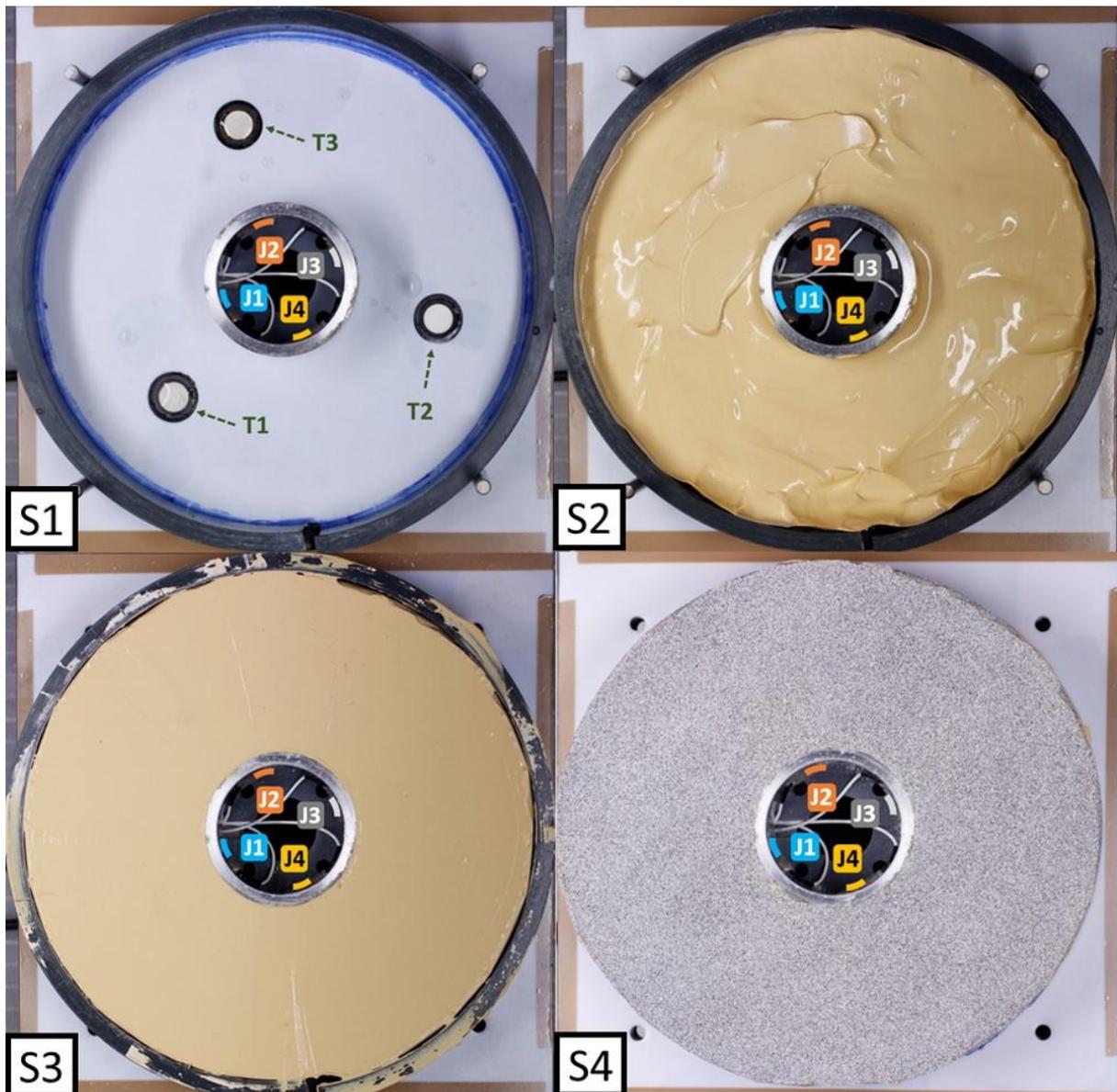


Figure 117: Etapes de mise en œuvre de l'échantillon D1.

VI.1.2. Évolution de la teneur en eau et de la succion durant la dessiccation

La Figure 118(a) montre l'évolution de la teneur en eau moyenne de l'échantillon D1 au cours de la dessiccation. Pendant la phase initiale de séchage, l'évaporation de l'eau est constante avec une cinétique de séchage d'environ -9 \%/jour . Au-delà d'une teneur en eau de 5 \% (point B), la cinétique de séchage décroît et la teneur en eau tend vers une teneur en eau résiduelle de l'ordre de 1 \% . La fin de l'expérience est atteinte lorsque la teneur en eau de l'échantillon devient stable tendant vers un palier horizontal, après 10 jours de séchage. La première fissure dans l'échantillon D1 est apparue le quatrième jour au voisinage de l'anneau métallique, pour une teneur en eau de 26 \% (point F). D'après les courbes de rétention de cette argile (Figure 118(f)), cette teneur en eau correspond à une succion de 1400 kPa .

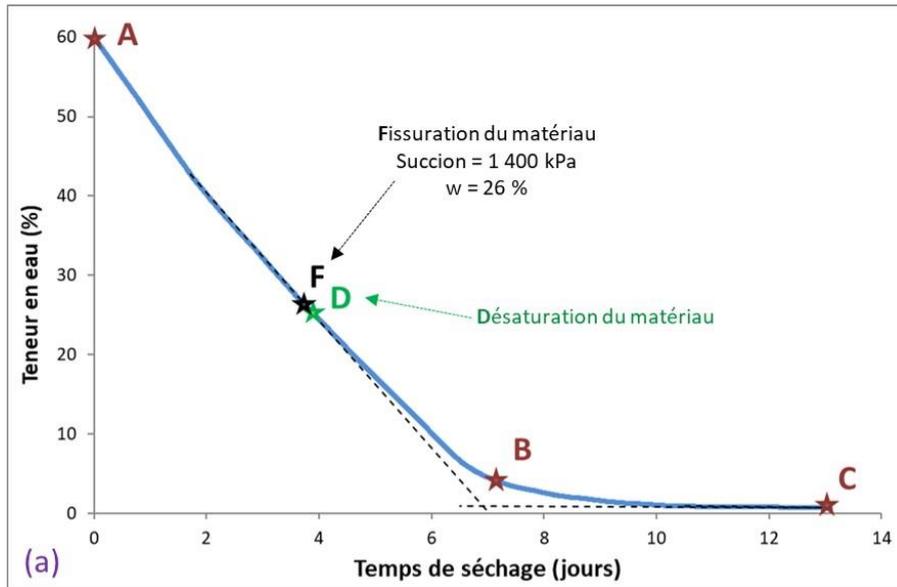


Figure 118: (a) Evolution de la teneur en eau de l'échantillon D1 au cours du séchage.

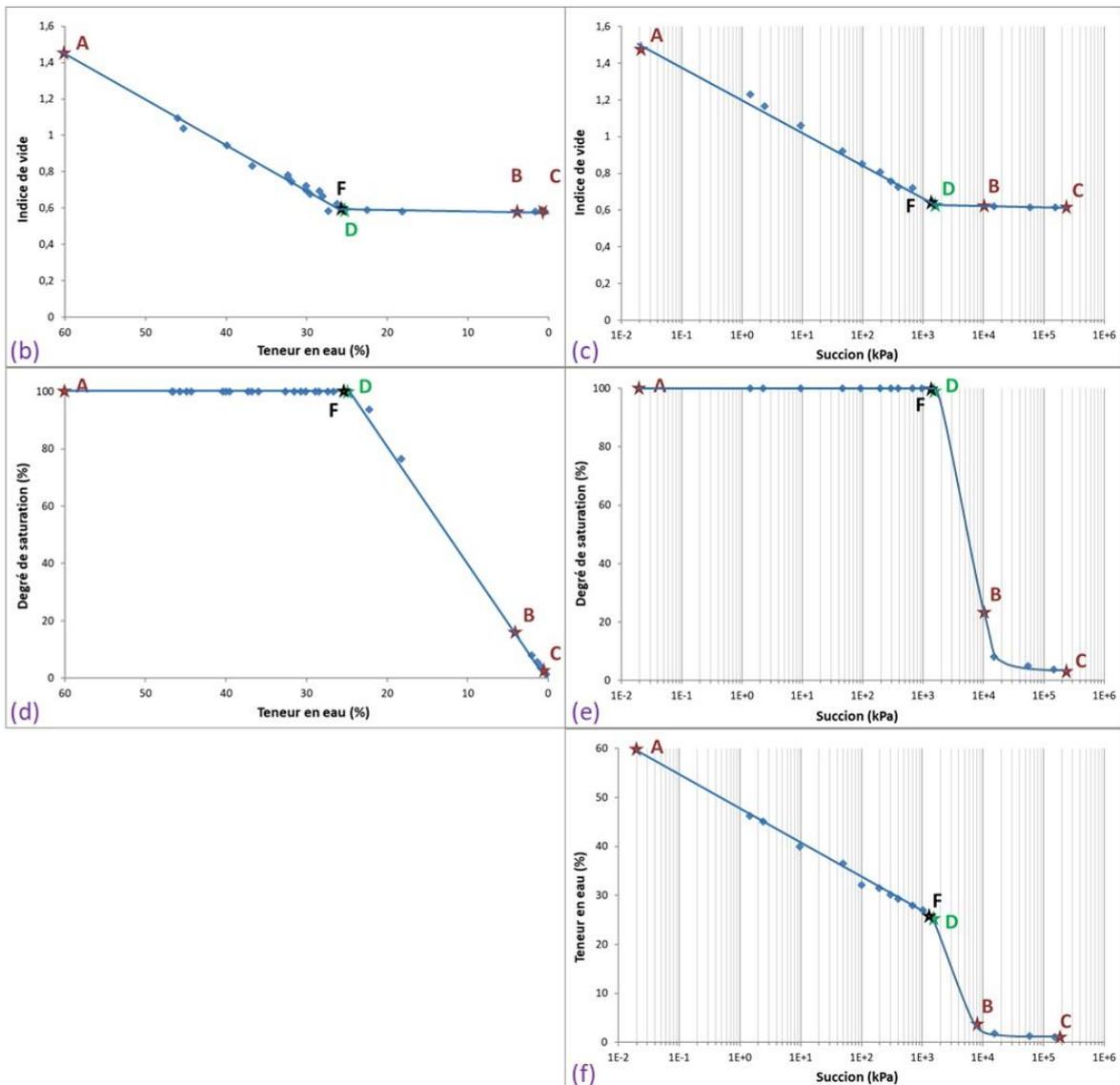


Figure 118: Situation des points particuliers dans l'échantillon D1 sur les courbes de rétention du matériau, d'après [Indarto, 1991].

Les Figures 118(b, c, d, e, f) montrent la position des points particuliers (points A, B, C, F et D) dans l'échantillon D1 sur les courbes de rétention de la kaolinite P300. Le point A, qui représente l'état initial du matériau lors de sa mise en œuvre, correspond à une très faible succion de l'ordre de 0.02 kPa, et à un indice des vides de l'ordre de 1.4. Ensuite, l'échantillon subit un retrait uniforme jusqu'au point D, correspondant au point d'entrée d'air du matériau. On remarque que la première fissure (point F) est apparue dans l'échantillon juste avant le point de désaturation (point D), qui coïncide avec la limite de retrait du matériau. Par la suite, la désaturation se poursuit et les fissures continuent à se propager dans l'échantillon. La teneur en eau de l'échantillon se stabilise pour une succion d'environ 150 MPa (point C).

La Figure 119 présente l'évolution de la succion mesurée à l'aide des tensiomètres (T1, T2 et T3) pendant le séchage, comparée à la succion déduite des courbes de rétention du matériau (SWRC) [Indarto, 1991]. Cette dernière succion est fonction de la teneur en eau qui, elle-même, est fonction du séchage. La gamme de mesure des courbes de rétention est comprise entre 0 et 150 MPa, tandis que la gamme de mesure des tensiomètres est comprise entre 0 et 90 kPa. Dans la gamme de mesure des tensiomètres, on peut constater un bon accord entre la succion mesurée par ces tensiomètres et celle déduite des courbes de rétention. De plus, les trois tensiomètres montrent des variations de succion très proches malgré leurs différentes positions sous l'échantillon (voir Figure 117(S1)).

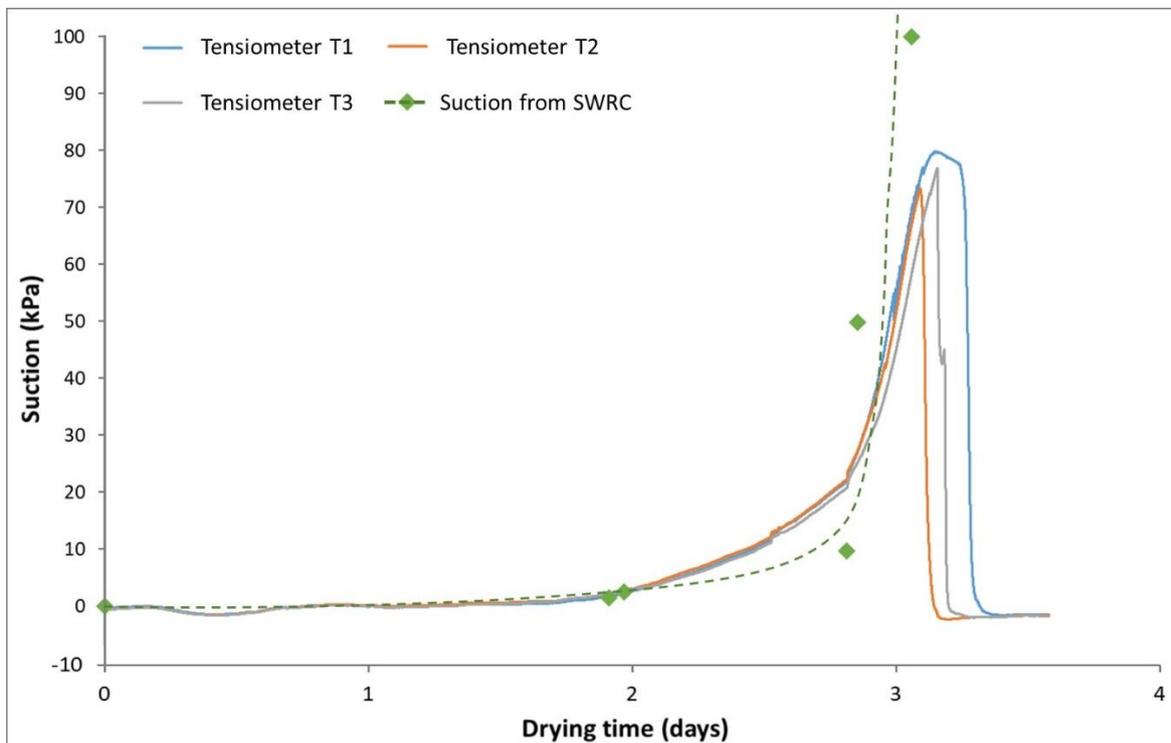


Figure 119: Évolution de la succion au cours du séchage : Mesures des tensiomètres et valeurs déduites des courbes de rétention (SWRC).

VI.1.3. Déformations mesurées par la technique CRT

La Figure 120(a) présente l'évolution de la déformation circonférentielle de l'anneau métallique dans l'échantillon D1, ainsi que la succion déduite des courbes de rétention du matériau (SWRC) [Indarto, 1991]. Notons que la déformation mesurée dans l'anneau métallique est désignée « G-strain », tandis que celle mesurée dans l'échantillon est désignée « S-strain ». On remarque que le processus de séchage comporte trois phases principales de déformation. Pendant la phase A (0 à 2 jours) qui présente des très faibles succions, l'argile ne subit pas de contraintes mécaniques significatives de manière qu'ils soient détectées par les jauges d'extensométrie. Dans la phase B, la succion commence augmenter rapidement dans le matériau. De même, l'anneau métallique subit des déformations circonférentielles importantes. Selon ces déformations, la phase B peut être décomposée en deux sous-phases B1 et B2. Durant la sous-phase B1, l'anneau métallique se déforme légèrement avec une vitesse de $-3 \mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$ jusqu'à un temps de séchage de 3 jours. Ensuite, les contraintes de succion augmentent rapidement dans le matériau pendant la sous-phase B2, et la vitesse de déformation dans l'anneau augmente à $-21 \mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$ jusqu'à la fissuration de l'échantillon au bout de 4 jours pour une déformation circonférentielle maximale d'environ $-20 \mu\text{m}/\text{m}$. Notons qu'une déformation négative signifie que la circonférence de l'anneau est en train de se contracter. Cette contraction est provoquée par une pression radiale exercée par l'échantillon sur la surface externe de l'anneau métallique. La fissuration de l'échantillon est matérialisée par un saut brutal de la déformation mesurée. La déformation de la jauge J2, située au voisinage de la fissure majeure, montre le saut maximal lors de la rupture, tandis que la jauge J3, située un peu à l'écart des deux fissures, subit un saut très faible après la rupture du matériau. Dans la phase C (au-delà de 4 jours), les jauges ne montrent pas de déformations importantes dans l'anneau métallique. Ceci peut être attribué au fait que la fissuration de l'échantillon relâche la compression de l'anneau.

En revanche, on constate un bon accord entre l'évolution de la succion dans le matériau et l'évolution de la déformation circonférentielle dans l'anneau métallique pendant la phase A et les deux sous-phases B1 et B2, jusqu'à la fissuration de l'échantillon à 4 jours de temps de séchage pour une succion d'environ 1400 kPa. Cette corrélation entre la succion dans l'argile et la déformation circonférentielle de l'anneau métallique met en évidence l'influence directe de la succion sur les déformations de retrait dans l'argile lors de la dessiccation.

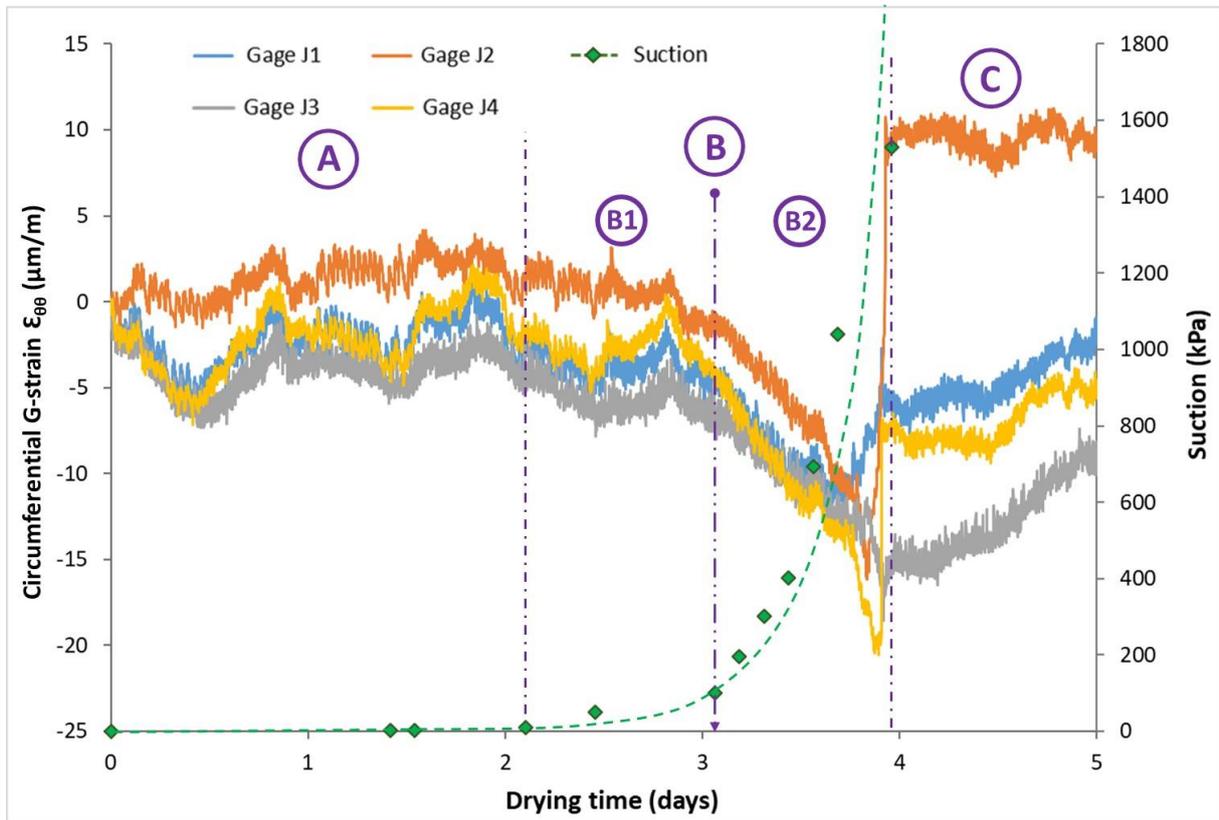


Figure 120(a): Déformations de l'anneau métallique dans l'échantillon D1 pendant le séchage. Comparaison avec l'évolution de la succion dans l'échantillon.

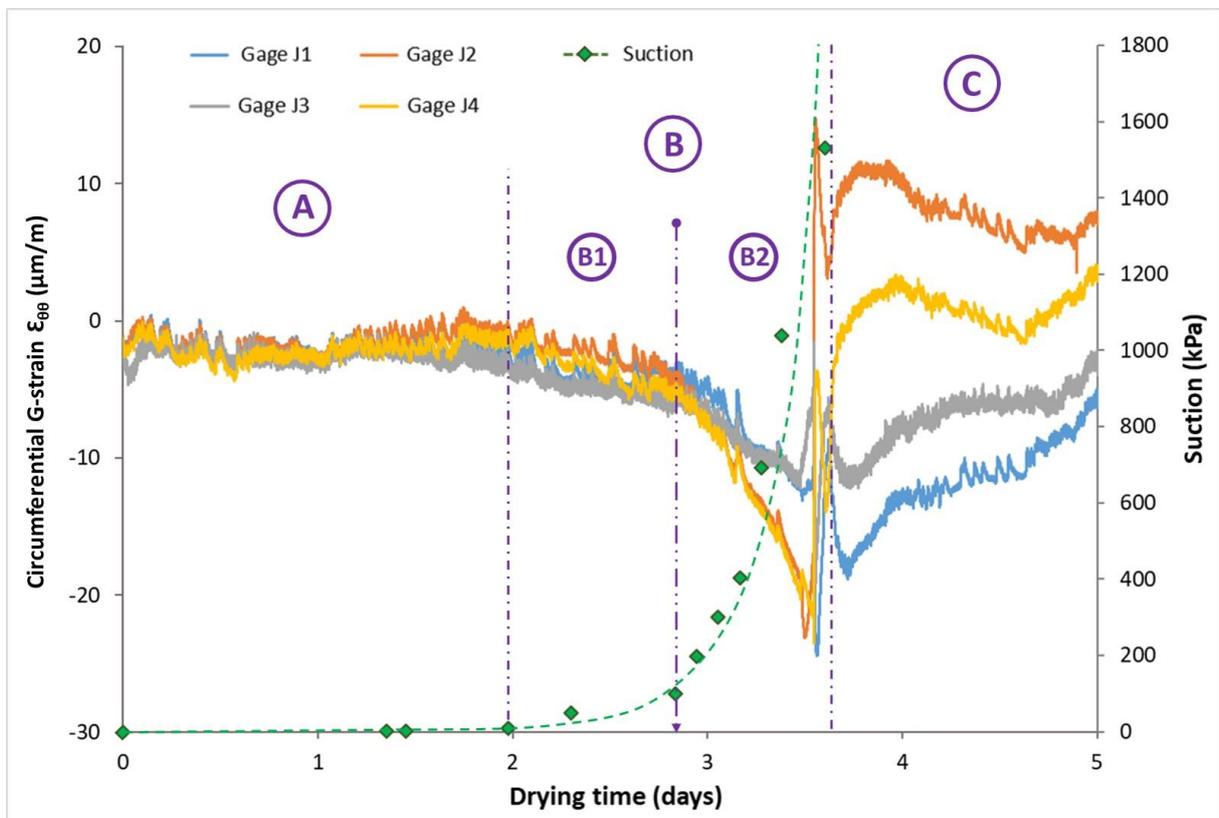


Figure 120(b): Déformations de l'anneau métallique dans l'échantillon D2 pendant le séchage. Comparaison avec l'évolution de la succion dans l'échantillon.

La Figure 120(b) présente l'évolution de la déformation circonférentielle de l'anneau métallique dans l'échantillon D2, ainsi que la succion déduite des courbes de rétention du matériau. Rappelons que l'échantillon D2 est un échantillon dupliqué de l'échantillon D1. On observe dans cet échantillon un comportement en déformation similaire à l'échantillon D1, avec une déformation circonférentielle maximale lors de la rupture de l'échantillon d'environ -25 $\mu\text{m}/\text{m}$. De même, on observe une influence directe de la succion dans l'échantillon sur les déformations mesurées au niveau de l'anneau métallique. Ce comportement similaire, observé dans l'échantillon D2, met en évidence la reproductibilité de la technique CRT.

VI.1.4. Analyse du retrait et de la fissuration

Au fur et à mesure du processus de séchage, l'échantillon D1 subit un retrait centripète dans la direction radiale (Figure 121). À la fin de l'expérience, deux fissures sont observées dans cette direction à partir de la circonférence interne de l'échantillon : une fissure majeure (Major Crack) d'épaisseur 3 mm au voisinage de la jauge J2 et une fissure mineure (Minor Crack) d'épaisseur 0.7 mm entre les jauges J1 et J4. Le cercle bleu représente le contour de l'échantillon à l'état initial avant le séchage. On observe un retrait du rayon de l'échantillon d'environ 1 cm. La rupture de l'échantillon correspond à la propagation de la fissure jusqu'à la circonférence externe de l'échantillon (Major Crack), ce qui entraîne un relâchement de la compression de l'anneau (fin de la phase B dans la Figure 120(a)).

Afin de quantifier les phénomènes de retrait et de fissuration par dessiccation dans les argiles, les densités de retrait global et de fissuration sont calculés à la fin du processus de séchage, lorsque la teneur en eau de l'échantillon atteint sa valeur résiduelle. La densité de retrait global (GSR, 'Global Shrinkage Ratio' en anglais) est définie par la différence entre les surfaces initiale et finale de l'échantillon par rapport à sa surface initiale :

$$\text{GSR} = \frac{\text{Surface finale} - \text{Surface initiale}}{\text{Surface initiale}} \times 100 \quad (29)$$

De même, la densité de fissuration (CR, 'Crack Ratio' en anglais) est définie par la surface des fissures sur la surface de l'échantillon en fin de séchage :

$$\text{CR} = \frac{\text{Surface des fissures}}{\text{Surface finale de l'échantillon}} \times 100 \quad (30)$$

La densité de retrait global de l'échantillon D1 est de 26 %, alors que celle de l'échantillon D2 est de 25 %. Par ailleurs, la densité de fissuration de l'échantillon D1 est de 0.85 %, alors que celle de l'échantillon D2 est de 0.8 %. On remarque que les densités de retrait et de fissuration de ces deux échantillons, ayant les mêmes caractéristiques, sont très proches.

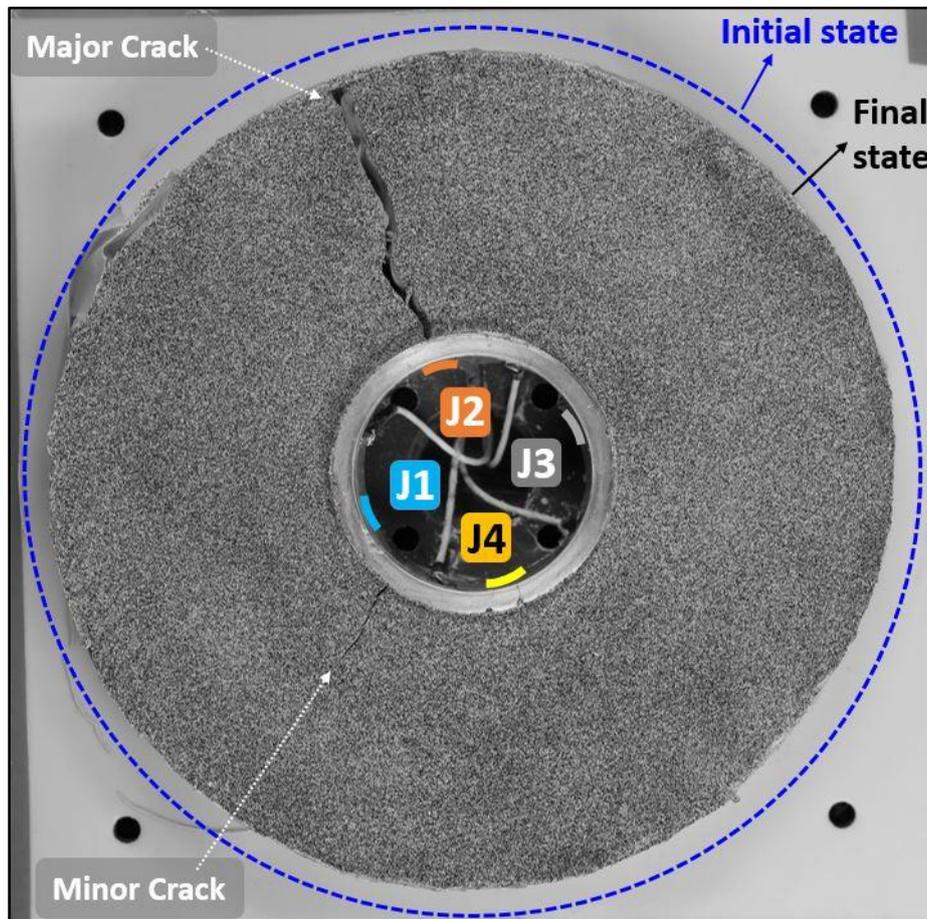


Figure 121: Vue de dessus de l'échantillon D1 à l'état final.

VI.1.5. Déformations mesurées par la technique DIC

VI.1.5.1. Déformations dans le plan (2D)

La cinétique du champ de déformation de l'échantillon tout au long de la dessiccation est étudiée à l'aide de la technique de corrélation d'images numériques (DIC). La Figure 123 présente la visualisation des déformations principales majeurs dans l'échantillon D1, à différents temps de séchage. Notons que la déformation mesurée par la technique DIC représente la déformation résiduelle dans l'échantillon, qui est définie comme étant la résultante entre la déformation libre due au retrait par dessiccation (en l'absence de l'anneau) et la déformation élastique de l'anneau métallique empêchant le retrait de l'échantillon [Hossain, 2004]. Un schéma descriptif des déformations résiduelle, libre et élastique est présenté dans la Figure 122.

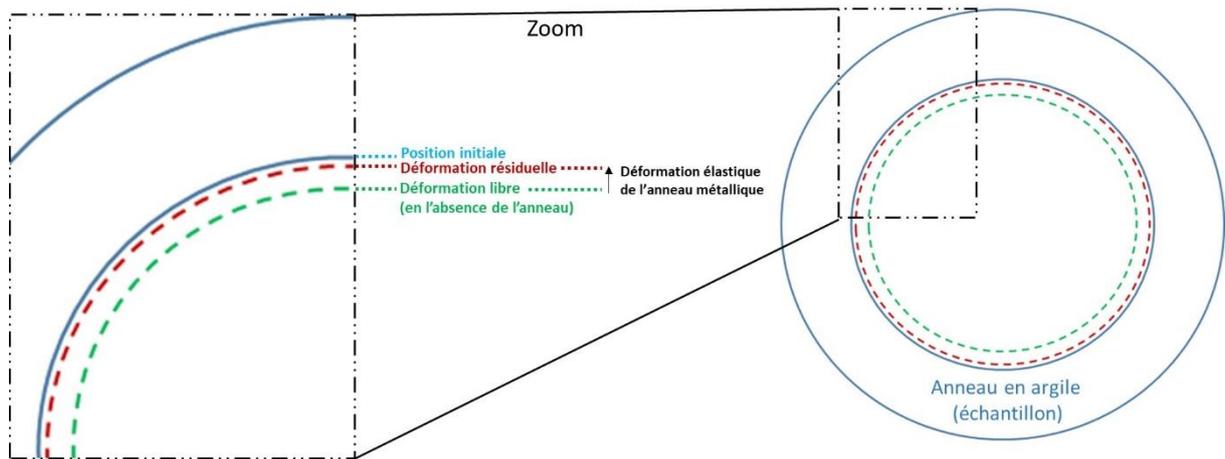


Figure 122: Schéma descriptif des déformations libre, élastique et résiduelle dans l'échantillon étudié.

La Figure 123(A) présente le champ de déformations principales majeures après un temps de séchage absolu de 74 heures depuis le début du séchage. Cet état correspond au début de la sous-phase B2 dans la Figure 120(a)). Par ailleurs, la Figure 123(C) présente ce même champ de déformations après 92 heures de temps de séchage, correspondant cette fois la fin de la sous-phase B2.

On remarque que les déformations de traction (déformations positives) sont concentrées depuis le début de la sous-phase B2 au voisinage immédiat de l'anneau métallique (Figure 123(A)), tandis qu'en dehors de cette zone, les déformations de compression (déformations négatives) sont prédominantes. Au fur et à mesure que le processus de séchage se poursuit, des pics de concentration des déformations de traction sont observés à proximité de l'anneau métallique. Ensuite, ces pics se propagent dans la direction radiale vers le diamètre externe de l'échantillon, indiquant la présence de zones sollicitées. Par conséquent, ces zones sollicitées permettent de prédire l'apparition éventuelle des premières fissures dans l'échantillon. Ceci est confirmé dans les Figure 123(D) et Figure 123(E), où deux fissures s'amorcent et se propagent dans l'échantillon à partir de deux de ces pics. Notons également que lorsqu'une fissure se propage et atteint le diamètre externe (fissure en haut dans la Figure 123(E)), elle relâche les contraintes générées suite à la réaction de l'anneau métallique contre le retrait centripète de l'échantillon. Cette relaxation empêche la propagation des autres fissures dans l'échantillon (par exemple, la fissure en bas dans la Figure 123(E)).

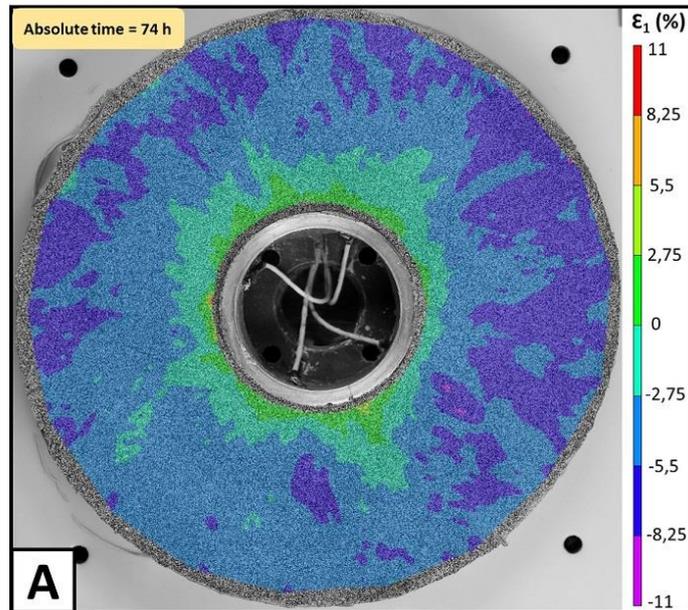


Figure 123: (A) Visualisation des déformations principales majeures dans l'échantillon D1 pour un temps absolu de 74 heures à partir du début de l'expérience.

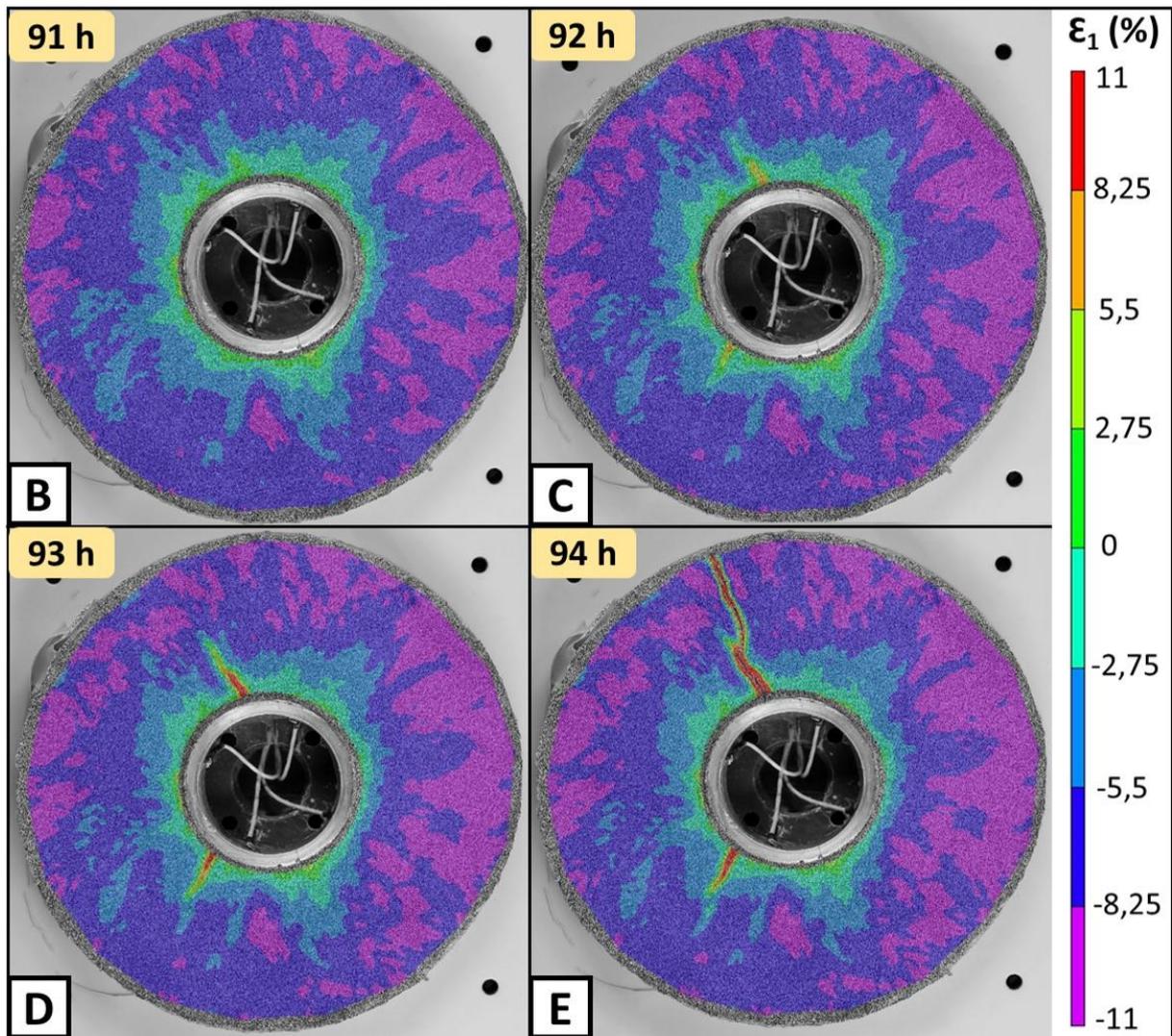


Figure 123: (B, C, D, E) Visualisation des déformations principales majeures dans l'échantillon D1 pour un temps absolu de : (B) 91 heures ; (C) 92 heures ; (D) 93 heures ; (E) 94 heures ; à partir du début de l'expérience.

Pour permettre une analyse plus approfondie des déformations locales, les déformations circonférentielles et radiales dans l'échantillon D1 sont présentées en fonction du rayon et de l'angle θ du contour de l'échantillon, respectivement dans les Figure 124(a) et Figure 124 (b). Ces deux figures représentent l'état de déformation dans l'échantillon une heure après sa fissuration, soit à un temps absolu de 93 heures à partir du début du séchage. Rappelons que la fissuration de l'échantillon est définie par le saut brutal observé dans la déformation de l'anneau métallique (fin de la sous-phase B2 dans la Figure 120(a)).

Les deux pics observés en déformation circonférentielle (Figure 124(a)) correspondent aux deux fissures apparues dans l'échantillon D1. Ces deux pics se trouvent uniquement au voisinage immédiat de l'anneau métallique ($r = 40$ mm et $r = 50$ mm), alors que la déformation circonférentielle à proximité du rayon externe de l'échantillon ($r = 80$ mm) ne présente aucun comportement particulier aux angles correspondant aux deux fissures. Ceci confirme que la fissure se propage du rayon interne de l'échantillon vers son rayon externe. Par conséquent, on constate que les contraintes mécaniques induites par la retenue de l'anneau métallique (ring constraint) sont supérieures aux contraintes induites par le gradient d'humidité dans l'échantillon (Figure 33). Ce constat confirme l'hypothèse de Moon et al. [Moon, 2006a] indiquant que malgré l'influence significative de la direction de séchage sur la distribution des contraintes résiduelles à l'intérieur de l'échantillon, le gradient d'humidité affecte légèrement le taux d'empêchement du Ring-Test.

En revanche, on trouve que les déformations radiales dans l'échantillon, malgré qu'elles soient une fois et demi plus importantes que les déformations circonférentielles, n'ont aucune influence sur la fissuration du matériau (Figure 124(b)). Ces déformations ne montrent aucun comportement particulier aux angles correspondant aux deux fissures. La raison est ce que les déformations radiales sont de type compression, alors que les déformations circonférentielles provoquant la fissuration du matériau sont de type traction. Sachant que la résistance d'un sol à la compression est plus importante que sa résistance à la traction.

Par ailleurs, les déformations locales (circonférentielles et radiales) semblent être homogènes en fonction de l'angle θ du contour de l'échantillon, avec un écart type d'environ 1 % largement inférieur aux ordres de grandeur de ces déformations. Ceci met en évidence l'homogénéité générale du matériau. De même, on remarque que les déformations circonférentielles augmentent en s'éloignant de l'anneau métallique, alors que les déformations radiales diminuent en fonction du rayon de l'échantillon.

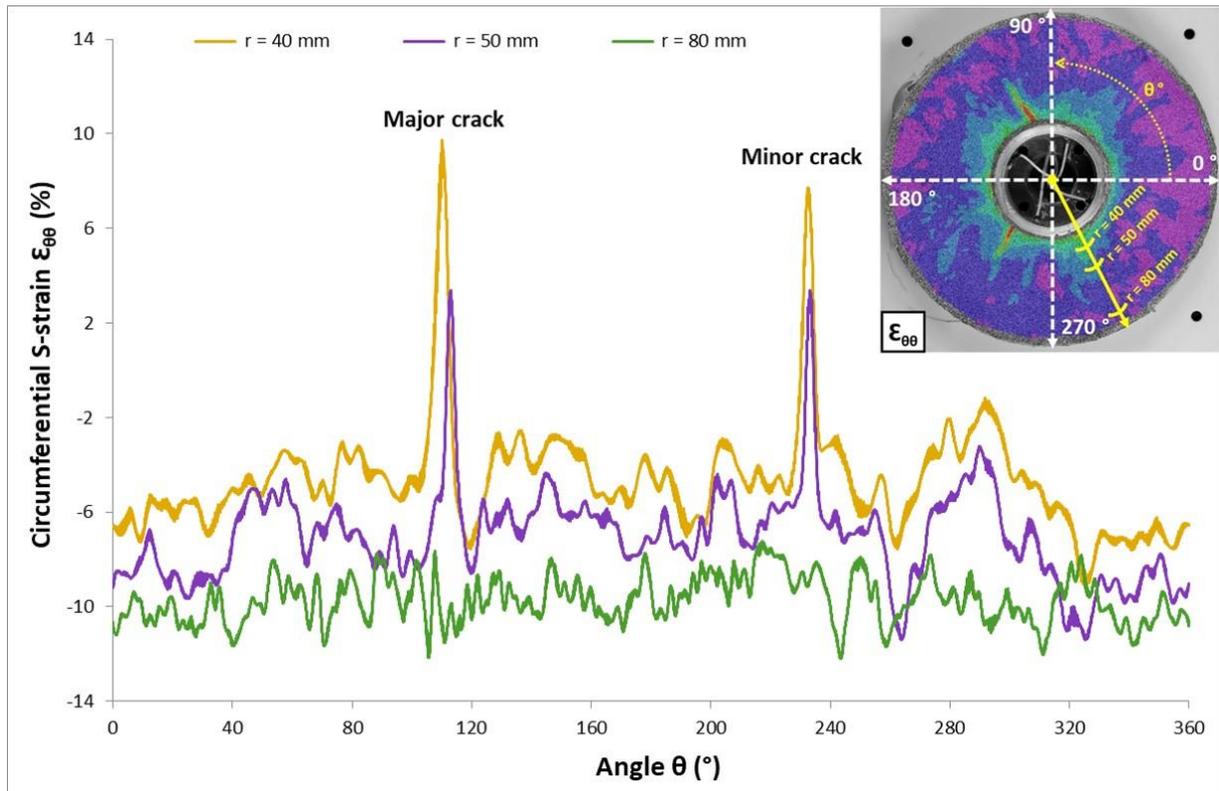


Figure 124(a): Evolution des déformations circonférentielles dans l'échantillon D1 en fonction du rayon et de l'angle θ du contour de l'échantillon.

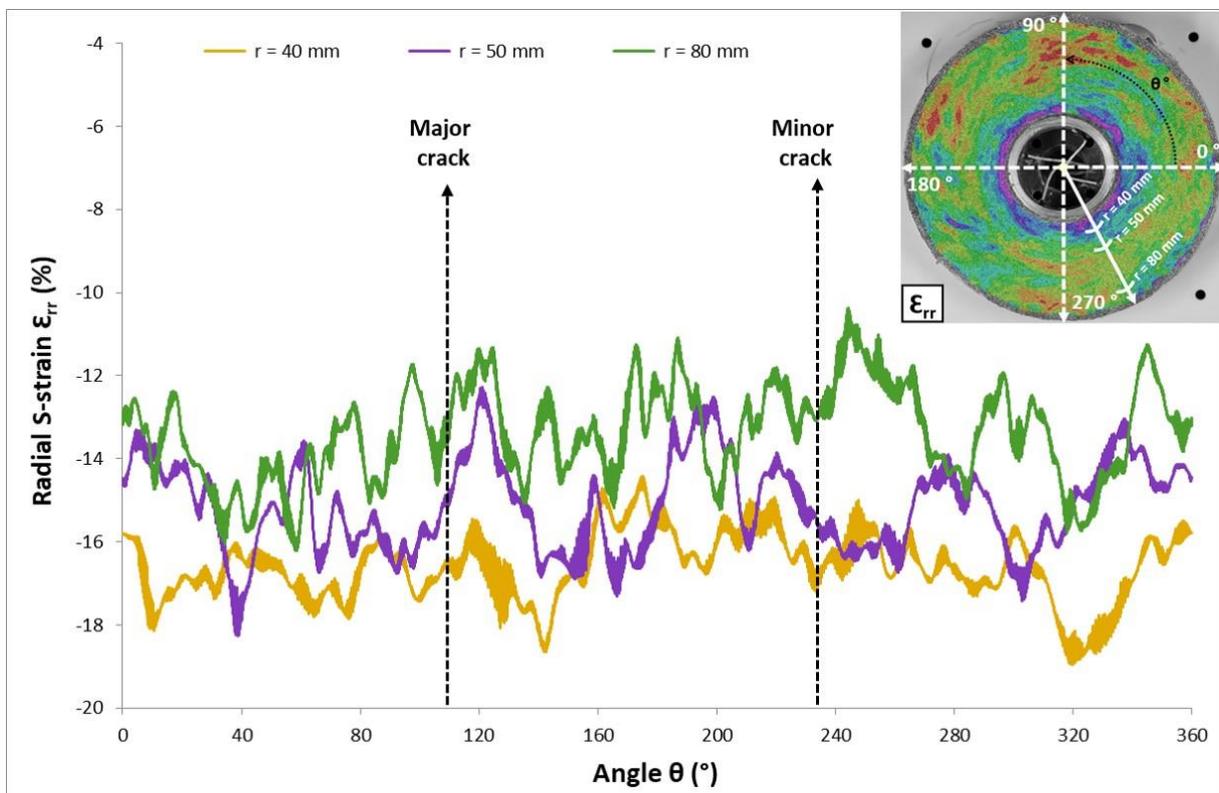


Figure 124(b): Evolution des déformations radiales dans l'échantillon D1 en fonction du rayon et de l'angle θ du contour de l'échantillon.

Les Figures 125(a) et 125(b) montrent les directions des déformations principales majeures (ϵ_1) et mineures (ϵ_2), une heure après la fissuration de l'échantillon. On observe que les déformations principales majeures sont orientées dans la direction circonférentielle, tandis que les déformations principales mineures sont orientées dans la direction radiale. Ceci permet de constater globalement un comportement homogène de l'échantillon.

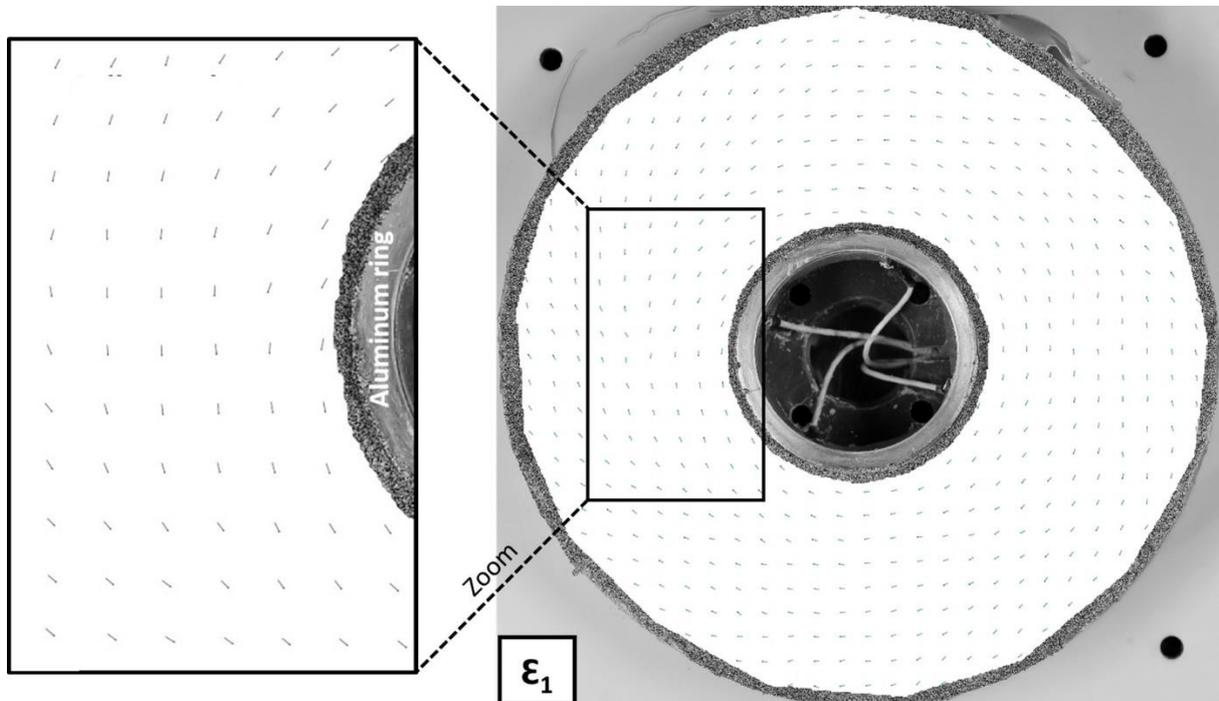


Figure 125(a): Directions des déformations principales majeures une heure après la fissuration de l'échantillon D1.

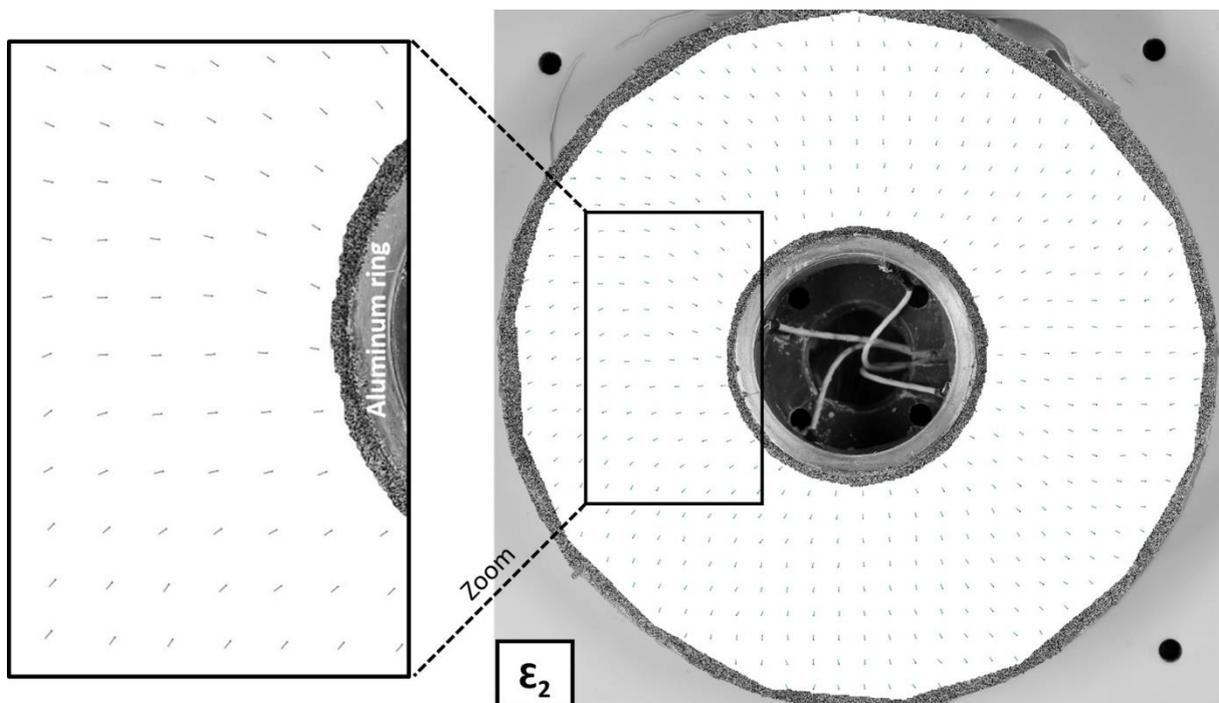


Figure 125(b): Directions des déformations principales mineures ϵ_2 une heure après la fissuration de l'échantillon D1.

VI.1.5.2. Stéréo-corrélation (3D)

En plus des déformations dans le plan, les déformations locales verticales sont analysées afin d'étudier l'effet de ces déformations sur la fissuration de l'échantillon d'une part, et d'estimer la déformation volumique de l'échantillon au cours du séchage d'autre part. La Figure 126(a) présente la visualisation des déformations verticales (ϵ_{zz}) dans la surface supérieure de l'échantillon D1 à la fin de l'expérience, après 13 jours de temps de séchage. On remarque que les zones des deux fissures ne présentent pas des déformations verticales particulières, ce qui indique que la déformation verticale (ϵ_{zz}) n'a pas d'effet significatif sur la fissuration du matériau.

Pour permettre une analyse plus approfondie des déformations verticales, ces déformations sont présentées en fonction du rayon et de l'angle θ du contour de l'échantillon dans la Figure 126(b). On observe que la déformation verticale augmente en s'éloignant des deux bords de l'échantillon, ce qui met en évidence l'effet important des conditions aux limites sur le retrait vertical de l'échantillon dans le Ring-Test. En outre, on remarque que les déformations verticales (ϵ_{zz}), qui se situent entre 14 % et 22 %, sont aussi importantes que les déformations dans le plan ($\epsilon_{\theta\theta}$ et ϵ_{rr}) qui elles, ne dépassent pas 18 %. Ceci montre que la déformation verticale ne peut pas être négligée dans l'analyse des essais de dessiccation. Néanmoins, ces déformations de type compression n'ont pas montré un effet significatif sur la fissuration de l'échantillon.

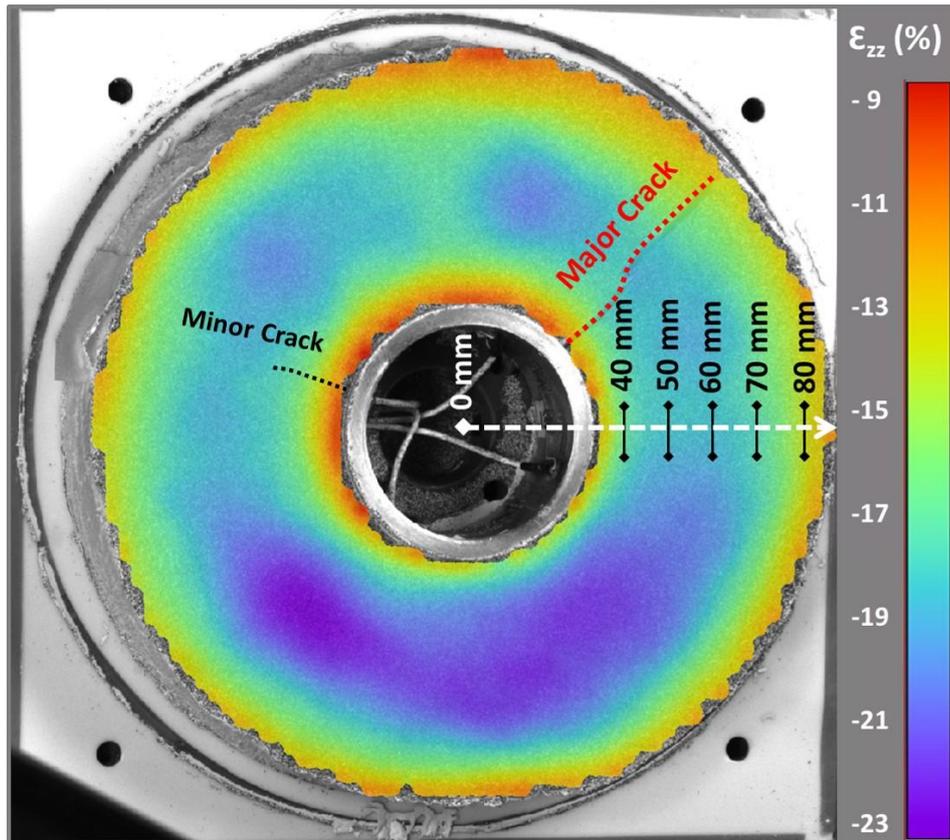


Figure 126(a): Visualisation des déformations verticales dans l'échantillon D1 à la fin de l'expérience.

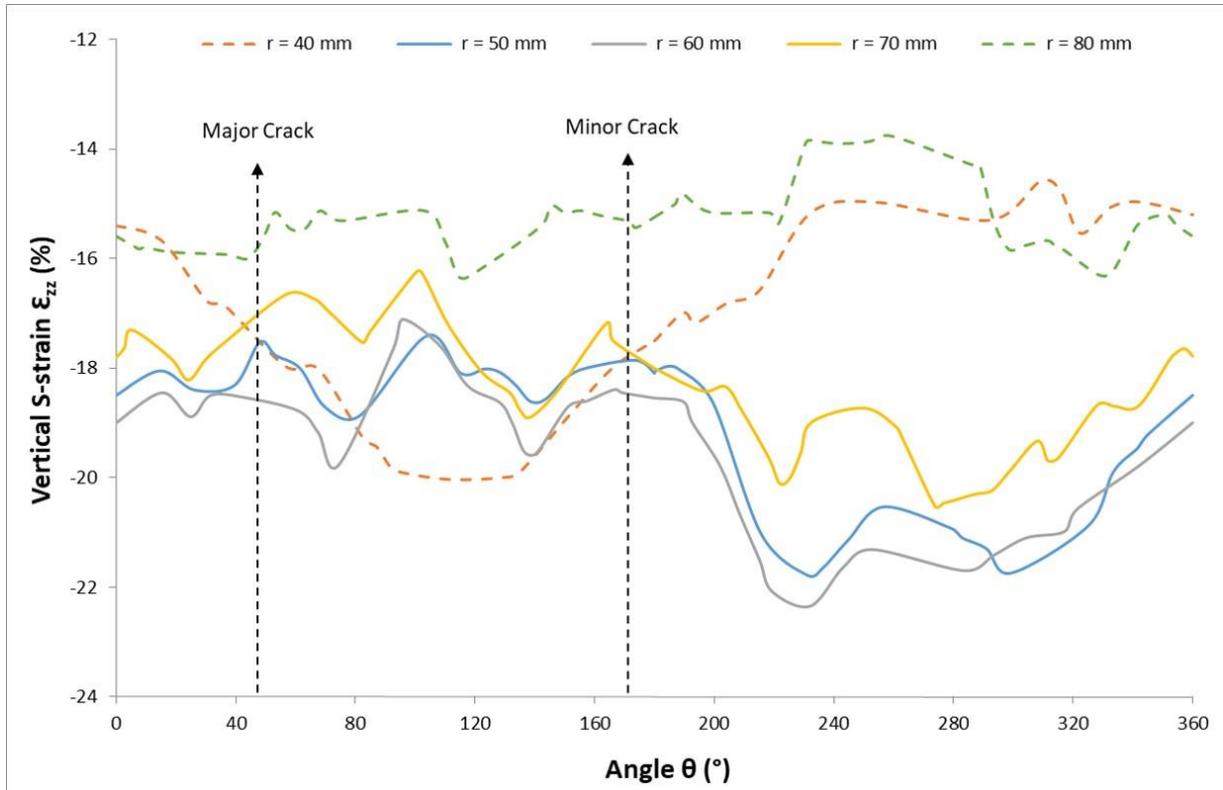


Figure 126(b): Evolution des déformations verticales dans l'échantillon D1 en fonction du rayon et de l'angle θ du contour de l'échantillon.

Par ailleurs, nous avons effectué une comparaison entre l'évolution de la déformation volumique déterminée à l'aide de la technique DIC dans les échantillons D1 et D2, et la déformation volumique déduite des courbes de rétention du matériau (SWRC) [Indarto, 1991] (Figure 127(a)). On observe que les déformations volumiques dans les échantillons D1 et D2 sont similaires au cours de la dessiccation. Ceci met en évidence la bonne reproductibilité de l'essai dans le dispositif DIC-CRT. En outre, le faible écart entre les déformations déterminées par la technique DIC et celles déduites des courbes de rétention du matériau montre que globalement la technique DIC peut estimer de manière correcte les déformations en cours de dessiccation.

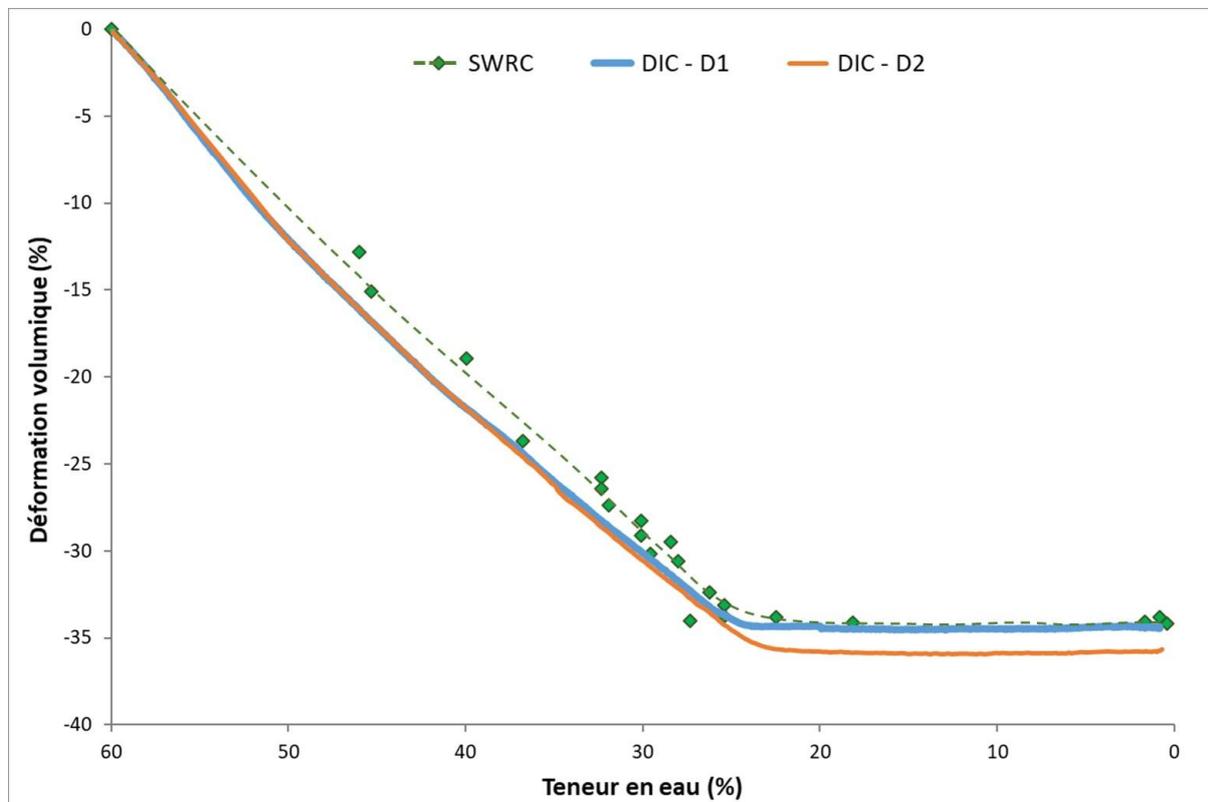


Figure 127(a): Comparaison entre l'évolution des déformations volumiques déterminées par la technique DIC dans les échantillons D1 et D2, et celles déduites des courbes de rétention du matériau (SWRC).

Les déformations principales majeures (ϵ_1), principales mineures (ϵ_2) et verticales (ϵ_z) moyennes dans l'échantillon D1 sont présentées dans la Figure 127(b) au cours du processus de dessiccation. De même, la déformation volumique de l'échantillon (ϵ_v) mesurée par la technique DIC, ainsi que celle déduite des courbes de rétention du matériau (SWRC) [Indarto, 1991] sont également présentées dans la même figure. Notons qu'une déformation moyenne représente la valeur moyenne des déformations sur toute la surface de l'échantillon. On observe que ces déformations décroissent uniformément au cours du séchage jusqu'à atteindre la limite de retrait du matériau, pour une teneur en eau de 24 %. De même, la première fissure est apparue dans l'échantillon D1 à une teneur en eau de 26 %, juste avant que le matériau atteigne sa limite de retrait. Par contre, la première fissure dans l'échantillon D2 est apparue un peu plus tôt, à une teneur en eau de 27 %.

Par ailleurs, on remarque que la déformation verticale moyenne (ϵ_z) est plus importante que les déformations dans le plan (x, y) (ϵ_1 et ϵ_2). L'écart de 5 % observé entre les déformations volumiques (ϵ_v et SWRC) d'une part, et la somme des déformation moyennes ($\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_z$) d'autre part peut être due au fait que ϵ_v et SWRC sont des mesures globales, alors que $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_z$ tiennent compte des fluctuations des déformations locales comme le montre la Figure 124.

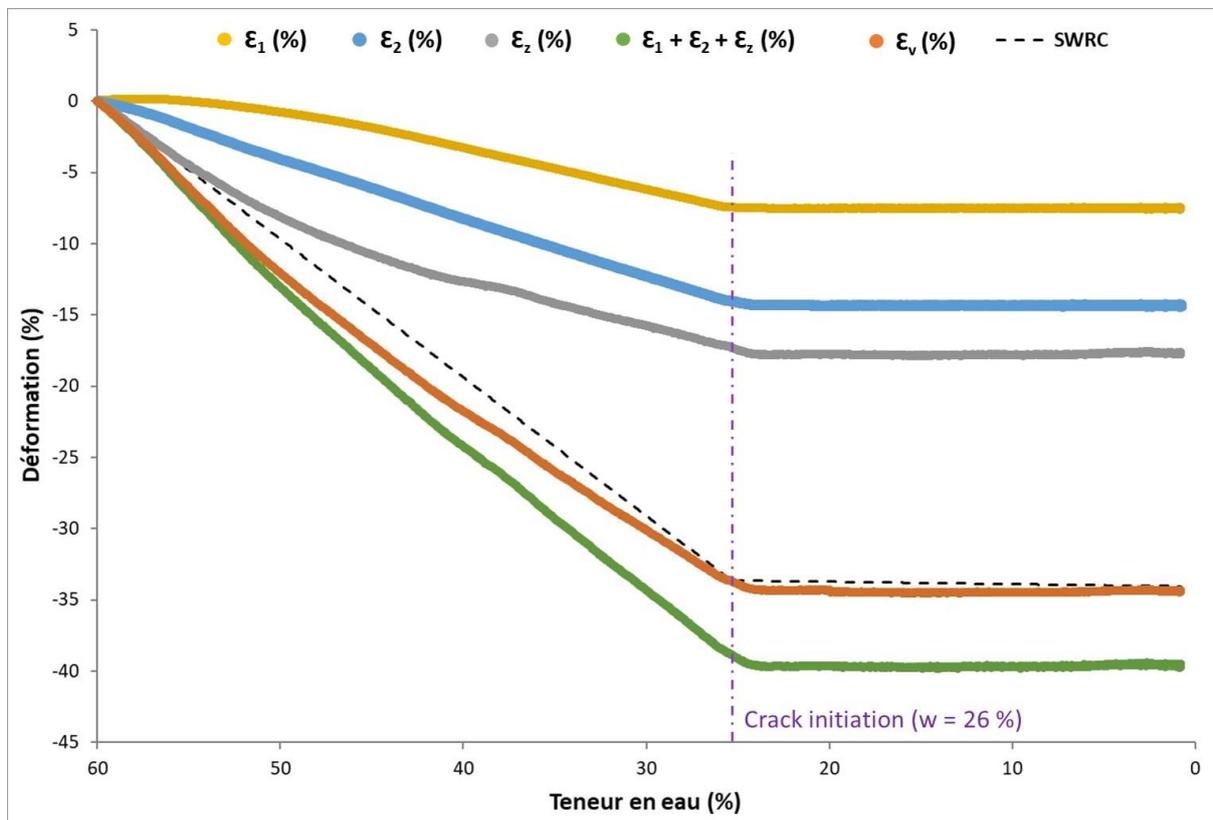


Figure 127(b): Evolution des déformations principales majeures (ϵ_1), principales mineures (ϵ_2) et verticales (ϵ_z) moyennes au cours du séchage dans l'échantillon D1.

VI.1.6. Corrélation entre les techniques DIC et CRT

Afin d'associer les déformations déterminées par la technique DIC à celles déterminées par la technique CRT, une comparaison est effectuée entre l'évolution de la déformation circonférentielle dans l'argile (Figure 123) et dans l'anneau métallique (Figure 120(a)) lors de l'initiation de la première fissure dans l'échantillon D1. La Figure 128 représente un zoom de la déformation circonférentielle dans l'anneau métallique (Figure 120(a)) lors de l'initiation de la première fissure. De même, les points A à E dans la Figure 128 correspondent aux mêmes temps absolus de séchage dans les Figure 123(A) à Figure 123(E). On remarque que la déformation circonférentielle reste négligeable dans l'anneau métallique et son voisinage immédiat jusqu'au point A dans la Figure 128, correspondant à la Figure 123(A). Ensuite, la déformation de l'anneau augmente linéairement en fonction du temps avec une pente d'environ $-15 \mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$ jusqu'au point B, correspondant à la Figure 123(B). Au-delà du point B, cette déformation s'accélère brutalement avec une pente d'environ $-115 \mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$ (7 fois plus grande que la précédente) jusqu'au point C, qui correspond à l'initiation de la première fissure matérialisée dans la Figure 123(C) par une propagation radiale de la déformation circonférentielle (couleur rouge vif). L'accélération brutale dans la pente de la déformation entre les points B et C est probablement due à une augmentation rapide de la succion au-delà de 1000 kPa (Figure 120(a)).

Une fois cette première fissure amorcée, les contraintes dans l'anneau métallique commencent à se relaxer, et on observe une chute de la déformation du point C au point D avec une pente d'environ $+115 \mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$, indiquant une propagation radiale de la fissure dans l'échantillon (Figure 123(D)). La propagation de cette fissure se poursuit entre les points D et E en s'accélégrant (avec une pente de $+260 \mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$), jusqu'à atteindre le diamètre extérieur de l'échantillon (Figure 123(E)). L'ouverture complète de la fissure se traduit par un saut brutal dans la déformation de l'anneau métallique du point E au point F. D'après l'approche de la mécanique de la rupture (voir paragraphe I.5.2.3 du Chapitre I), la diminution de la déformation après la fissuration de l'échantillon est due à la dissipation de l'énergie plastique dans le matériau [Irwin, 1957 ; Rice, 1968 ; Costa, 2010]. Cette cinétique décrite entre les points A et F correspond à une variation de la teneur en eau relativement faible, comprise entre 32 % au point A et de 26 % au point F (Figure 118(a)). En outre, étant donné que la teneur en eau de désaturation de cette argile est de l'ordre de 25 % [Indarto, 1991], on constate que la fissuration du matériau s'est produite tandis qu'il est toujours saturé en eau. Ceci a été également observé par Wei et al. [Wei, 2016] sur des essais de retrait libre.

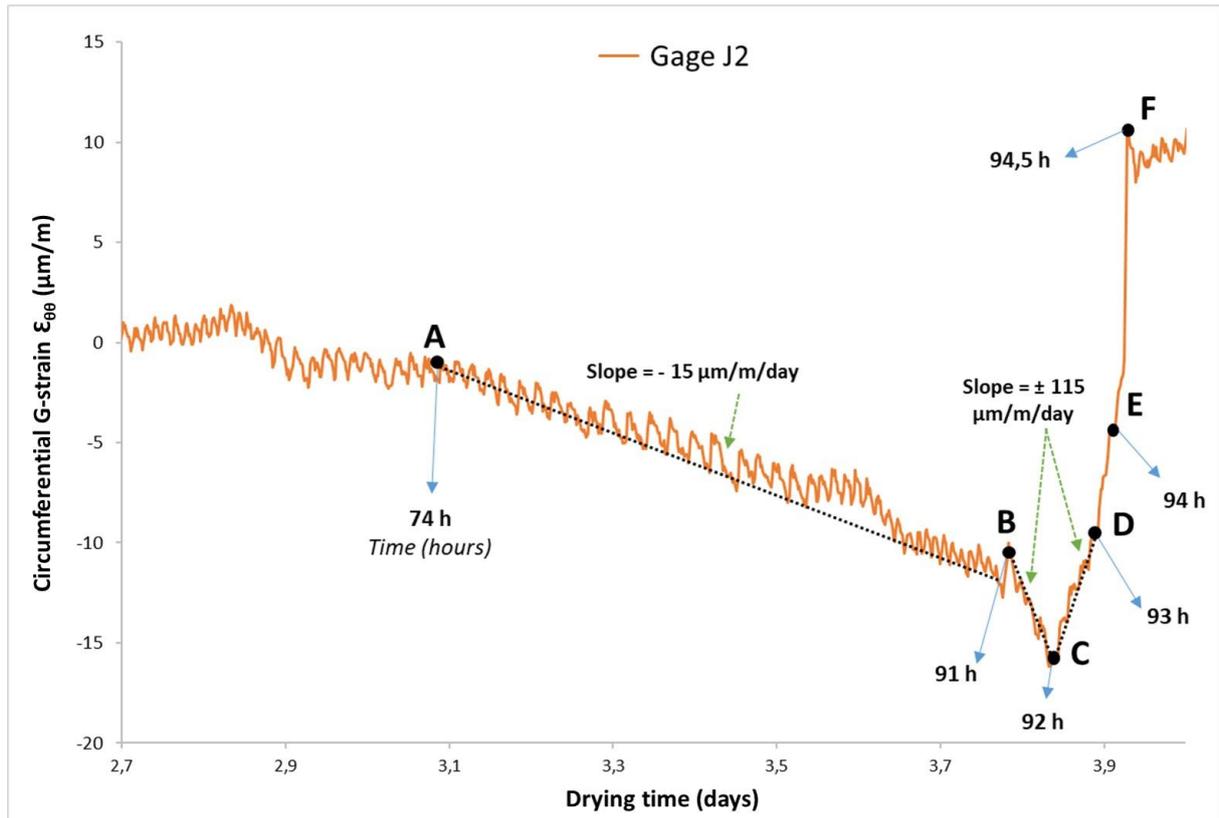


Figure 128: Déformation circonférentielle dans l'échantillon D1 lors de l'initiation de la première fissure.

VI.2. Effet des conditions aux limites et de l'état hydrique initial sur le retrait et la fissuration des argiles

Une première série d'essais de retrait empêché est menée sur 5 échantillons de kaolinite. L'objectif de ces essais est d'étudier, à l'aide de la technique DIC-CRT, l'effet des conditions aux limites et de l'état hydrique initial sur la fissuration par dessiccation des argiles. La Figure 129 présente un organigramme décrivant les différents paramètres étudiés dans cette série d'essais. L'effet des conditions aux limites est traité à travers trois types de bases : lisse (échantillons D1 et D2), mi-rugueuse (échantillon D3) et rugueuse (échantillon D4) (voir paragraphe III.1.4 du Chapitre III). De même, l'état hydrique initial est prospecté à travers deux teneurs en eau initiales : une teneur en eau égale à une fois et demi la limite de liquidité du matériau (échantillons D1 et D2) et une autre égale à sa limite de liquidité (échantillon D5). Les autres caractéristiques de ces essais restent identiques. Elles sont détaillées dans le paragraphe V.1.1.3 du Chapitre V. De même, la procédure de mise en œuvre est décrite dans le paragraphe VI.1.1 de ce même chapitre.

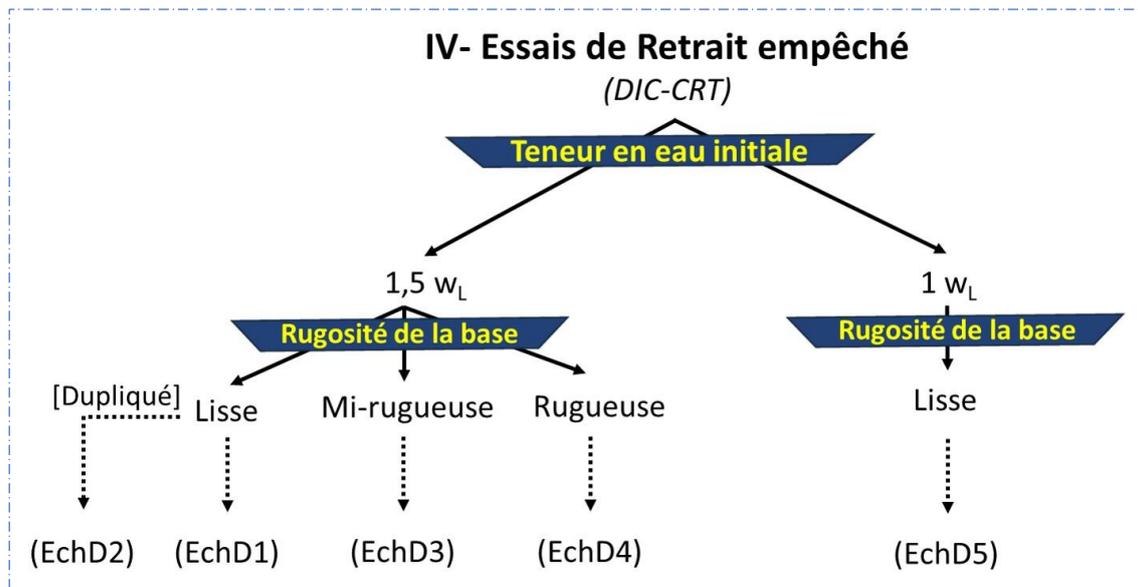


Figure 129: Essais de retrait empêché traitant l'effet des conditions aux limites et de la teneur eau en initiale.

VI.2.1. Cinétique de séchage

La Figure 130 présente l'évolution de la teneur en eau moyenne des échantillons D1 à D5 au cours de la dessiccation. Pendant la phase initiale de séchage, les échantillons D1, D2, D3 et D4, ayant une teneur en eau initiale de $1.5 w_L$, montrent un comportement hydrique similaire, avec une cinétique de séchage variante entre -8 \%/jour et -9 \%/jour . Par contre l'échantillon D5, ayant une teneur en eau initiale de $1 w_L$, présente une cinétique inférieure de -6.5 \%/jour .

Ceci met en évidence l'influence de la teneur en eau initiale du matériau sur son comportement hydrique. Néanmoins, à la fin de la dessiccation, tous ces échantillons atteignent une même teneur en eau résiduelle d'environ 1 %, après 10 jours de séchage. La première fissure dans ces échantillons est apparue à des teneurs en eau variant aléatoirement de 25 % à 28 %, correspondant à des succions allant de 1500 à 700 kPa. Notons que la première fissure est toujours apparue au voisinage de l'anneau métallique, puis se propage radialement vers le diamètre extérieur de l'échantillon.

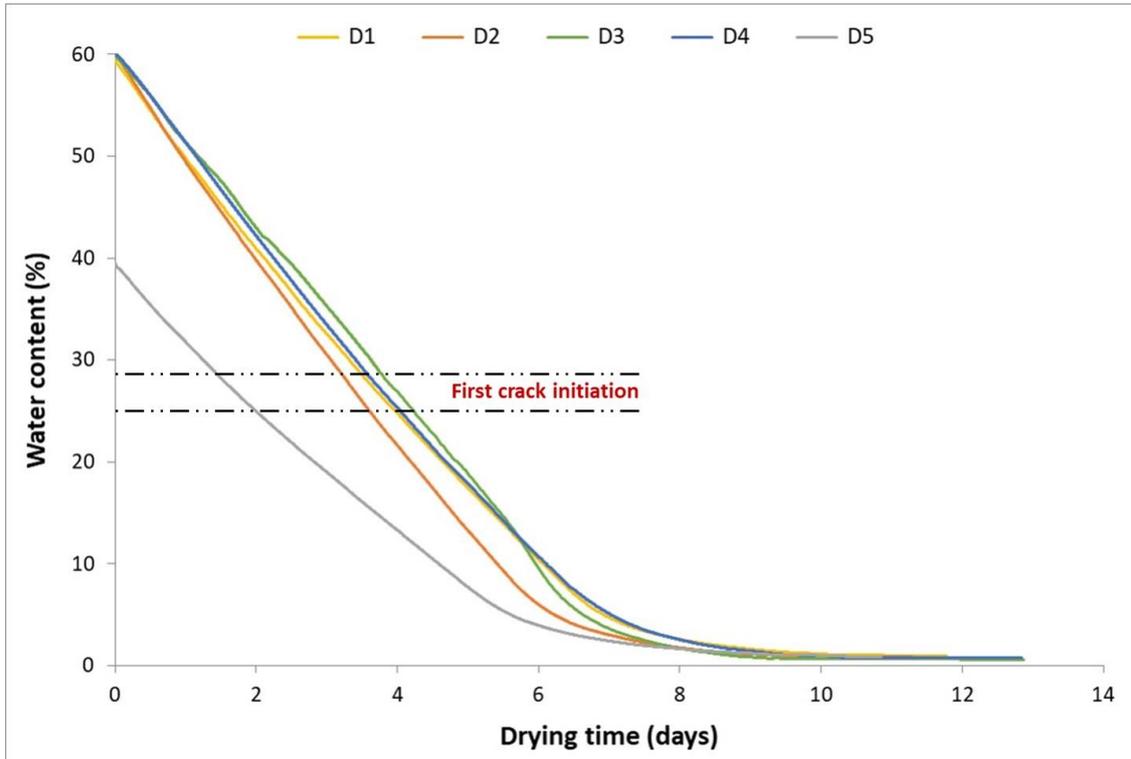


Figure 130: Evolution de la teneur en eau des échantillons D1 à D5 au cours du séchage.

VI.2.2. Déformations mesurées par la technique CRT

La Figure 131 montre l'évolution de la déformation circonférentielle de l'anneau métallique dans l'échantillon D5, ainsi que la succion déduite des courbes de rétention du matériau (SWRC) [Indarto, 1991]. On remarque que cet échantillon présente un comportement en déformation similaire aux échantillons D1 et D2 (voir paragraphe VI.1.3), malgré son état hydrique initial moins humide (1 wL). De même, on observe l'influence de la succion sur l'évolution des déformations dans l'anneau métallique dans la phase A, ainsi que dans les deux sous-phases B1 et B2. Dans la sous-phase B2, l'anneau métallique se déforme selon une pente de $-25 \mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$ jusqu'à la fissuration de l'échantillon au bout de 2.3 jours pour une déformation circonférentielle maximale d'environ $-20 \mu\text{m}/\text{m}$. Cette déformation maximale est

également mesurée au niveau des jauges J1 et J2, situées au voisinage des deux plus grandes fissures (fissures Cr1 et Cr2) dans cet échantillon (voir Figure 133(a)). Néanmoins, la jauge J4, située du côté opposé à la fissure Cr1, a montré une pente de déformation relativement faible. La similitude observée dans les déformations mesurées par la technique CRT pour les échantillons D1, D2 et D3 indique que la teneur en eau initiale n'a pas un effet important sur son comportement en déformation. La raison est que la succion qui se développe dans cette argile à des teneurs en eau supérieures à 40 % est très faible (de l'ordre de 10 kPa) (Figure 118(f)).

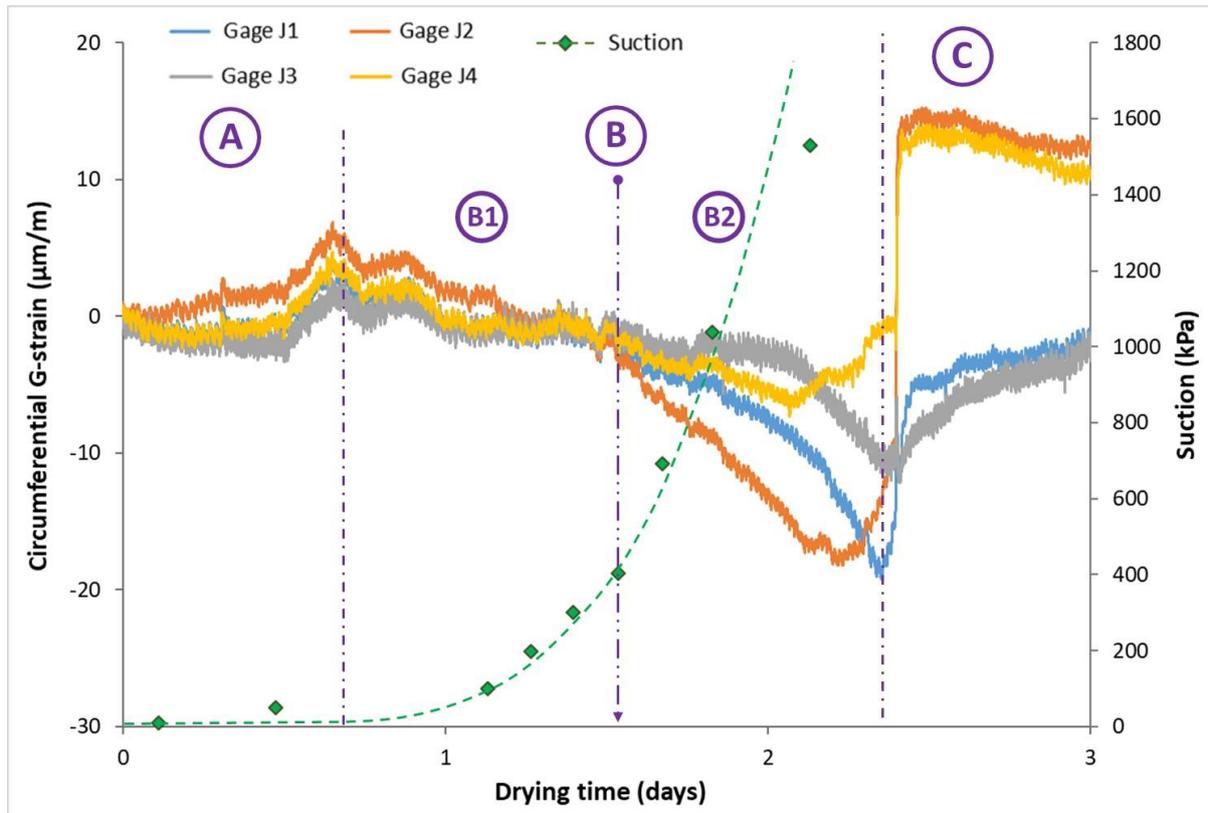


Figure 131: Déformations de l'anneau métallique dans l'échantillon D5 pendant le séchage. Comparaison avec l'évolution de la succion dans l'échantillon.

Par ailleurs, les échantillons D3 et D4, ayant respectivement une base mi-rugueuse et une base rugueuse, ont également montré un comportement en déformation similaire. Ils ont atteint une déformation maximale à la rupture de $-20 \mu\text{m/m}$ et $-15 \mu\text{m/m}$, respectivement pour les échantillons D3 et D4. Ceci indique que les conditions aux limites n'ont pas un effet significatif sur le comportement en déformation des échantillons du dispositif DIC-CRT. La raison est que l'effet des conditions aux limites est masqué par l'effet de l'épaisseur de cet échantillon qui est de 30 mm. Ce constat est compatible avec les observations du Chapitre 3 concernant l'échantillon B2.

VI.2.3. Analyse du retrait et de la fissuration

La Figure 132 présente la densité de retrait global, ainsi que la densité de fissuration des échantillons D1 à D5 à la fin du processus de séchage, lorsque la teneur en eau de l'échantillon atteint sa valeur résiduelle. On remarque que les conditions aux limites (échantillons D3 et D4) ne montrent aucun effet sur les densités du retrait global et de la fissuration dans ces essais de retrait empêché. Par contre, l'état hydrique initial de l'échantillon présente un effet significatif sur sa densité de retrait global (échantillon D5). Ceci est due au retrait que le matériau sursaturé subit lors de l'évaporation de la phase liquide (voir Figure 118(b)). Néanmoins, l'analyse de la densité de fissuration ne montre aucun effet de l'état hydrique initial du matériau.

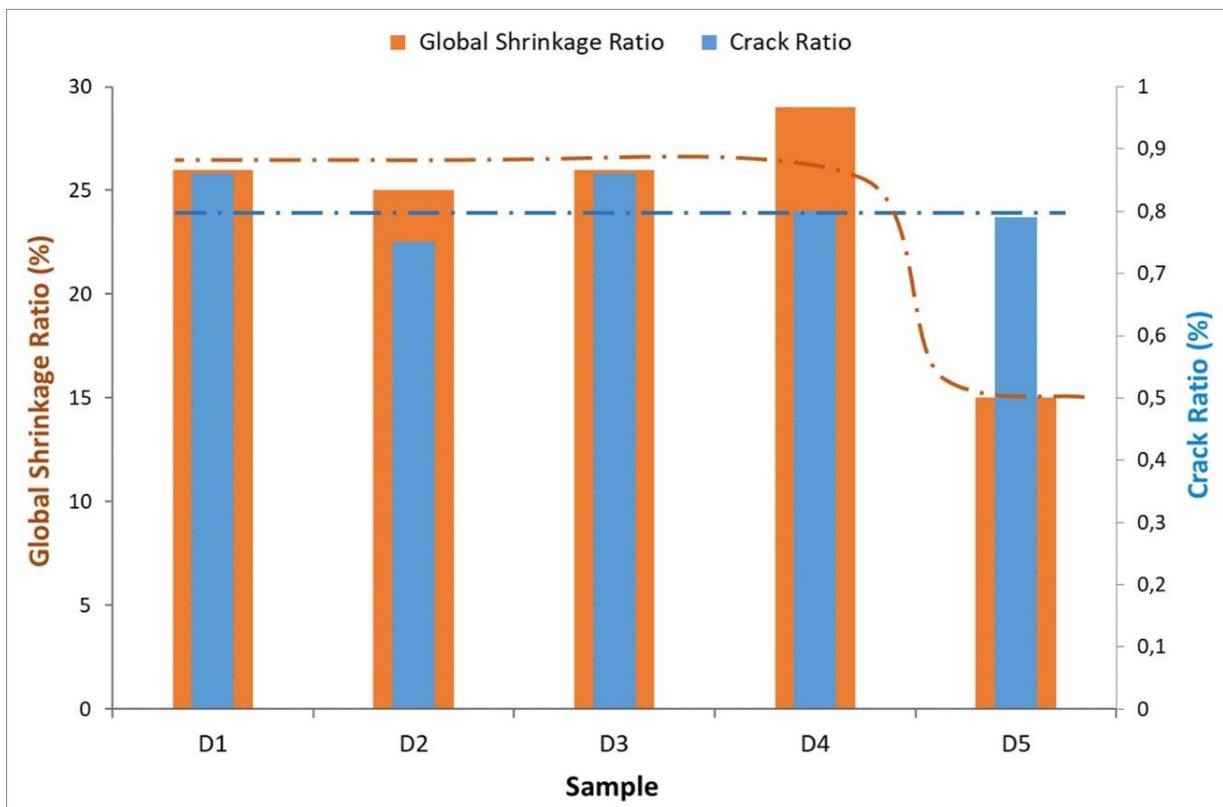


Figure 132: Densité de retrait global et densité de fissuration des échantillons D1 à D5 à la fin de la dessiccation.

VI.2.4. Déformations mesurées par la technique DIC

VI.2.4.1. Déformations dans le plan (2D)

La Figure 133(a) présente la visualisation des déformations principales majeures, correspondant aux déformations circonférentielles, dans l'échantillon D5 à la fin de la dessiccation. On observe la présence de cinq fissures (Cr1 à Cr5) partant de l'interface entre l'anneau métallique et l'échantillon. Notons que ces fissures sont numérotées par ordre chronologique d'apparition, basé sur l'analyse DIC.

Pour permettre une analyse plus approfondie de la répartition des déformations circonférentielles provoquant la fissuration du matériau, ces déformations sont illustrées à la fin de la dessiccation, au voisinage immédiat de l'anneau métallique ($r = 35$ mm), en fonction de l'angle θ du contour de l'échantillon (Figure 133(b)). Ce rayon de 35 mm représente le point le plus proche de l'interface métal/sol où l'analyse DIC est possible. On observe, dans ce même échantillon D5, la présence de cinq pics de déformation correspondant aux cinq fissures observées dans la Figure 133(a). Notons qu'un pic de déformation est défini par un écart supérieur à 5 % de déformation sur un angle inférieur à 20° , à condition que le sommet du pic corresponde à une déformation positive (extension). On remarque que le pic correspondant à la fissure Cr1 dans l'échantillon D5 est plus intense que les pics des autres échantillons, avec un rapport supérieur à 1.5. Ceci met en évidence l'influence de l'état hydrique initial du matériau sur l'intensité de sa fissuration. L'intensité de la fissuration est définie par la déformation maximale conduisant à la fissuration de l'échantillon à l'interface avec l'anneau métallique.

De même, on remarque que le nombre des pics de déformations dans l'échantillon D5 est supérieur aux autres échantillons qui possèdent un à deux pics. Ceci indique qu'un état hydrique moins humide acquiert au matériau un comportement un peu plus fragile lors de la dessiccation. Par contre, les déformations des échantillons D3 et D4 ne montrent aucun comportement particulier par rapport aux échantillons D1 et D2 (échantillons de référence). Ce résultat confirme le fait que l'effet des conditions aux limites dans ces échantillons est masqué par l'effet de l'épaisseur de l'échantillon.

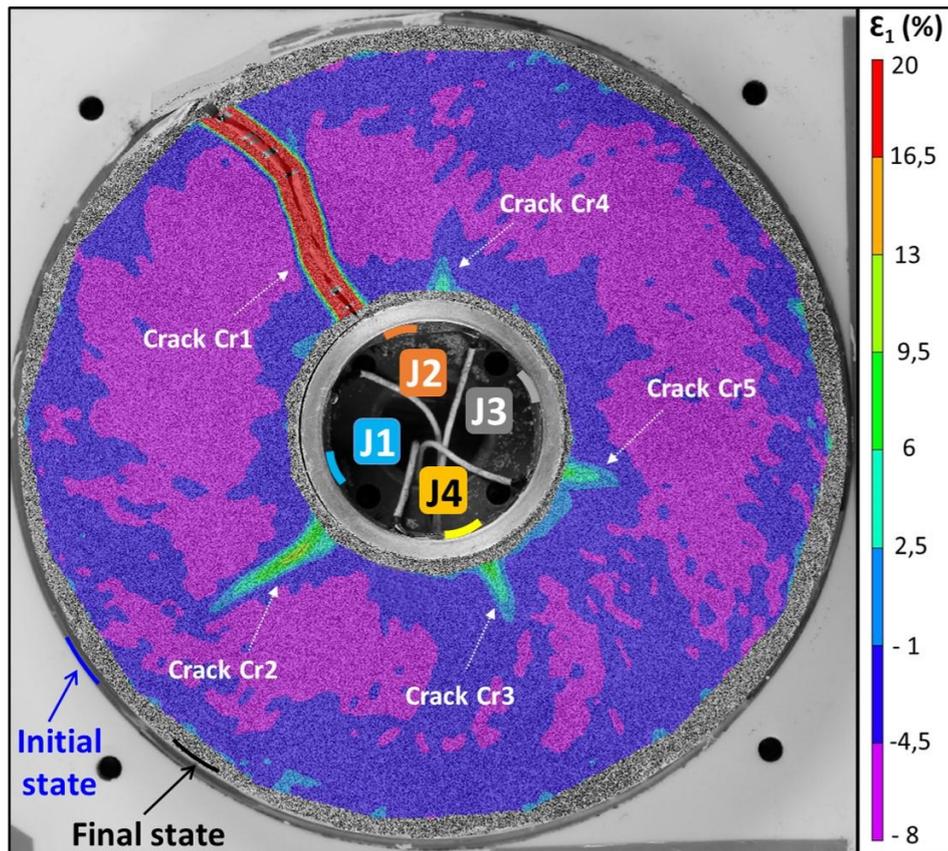


Figure 133(a): Visualisation des déformations principales majeures dans l'échantillon D5 à la fin de la dessiccation.

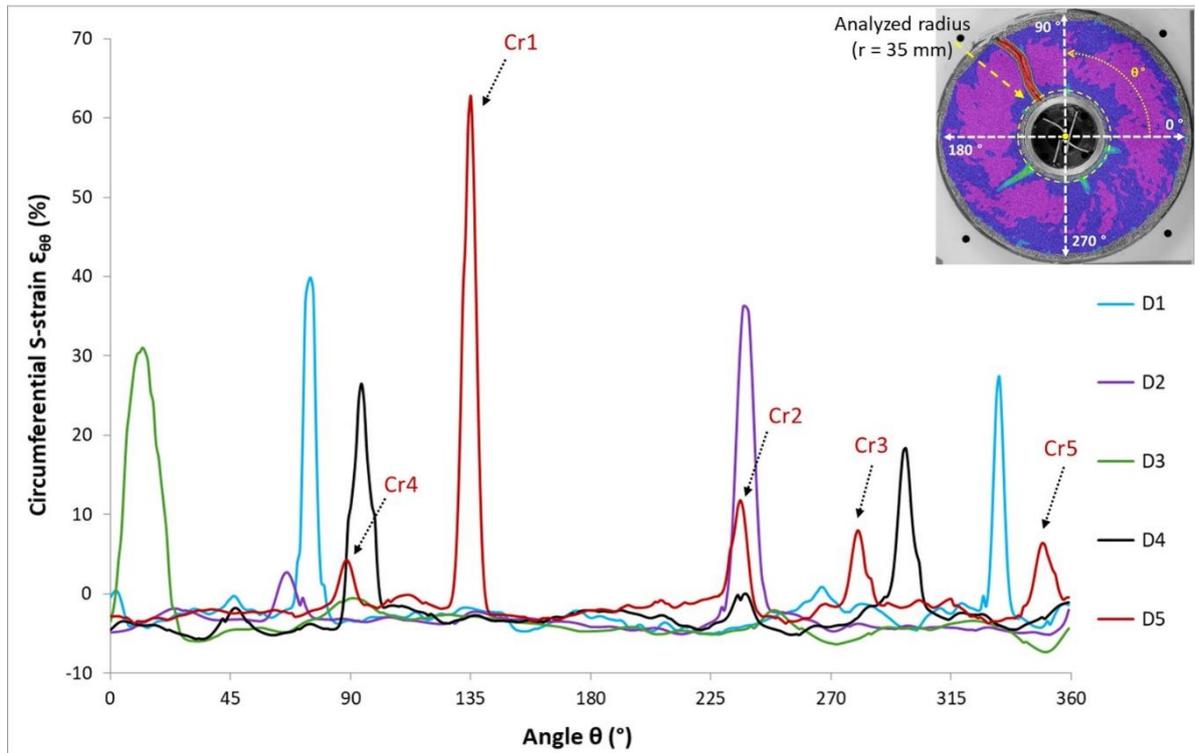


Figure 133(b): Évolution des déformations circonférentielles à la fin de la dessiccation, au voisinage immédiat de l'anneau métallique, en fonction de l'angle θ du contour de l'échantillon.

VI.2.4.2. Stéréo-corrélation (3D)

Afin d'étudier l'influence de l'état hydrique initial du matériau sur son comportement en déformation dans les trois directions, une comparaison de l'évolution des déformations principales majeures (ϵ_1), principales mineures (ϵ_2) et verticales (ϵ_z) moyennes au cours du séchage est effectuée pour les échantillons D1 et D5 (Figure 134). De même, une comparaison de l'évolution des déformations volumiques (ϵ_v) est présentée dans la même figure.

On remarque que toutes ces déformations atteignent leurs limites à une teneur en eau de 24 %, correspondant à la limite de retrait du matériau (voir Figure 118(b)). En comparant l'ordre de grandeur de ces déformations dans les échantillons D1 et D5 lorsque le matériau a atteint sa limite de retrait, on trouve que la déformation principale majeure (ϵ_1) a diminué de 10 %, la déformation principale mineure (ϵ_2) a diminué de 50 %, la déformation verticale (ϵ_z) a diminué de 25 %, alors que la déformation volumique (ϵ_v) a diminué de 30 %. Etant donné que les déformations principales majeures (ϵ_1) sont orientées dans la direction circonférentielle, tandis que les déformations principales mineures (ϵ_2) sont orientées dans la direction radiale (voir Figure 125), on peut constater que la déformation radiale est celle la plus influencée par l'état hydrique initiale du matériau, alors que la déformation circonférentielle est celle la moins influencée.

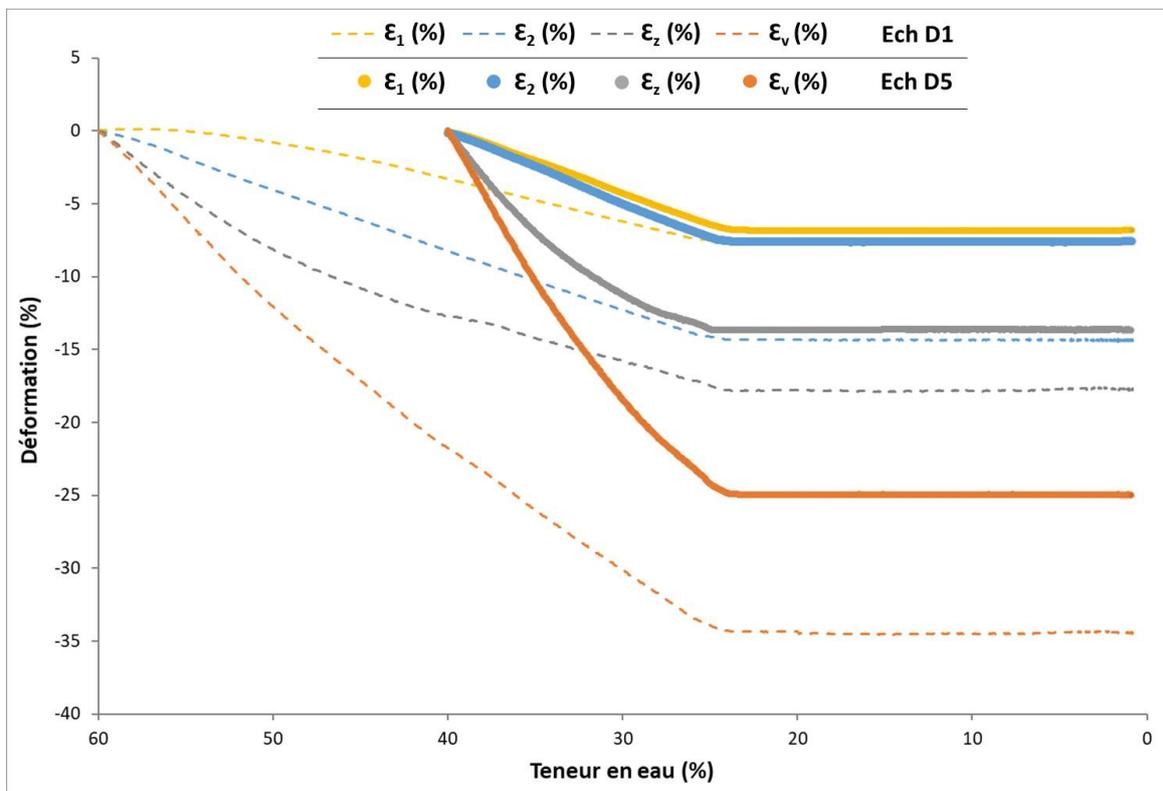


Figure 134: Comparaison entre l'évolution des déformations principales majeures (ϵ_1), principales mineures (ϵ_2) et verticales (ϵ_z) moyennes au cours du séchage dans les échantillons D1 et D5.

Par ailleurs, nous avons effectué une comparaison entre l'évolution de l'indice des vides au cours de la dessiccation dans les échantillons D1 et D5 déterminé à l'aide de la technique DIC, et celui déduit des courbes de rétention du matériau [Indarto, 1991] (Figure 135). On observe que, malgré la différence entre les teneurs en eau initiales des deux échantillons D1 et D5, l'indice des vides évolue de façon similaire pour atteindre une valeur d'environ 0.55 à la fin de la dessiccation. De même, l'indice des vides déterminé à l'aide de la technique DIC montre un bon accord avec celui déduit des courbes de rétention du matériau. Ceci met en évidence le bon ordre de grandeur des mesures de déformations déduites de la technique DIC en cours de dessiccation.

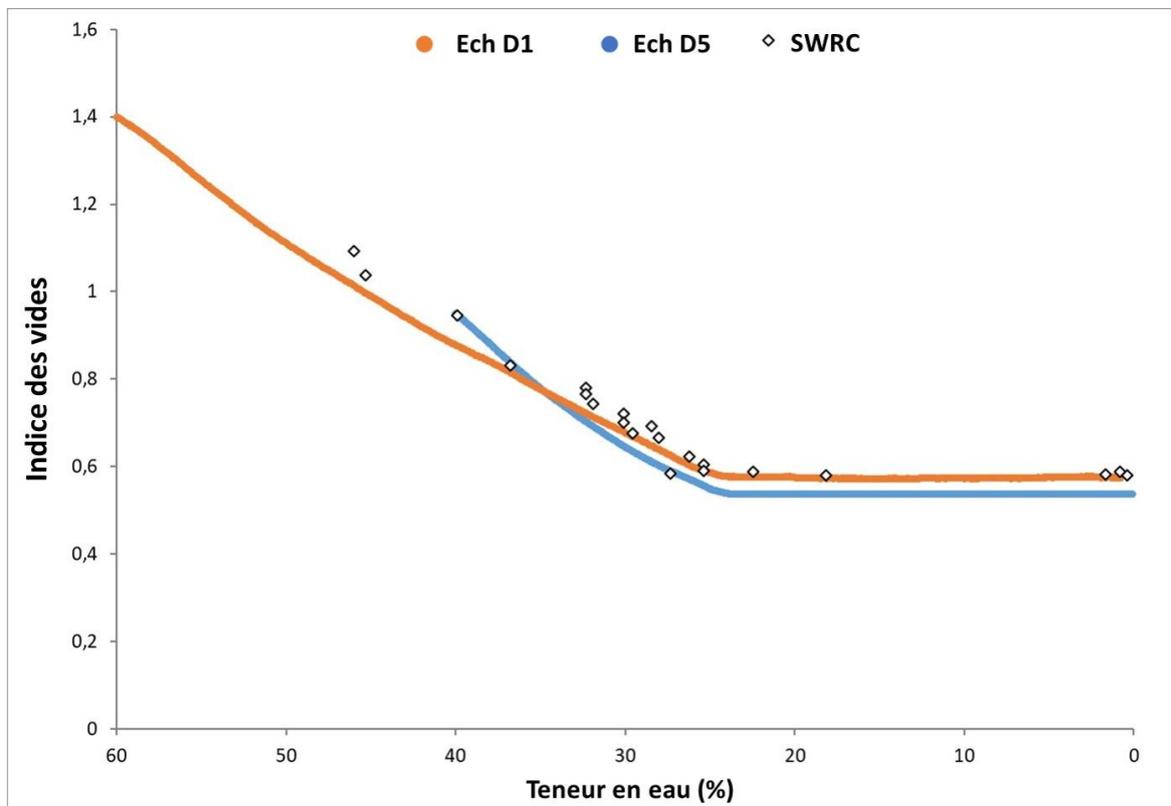


Figure 135: Comparaison entre l'évolution de l'indice des vides dans les échantillons D1 et D5 déterminé à l'aide de la technique DIC, et celui déduit des courbes de rétention du matériau SWRC.

VI.2.5. Corrélation entre les techniques DIC et CRT

Dans le but d'étudier la correspondance entre les déformations déterminées par la technique DIC et celles déterminées par la technique CRT, une comparaison est menée entre l'évolution de la déformation circonférentielle (DIC) dans l'argile (Figure 136(a)) et dans l'anneau métallique (CRT) (Figure 136(b)), en fonction de la teneur en eau de l'échantillon D5. Notons que la déformation circonférentielle dans l'argile correspond à l'évolution de la déformation mesurée au sommet de chacun des cinq pics (Cr1 à Cr5) dans la Figure 133(b).

On observe que ces cinq fissures se produisent à trois instants consécutifs. A l'instant t_1 correspondant à une teneur en eau de 27 %, la déformation dans l'argile commence à se relaxer au niveau de la fissure Cr1. Pendant ce temps, la déformation se relaxe au niveau de la jauge J4 située au côté opposé de la fissure Cr1 (Figure 133(a)), ainsi que la pente de la déformation décroît au niveau de la jauge J2 située juste à côté de cette fissure Cr1. Par contre, les déformations au niveau des jauges J1 et J3 ne montrent aucun effet suite à l'initiation de la fissure Cr1. A l'instant t_2 correspondant à une teneur en eau de 25 %, la déformation se relaxe au niveau des fissures Cr2 et Cr3. Pendant ce temps, les déformations au niveau des jauges J1, J2 et J4 montrent un petit saut. Par la suite, seule la déformation au niveau de la jauge J2 qui se relaxe. A l'instant t_3 correspondant à une teneur en eau de 24.5 %, la déformation dans l'argile se relaxe au niveau des fissures Cr4 et Cr5. Pendant ce temps, la déformation se relaxe dans toutes les jauges en montrant un saut significatif. Ensuite, la déformation se stabilise au niveau des jauges J1, J2 et J4, tandis qu'elle continue à se relaxer dans la jauge J3 éloignée légèrement des fissures observées.

En comparant l'allure générale des déformations circonférentielles (DIC) dans l'argile (Figure 136(a)) et dans l'anneau métallique (CRT) (Figure 136(b)), on remarque que ces déformations évoluent de la même façon. Entre le début de la dessiccation et jusqu'à une teneur en eau de 36 %, ces déformations augmentent légèrement. Ensuite, elles décroissent jusqu'à la fissuration du matériau à des teneurs en eau variantes entre 27 % et 25 %. Une fois la fissuration apparue, ces déformations augmentent simultanément jusqu'à se stabiliser lorsque la propagation de la fissure est achevée.

Ces observations montrent que l'initiation d'une fissure dans l'échantillon du Ring-Test peut avoir une influence sur la déformation de l'anneau métallique au voisinage immédiat de cette fissure, ainsi que dans le côté opposé de l'anneau. De même, on constate que l'initiation d'une seule fissure ne relaxe pas complètement la déformation dans l'anneau métallique : cette déformation se relaxe suite à l'initiation de plusieurs autres fissures et/ou la propagation d'une fissure vers le diamètre extérieur de l'échantillon. La correspondance observée entre les déformations déterminées par la technique DIC et celles déterminées par la technique CRT met en évidence l'intérêt de combiner ces deux techniques afin de permettre une analyse plus fine de la fissuration par dessiccation dans les argiles.

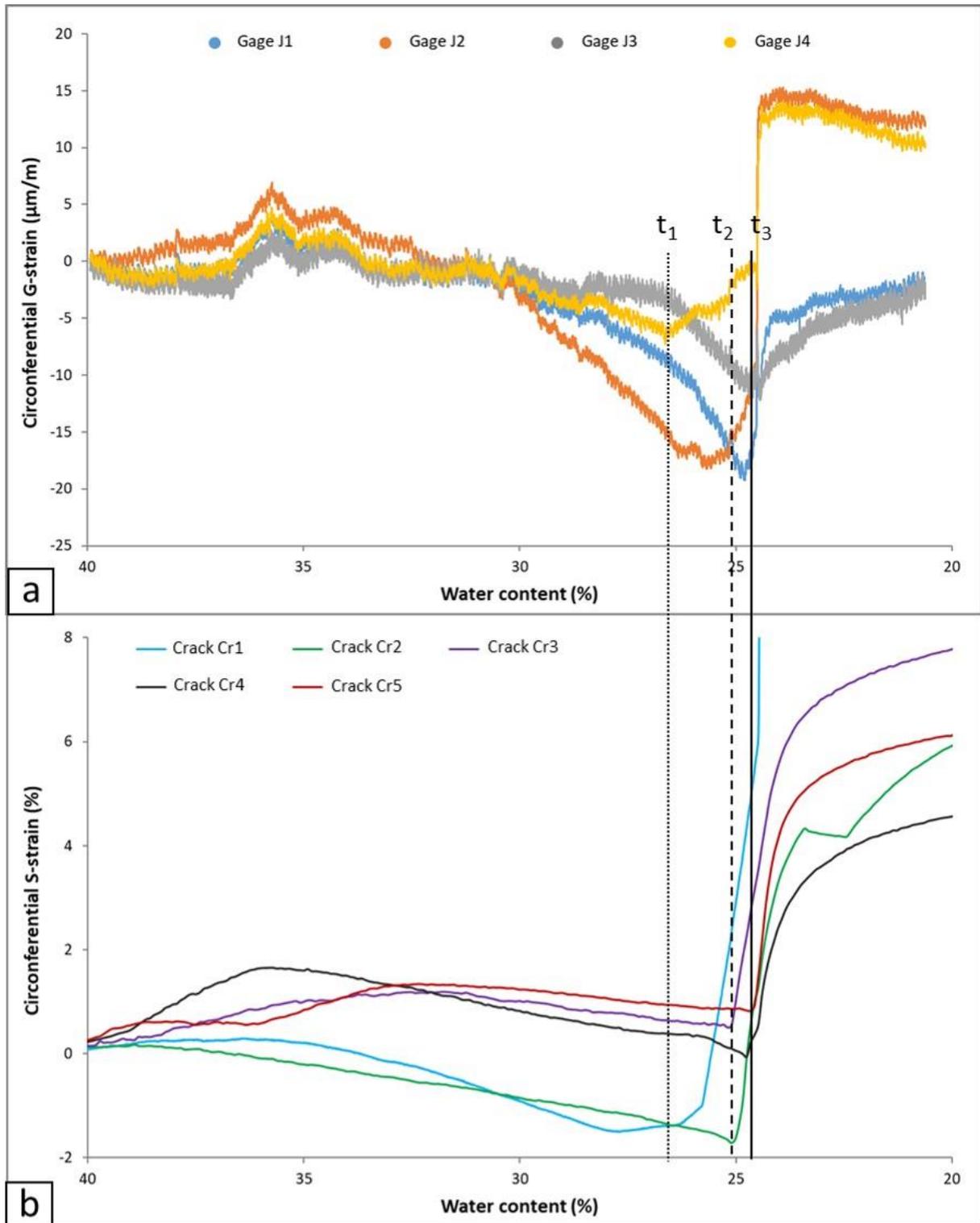


Figure 136: (a) Evolution des déformations circonférentielles mesurées par la technique CRT dans l'échantillon D5.

(b) Evolution des déformations circonférentielles mesurées par la technique DIC dans l'échantillon D5.

Par ailleurs, une comparaison est réalisée pour les déformations circonférentielles maximales déterminées par la technique CRT et par la technique DIC dans les échantillons D1 à D5 (Figure 137). La déformation circonférentielle maximale déterminée par la technique CRT (Max G-strain) représente la déformation maximale mesurée au niveau des quatre jauges d'extensométrie lors de la rupture de l'échantillon (voir Figure 131). La déformation circonférentielle maximale déterminée par la technique DIC (Max S-strain) représente la déformation mesurée au sommet du plus grand pic au voisinage immédiat de l'anneau métallique ($r = 35$ mm) à la fin du processus du séchage (voir Figure 133(b)).

Les déformations mesurées par la technique CRT montrent des valeurs d'environ 20.10^{-4} % ($\pm 5.10^{-4}$ %) dans tous les échantillons, ce qui montre que les conditions aux limites et l'état hydrique initial de l'échantillon n'ont pas un effet significatif sur la déformation du matériau lors de sa fissuration. D'autre part, les déformations mesurées par la technique DIC montrent des valeurs d'environ 30 % dans les échantillons D1, D2, D3 et D4. Ceci montre également que les conditions aux limites n'ont pas un effet significatif sur la déformation résiduelle du matériau (déformation mesurée à la fin du séchage). Par contre, l'échantillon D5 montre une déformation circonférentielle de 62 %, ce qui indique que l'état hydrique initial du matériau a un effet important sur sa déformation résiduelle. Ce constat ne contredit pas le résultat observé dans la Figure 134 qui montre des déformations circonférentielles proches (écart de 10%) dans les échantillons D1 et D5. En effet, les déformations dans la Figure 134 sont des déformations moyennes mesurées sur toute la surface de l'échantillon, alors que les déformations dans la Figure 137 sont des déformations locales mesurées dans le voisinage immédiat de l'interface entre l'argile et l'anneau métallique, dans lequel les fissures s'amorcent.

En conclusion, à l'exception de l'échantillon D5, on observe un bon accord général concernant l'évolution des déformations déterminées par la technique CRT et celles déterminées par la technique DIC.

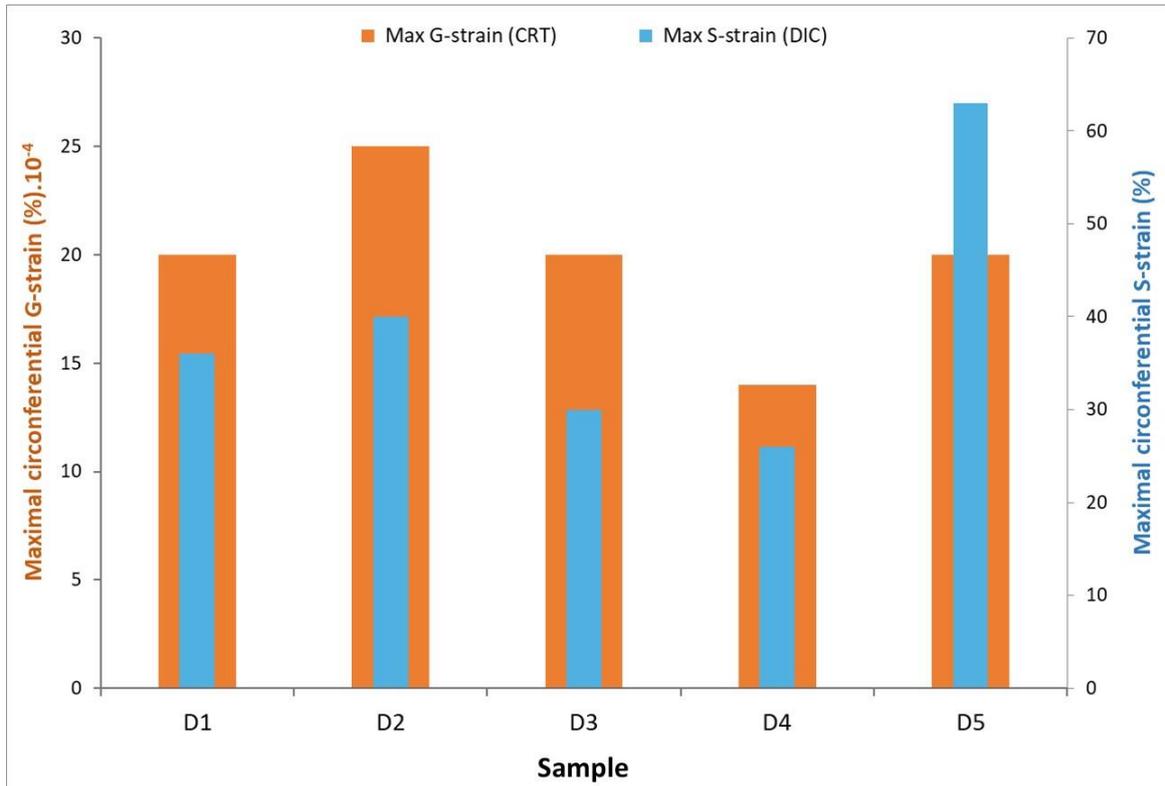


Figure 137: Comparaison entre les déformations circonférentielles maximales déterminées par la technique DIC et celles déterminées par la technique CRT.

VI.3. Effet des renforts sur le retrait et la fissuration des argiles

Dans le but de tenter de minimiser le retrait et la fissuration des argiles par dessiccation, nous avons étudié les effets de renforts insérés dans l'argile. Deux types de renforts sont testés : un treillis en acier inoxydable et des fibres végétales de lin. Ainsi, une deuxième série d'essais de retrait empêché à l'aide de la technique DIC-CRT est réalisée sur la kaolinite P300. La Figure 138 présente un organigramme décrivant les différents paramètres étudiés dans cette série d'essais. Les essais de référence restent ceux de kaolinite sans renforts, représentés par les échantillons D1 et D2.

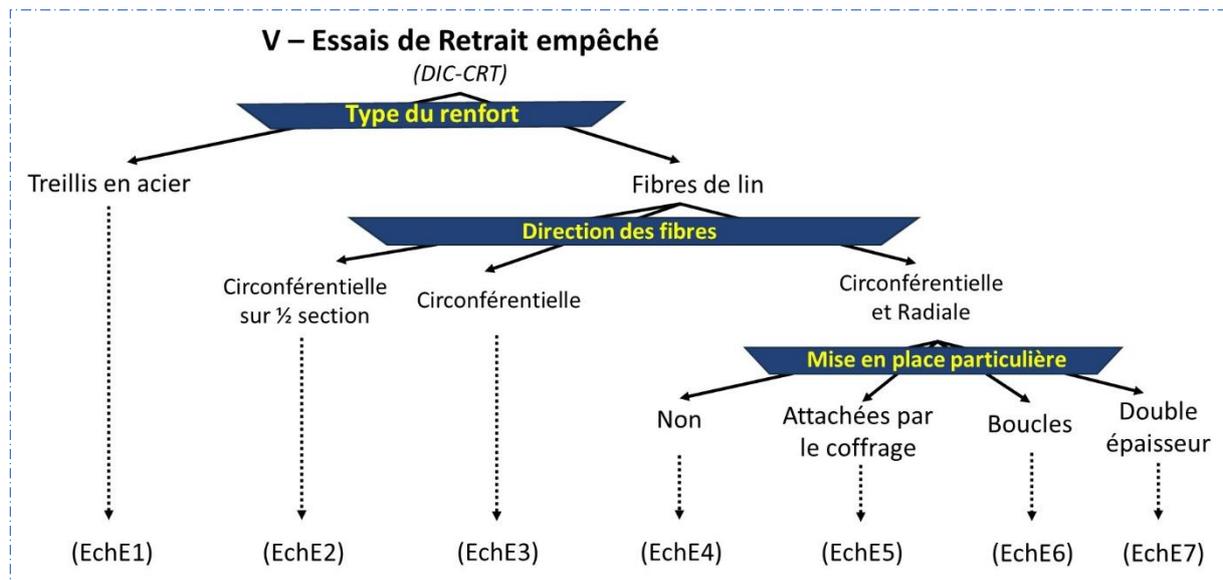


Figure 138: Essais de retrait empêché traitant l'effet du renfort par treillis en acier et par fibres de lin.

VI.3.1. Matériaux des renforts

VI.3.1.1. Treillis en acier

Le renfort en acier inoxydable de 1 mm d'épaisseur est composé de mailles carrées de 6 mm de côté. Sa masse volumique est égale à 8 g/cm³ et son module d'élasticité est de 200 GPa. Une photo de ce treillis est présentée dans le Tableau 13 (échantillon E1).

VI.3.1.2. Fibres végétales

Les fibres végétales utilisées sont des fibres de lin naturelles de la région de Normandie (France). Ces fibres se présentent sous la forme d'un fil tissé ayant une masse volumique de 1.4 g/cm³ et une épaisseur de 1.2 mm. Les fibres de lin sont riches en cellulose, soit plus de 60 % de leur constitution, ce qui leur confère de bonnes propriétés de résistance à la traction [Page,

2017]. Des photos de ces fibres sont présentées dans le Tableau 13 (échantillons E2 à E7). Leurs propriétés mécaniques sont résumées dans le Tableau 12 :

ρ (g/cm ³)	E (GPa)	ε_u (%)	σ_u (MPa)
1.4	40 - 85	2.4 - 3.3	800 - 2000

Tableau 12: Propriétés mécaniques des fibres végétales de lin [Eid, 2015].

VI.3.2. Protocole de mise en œuvre

Le Tableau 13 présente la densité et l'orientation des renforts insérés dans l'argile. L'effet du renforcement de l'argile est étudié suivant différents pourcentages et orientations (Tableau 13). Les photos de la colonne de droite sont prises après avoir coulé la kaolinite jusqu'à la moitié de son épaisseur, comme le montre la Figure 117(S2). Dans l'échantillon E1, le treillis en acier inoxydable est incorporée dans l'argile en laissant une distance de 0.5 cm entre les bords du treillis et les bords intérieur et extérieur de l'échantillon. La section de l'acier dans ce treillis représente 10 % de la section totale de l'échantillon. Dans les échantillons E2 et E3, les fibres de lin sont incorporées dans la direction de la circonférence seulement, respectivement sur la moitié de la section et sur toute la section. Une distance de 0.5 cm est également maintenue entre les fibres et les bords intérieur et extérieur de l'échantillon. De même, les rangs des fibres sont espacés de 1 cm dans les directions circonférentielle et radiale. Dans les échantillons E4, E5, E6 et E7, les fibres de lin sont incorporées à la fois dans les directions circonférentielle et radiale. En outre, les fibres radiales dans l'échantillon E5 sont fixées au le coffrage extérieur de l'échantillon, dans le but de s'opposer au retrait radial centripète de l'argile lors de la dessiccation. Dans l'échantillon E6, les fibres présentent des nœuds espacés de 1 cm, destinées à améliorer l'adhérence entre les fibres et la pâte d'argile. De même, dans l'échantillon E7, les fibres de lin sont entrelacées de manière à doubler leur diamètre (passant de 1.2 à 2.4 mm) afin d'améliorer leur résistance mécanique.

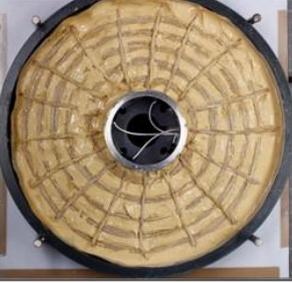
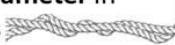
Sample	Description	Reinforcement amount	Photo
E1	Stainless steel mesh	10 %	
E2	Flax fibers in circumferential direction over half cross-section	5 %	
E3	Flax fibers in circumferential direction over entire cross-section	10 %	
E4	Flax fibers in circumferential and radial directions	15 %	
E5	Flax fibers in circumferential and radial directions tied by the formwork	15 %	
E6	Flax fibers in circumferential and radial directions with loops 	20 %	
E7	Flax fibers having a double diameter in circumferential and radial directions 	30 %	

Tableau 13: Description des échantillons renforcés.

VI.3.3. Cinétique de séchage

La Figure 139 présente l'évolution de la teneur en eau globale dans les échantillons D1, D2 (essais de référence sans renforts) ainsi que les échantillons E1 à E7 au cours de la dessiccation. Pendant la phase initiale de séchage, tous ces échantillons montrent un comportement hydrique similaire, avec une cinétique de séchage variant entre -8 %/jour et -9 %/jour. De même, à la fin de la dessiccation, ces échantillons atteignent une même teneur en eau résiduelle d'environ 1% après 10 jours de séchage. A l'exception de l'échantillon E1 qui s'est fissuré très tôt à une teneur en eau de 52%, la première fissure est apparue dans les autres échantillons à des teneurs en eau variant entre 24.5 % et 27 %, correspondant à des succions allant de 1800 à 1000 kPa.

Ainsi, on peut constater que la variation de la teneur en eau et l'initiation de la première fissure sont similaires pour ces échantillons, à l'exception de l'échantillon E1. La fissuration de l'échantillon E1 (voir Annexe 4 (Figure A4.1)) à une teneur en eau très humide est due probablement à la densité des mailles du treillis en acier et aux frottements engendrés par chaque maille empêchant le retrait local de l'argile.

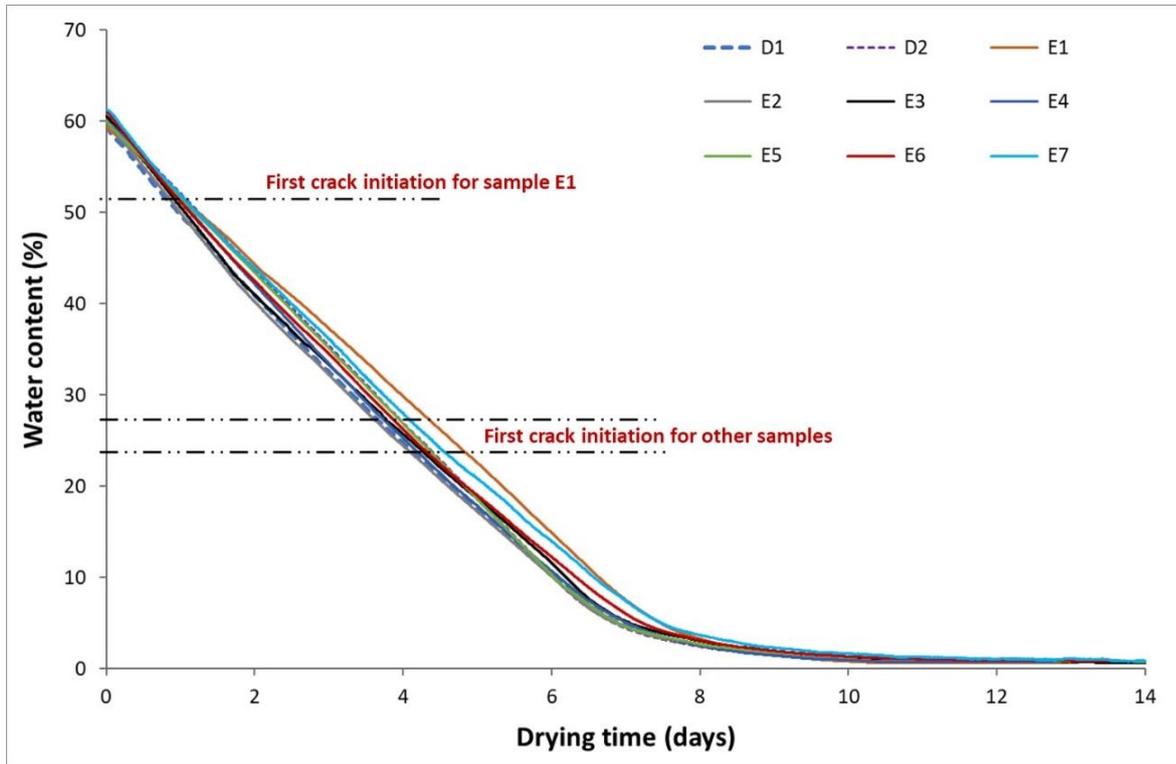


Figure 139: Evolution de la teneur en eau des échantillons avec et sans renforts au cours du séchage.

VI.3.4. Déformations mesurées par la technique CRT

Les Figure 140(a) et Figure 140(b) montrent l'évolution de la déformation circonférentielle de l'anneau métallique (G-strain) en fonction du temps de séchage pour l'échantillon E7 pris comme exemple. Cette évolution comporte quatre phases notées A à D.

La Figure 140(a) présente la phase A, une étape préliminaire qui consiste à couler la boue d'argile dans le moule du dispositif. Une valeur de déformation négative d'environ $-10 \mu\text{m/m}$ est observée pendant les 10 premières minutes, correspondant à la réponse des jauges à la mise en œuvre de l'argile.

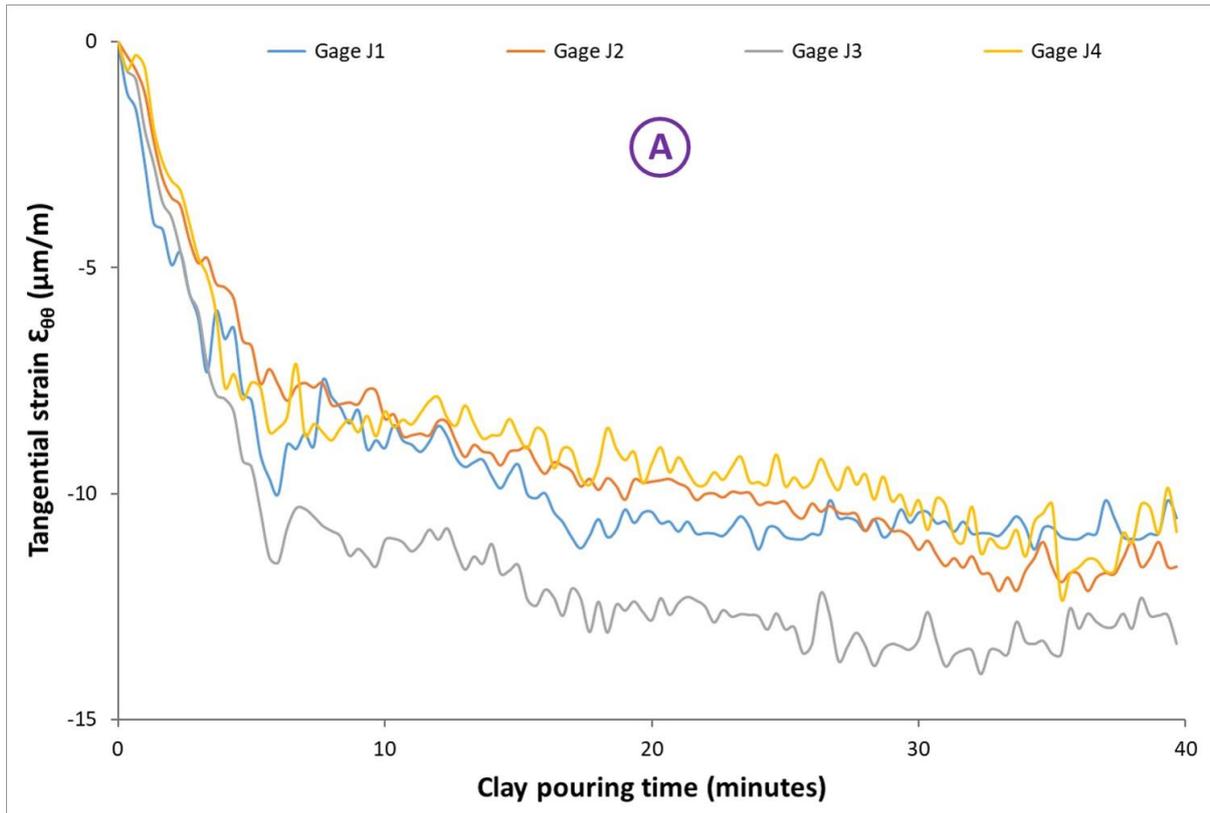


Figure 140(a): Déformations de l'anneau métallique dans l'échantillon E7 pendant la mise en œuvre de l'argile.

La Figure 140(b) présente l'évolution des déformations circonférentielles dans l'anneau métallique pendant le séchage après la phase A. Durant la phase B (0 à 2.5 jours), les jauges d'extensométrie montrent une remise à zéro de la déformation circonférentielle. Ceci est dû à la décompression de l'anneau métallique qui s'est produite suite à une légère expansion de la boue argileuse après le décoffrage. Dans la phase C, la déformation décroît et présente deux sous-phases. Pendant la sous-phase C1, le retrait augmente et l'anneau métallique se déforme rapidement avec une pente égale à $-5 \mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$ jusqu'à un temps de séchage de 3.5 jours. Ensuite, la pente de la déformation s'accélère jusqu'à $-20 \mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$ durant la sous-phase C2 jusqu'à la fissuration de l'échantillon pour une déformation circonférentielle maximale d'environ $-20 \mu\text{m}/\text{m}$. Après la fissuration, l'anneau métallique se déforme dans le sens opposé (se détend) avec une pente égale à $5 \mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$ (phase D). Ceci peut être attribué à la formation de fissures qui ont relâché la compression de l'anneau.

La différence observée dans le comportement des échantillons D1 et D2 (Figure 120) d'une part, et l'échantillon E7 d'autre part, pendant la première phase de séchage (phase B) indique que cette phase est influencée par les perturbations de mise en œuvre de l'argile, qui peut se différer d'un essai à un autre. Néanmoins, comme la succion est très faible durant cette première phase, les déformations subies par les jauges ne sont pas prises en compte durant cette phase

pour l'interprétation de l'essai. Par conséquent, la déformation CRT maximale d'un échantillon représente la différence entre la déformation mesurée lors de la fissuration de l'échantillon et celle mesurée au début de la deuxième phase de séchage qui correspond à la phase C dans le cas de l'échantillon E7.

Notons que la déformation CRT maximale (en valeur absolue) obtenue pour toute cette série d'essais, y compris les deux essais de référence, varie entre 20 et 25 $\mu\text{m}/\text{m}$. Ceci indique que les renforts n'ont pas une influence significative sur l'état de déformation de l'argile lors de l'initiation de la première fissure dans l'échantillon.

L'évolution de la succion déduite des courbes de rétention du matériau, à partir des teneurs en eau moyennes mesurées durant la dessiccation, est également représentée dans la Figure 140(b). On constate un bon accord entre l'augmentation de la succion et la diminution de la déformation durant les deux sous-phases C1 et C2 jusqu'à la fissuration à 4.3 jours pour une succion d'environ 1500 kPa. Cette correspondance entre la succion dans l'argile et la déformation circonférentielle dans l'anneau métallique, observée dans la totalité des échantillons étudiés, mais également dans les échantillons D1 (Figure 120(a)), D2 (Figure 120(b)) et D5 (Figure 131), met en évidence l'influence directe de la succion sur les déformations de retrait de l'argile.

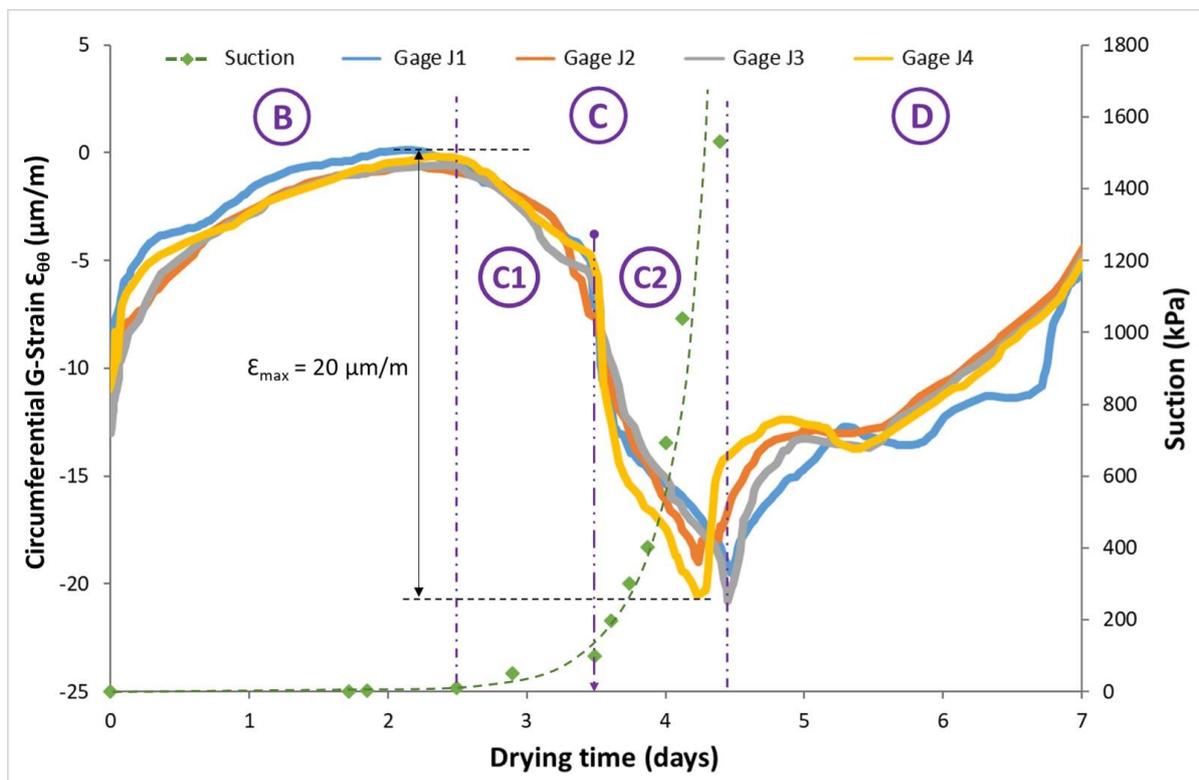


Figure 140(b): Déformations de l'anneau métallique dans l'échantillon E7 pendant le séchage. Comparaison avec l'évolution de la succion dans l'échantillon.

VI.3.5. Analyse du retrait et de la fissuration

La Figure 141 présente le schéma de la localisation des fissures dans l'échantillon E7 à la fin du processus de séchage. On observe la présence de cinq fissures (Cr1 à Cr5) partant de l'interface anneau métallique-argile. Rappelons que les fissures dans l'échantillon sont numérotées par ordre chronologique d'apparition. On remarque que le rayon de l'échantillon a subi un retrait d'environ 1 cm (± 0.15 cm dans les autres échantillons). La rupture de l'échantillon correspond à la propagation de la fissure jusqu'à atteindre la circonférence externe de l'échantillon (fissure Cr4), ce qui entraîne un relâchement de la compression de l'anneau (fin de la phase D dans la Figure 140(b)). L'ordre d'apparition des fissures montre que la première fissure n'est pas nécessairement celle qui conduit à la rupture de l'échantillon.

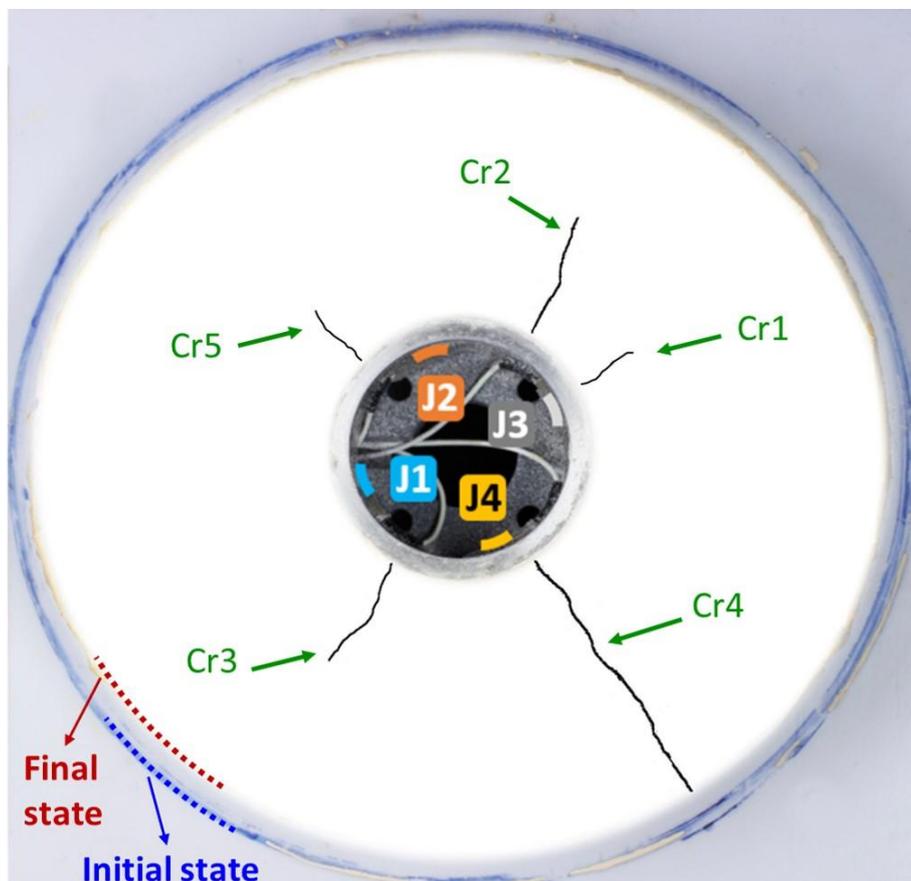


Figure 141: Schéma des fissures à la fin du processus de séchage. Exemple du cas de l'échantillon E7.

Afin d'étudier l'effet des renforts sur le retrait et la fissuration des échantillons E1 à E7, une comparaison est effectuée avec les échantillons sans renforts D1 et D2, via deux paramètres : la densité de retrait global et la densité de fissuration, à la fin du processus de séchage (Figure 142).

On remarque que la densité de retrait global s'est limitée à 20 % dans l'échantillon E1 (treillis en acier), alors qu'elle varie entre 23 % et 27 % dans les autres échantillons, avec une valeur moyenne d'environ 25 %, quelles que soient le pourcentage et l'orientation des fibres de lin ajoutées. Ces observations confirment que le renfort par treillis rigide (acier inoxydable) permet de réduire le retrait global de l'argile, alors que les renforts en fibres de lin n'ont pas un effet significatif sur le retrait global.

En revanche, on observe dans les échantillons D1 et D2 une densité de fissuration d'environ 0.8%. Cette densité augmente à 4 % dans l'échantillon E1, par contre elle subit une baisse significative dans les autres échantillons renforcés avec les fibres végétales, quel que soit leur orientation. Dans l'échantillon E7, comportant un pourcentage de 30 % de fibres, la densité de fissuration atteint une valeur minimale d'environ 0.2 %. L'augmentation de la densité de fissuration lors du renfort avec un treillis en acier confirme l'idée que le renfort de type rigide avec des mailles de petites dimensions (serrées) génère des frottements empêchant le retrait local de l'argile (au niveau de chaque maille). Par contre, la baisse significative de la densité de fissuration en fonction du pourcentage de fibres végétales dans les échantillons E2 à E7 met en évidence l'effet positif du renforcement du sol par les fibres de lin. En effet, ce renfort de type flexible se déforme avec l'argile lors des déformations de retrait (déformations de type compression), par contre il limite l'ouverture de la fissure partant de l'interface anneau métallique-argile en reprenant une partie des contraintes de traction appliquées par l'anneau métallique sur la matrice argileuse, à travers le frottement sol/fibres. Par conséquent, un pourcentage important des fibres de lin (dans les limites testées dans le cadre de ces travaux) dans le matériau argileux permet d'avoir une meilleure répartition des contraintes dans l'échantillon, ce qui réduit le risque de fissuration suite aux concentrations des contraintes mécaniques [Kouta, 2020]. Il nous semble donc que l'efficacité du renforcement du sol est liée à la flexibilité de celui-ci, de manière à ne pas empêcher le retrait du sol pendant la dessiccation.

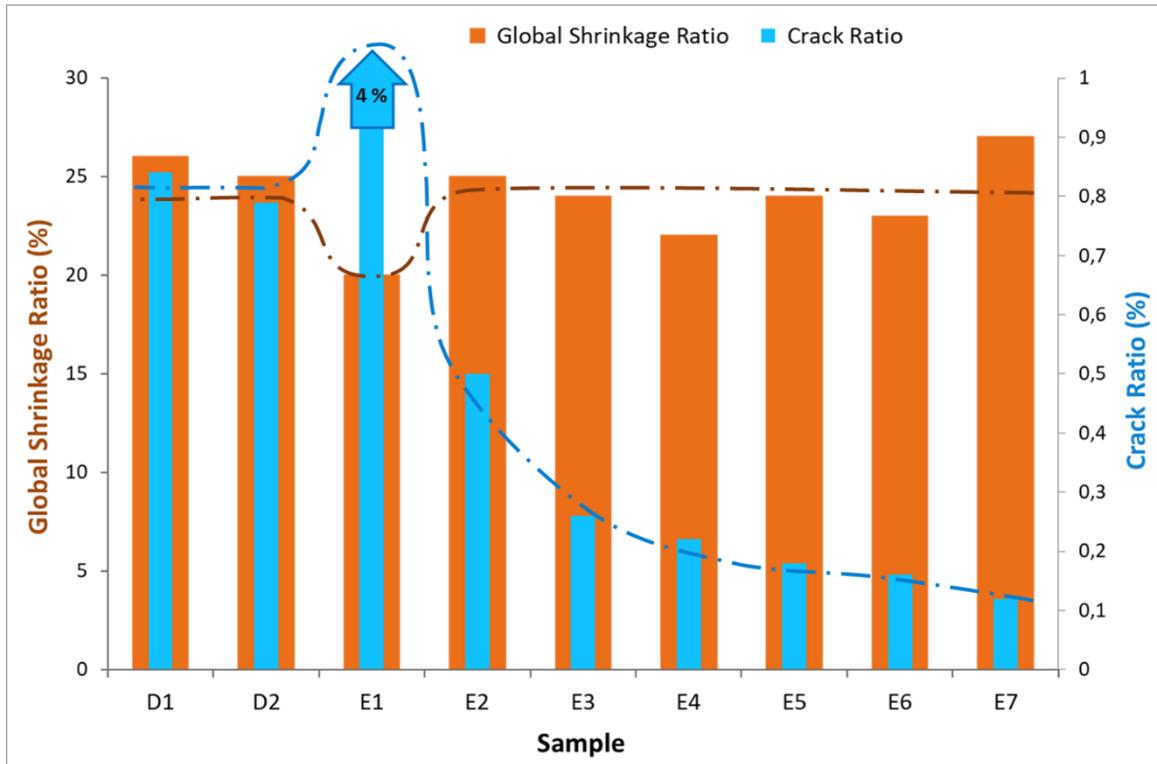


Figure 142: Densité de retrait global et densité de fissuration des échantillons étudiés à la fin de la dessiccation.

VI.3.6. Déformations mesurées par la technique DIC

Pour permettre une analyse plus fine de la répartition des déformations circonférentielles à l'origine de la fissuration du matériau, ces déformations sont illustrées à la fin de la dessiccation, au voisinage immédiat de l'anneau métallique ($r = 35$ mm), en fonction de l'angle θ du contour de l'échantillon (Figure 143(a)).

Les échantillons sans renfort (D1 et D2) montrent des pics importants avec des déformations circonférentielles avoisinant 40 %. En revanche, l'échantillon E1 renforcé avec un treillis en acier, ainsi que l'échantillon E2 renforcé avec des fibres de lin sur une demi-section seulement, ont montré des pics moins intenses variant entre 5 % et 20 %. Pour les échantillons renforcés avec des fibres de lin sur toute la section transversale (E3 à E7), les déformations circonférentielles sont très faibles et varient de 0 % à 2 %. La réduction significative de l'intensité des fissures (matérialisée par la déformation circonférentielle maximale mesurée au voisinage immédiat de l'anneau métallique) en fonction du pourcentage de renfort met en évidence l'effet positif des fibres de lin sur la réduction des déformations principales majeures (circonférentielles) provoquant la fissuration du matériau (Figure 143(b)). Ceci indique qu'en réduisant l'intensité de fissuration, les renforts à l'aide de fibres de lin rendent la fissuration du sol faible et donc moins préjudiciable pour le matériau.

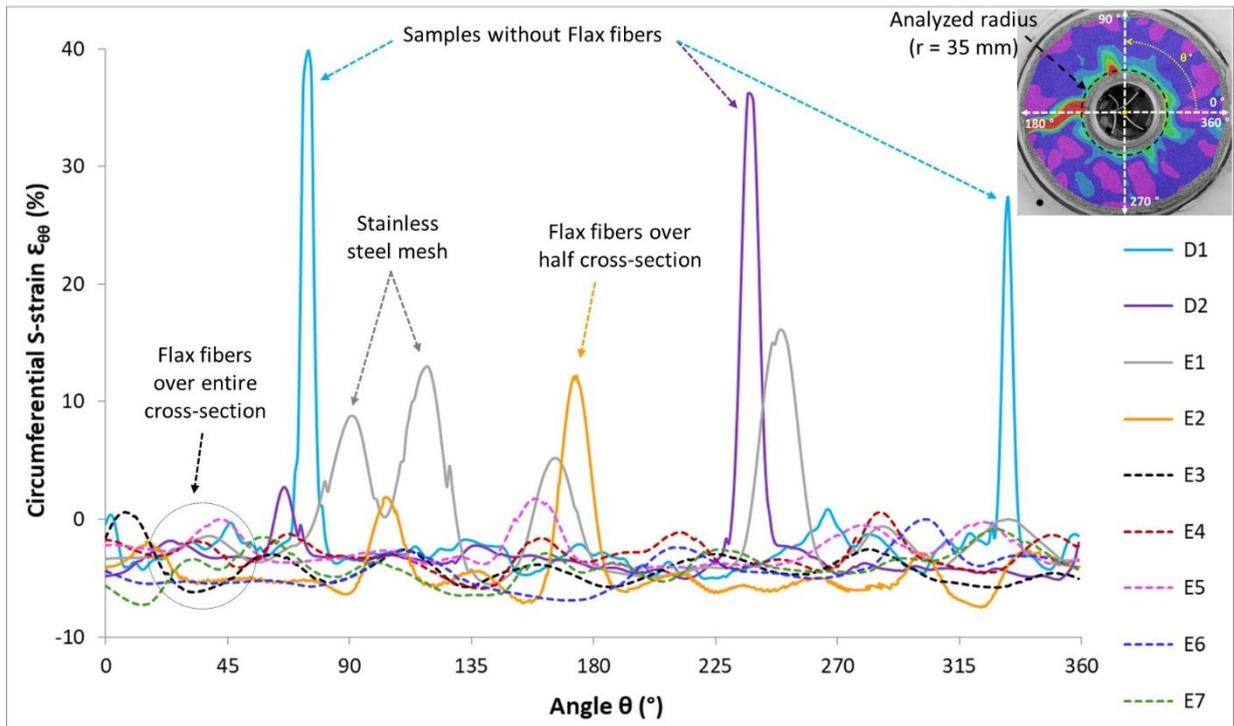


Figure 143(a): Évolution des déformations circonférentielles à la fin de la dessiccation, au voisinage immédiat de l'anneau métallique, en fonction de l'angle θ du contour de l'échantillon.

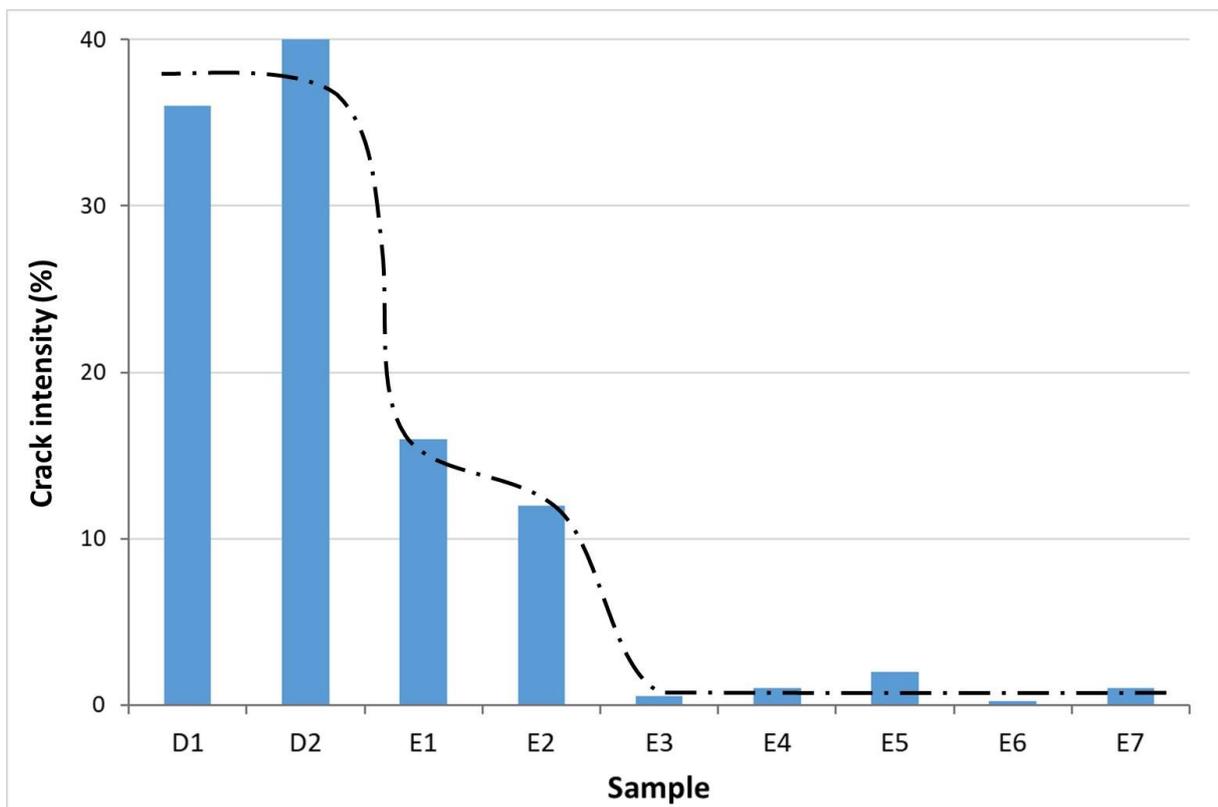


Figure 143(b): Variation de l'intensité des fissures à l'interface avec l'anneau métallique.

Par ailleurs, nous avons étudié, à l'aide de l'analyse DIC, l'influence de la répartition des fibres végétales dans l'échantillon sur l'évolution des différentes composantes de déformation au bord et au milieu de l'échantillon d'argile. La Figure 144(a) présente une vue de dessus de l'échantillon E2 à l'état final du séchage (après l'enlèvement des mouchetis). Rappelons que les fibres dans cet échantillon sont incorporées sur la moitié de la section transversale. On observe la présence de quatre fissures (Cr1 à Cr4) dans cet échantillon, dont une seule (fissure Cr3) s'est propagée vers le bord extérieur de l'échantillon. De même, on remarque que la fissure Cr1 se situe dans la zone renforcée, la fissure Cr3 se situe à l'interface entre la zone renforcée et celle non renforcée, tandis que les deux autres fissures (Cr2 et Cr4) se situent dans la zone non renforcée. En se focalisant sur la fissure Cr3, on observe qu'elle avait subi une bifurcation, lors de sa propagation, vers la zone non renforcée.

Les Figure 144(b) et Figure 144(c) montrent l'évolution des déformations de cisaillement ($\epsilon_{r\theta}$), circonférentielles ($\epsilon_{\theta\theta}$), principales majeures (ϵ_1), radiales (ϵ_{rr}), principales mineures (ϵ_2) et verticales (ϵ_{zz}) en fonction de l'angle θ du contour de l'échantillon E2. Ces déformations sont mesurées dans le voisinage immédiat de l'anneau métallique à $r = 35$ mm (Figure 144(b)), ainsi qu'au milieu de l'anneau en argile à $r = 60$ mm (Figure 144(c)).

On remarque qu'au voisinage immédiat de l'anneau métallique, les déformations principales majeures sont parfaitement superposées avec les déformations circonférentielles, alors qu'au milieu de l'anneau en argile ces deux déformations sont légèrement écartées. Ceci est également observé au niveau des déformations principales mineures d'une part et des déformations radiales d'autre part.

En outre, la présence des pics de déformations circonférentielles au niveau de toutes les fissures montre que ces déformations sont à l'origine de la fissuration de l'échantillon. Ceci confirme que la fissuration dans le Ring-Test se produit généralement selon le mode d'ouverture (mode I), autrement dit, une rupture par traction. Par contre, les déformations radiales et verticales ne montrent pas un effet significatif sur ces fissures. Au niveau de la fissure Cr3, on observe un pic de déformation de cisaillement au voisinage immédiat de l'anneau métallique ; ce pic devient plus intense au milieu de l'anneau en argile. Cette observation indique que la bifurcation de cette fissure peut être due à des contraintes de cisaillement engendrées dans le matériau. La combinaison des pics de déformation de cisaillement et circonférentielle au milieu de l'anneau en argile montre que la propagation de la fissure Cr3 s'est produite probablement selon un mode mixte d'ouverture/glisement (modes I et II).

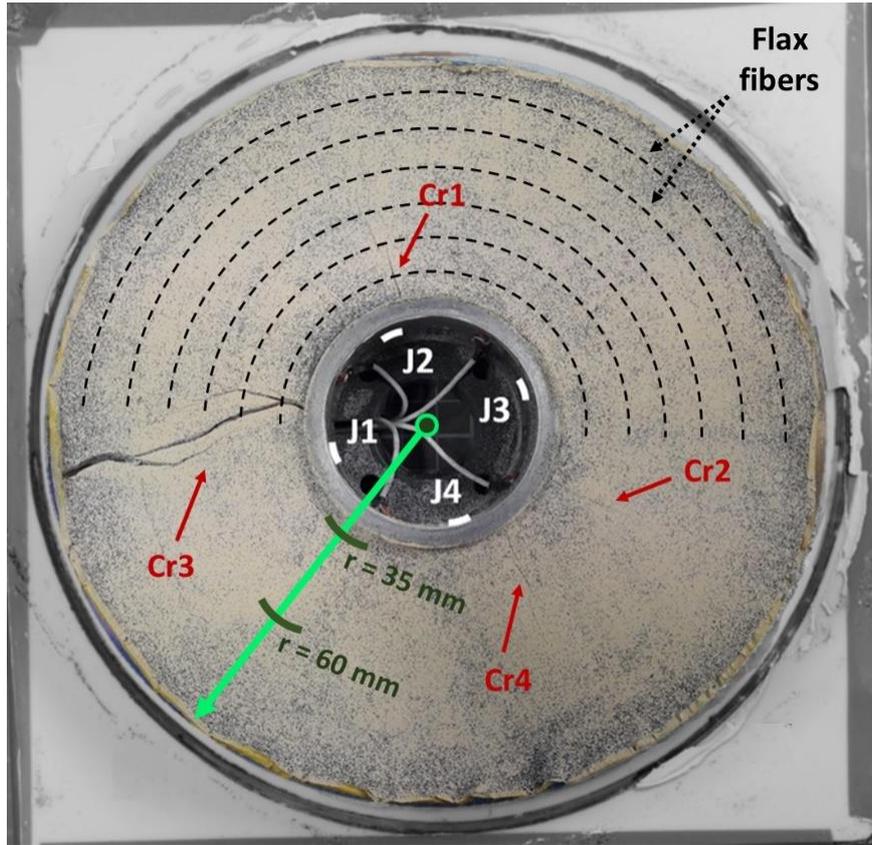


Figure 144(a): Vue de dessus de l'échantillon E2 à l'état final.

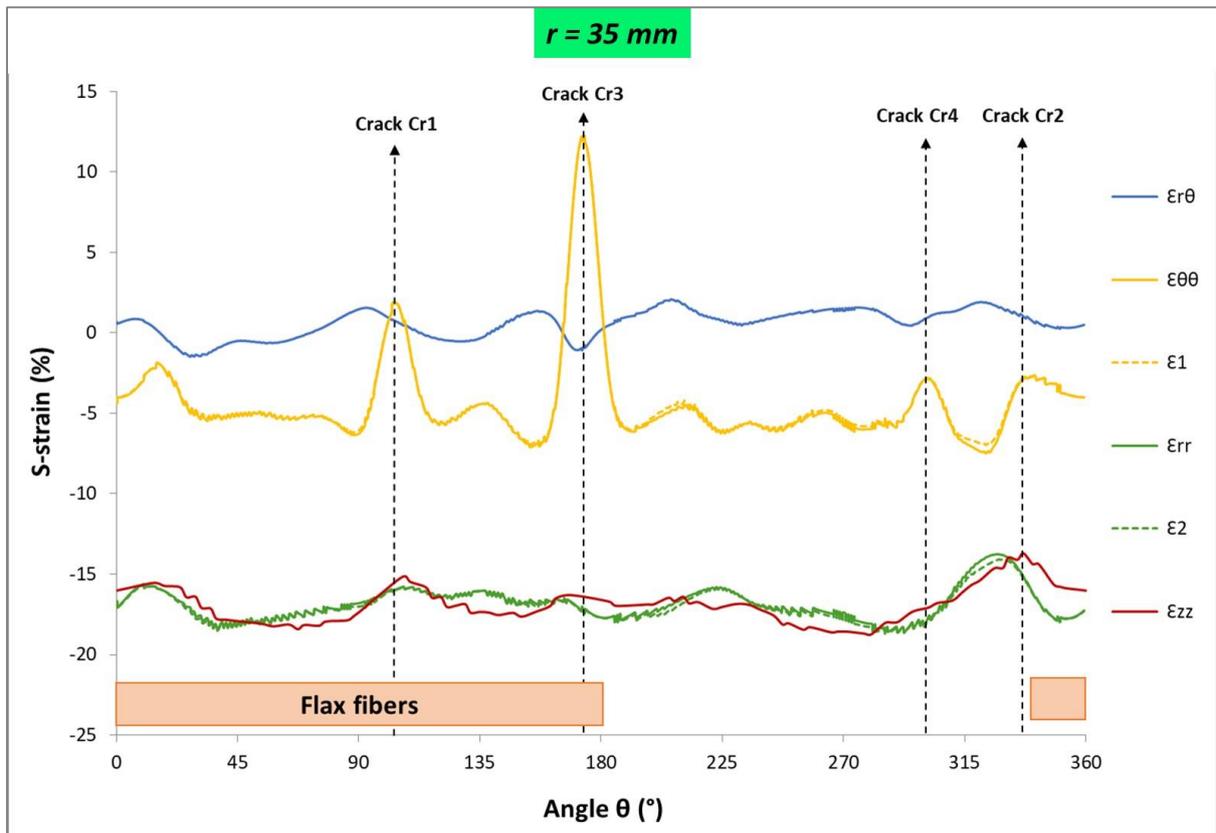


Figure 144(b): Evolution des déformations de cisaillement ($\epsilon_{r\theta}$), circonférentielles ($\epsilon_{\theta\theta}$), principales majeures (ϵ_1), radiales (ϵ_{rr}), principales mineures (ϵ_2) et verticales (ϵ_{zz}) à la fin de la dessiccation au voisinage immédiat de l'anneau métallique ($r = 35 \text{ mm}$) en fonction de l'angle θ du contour de l'échantillon E2.

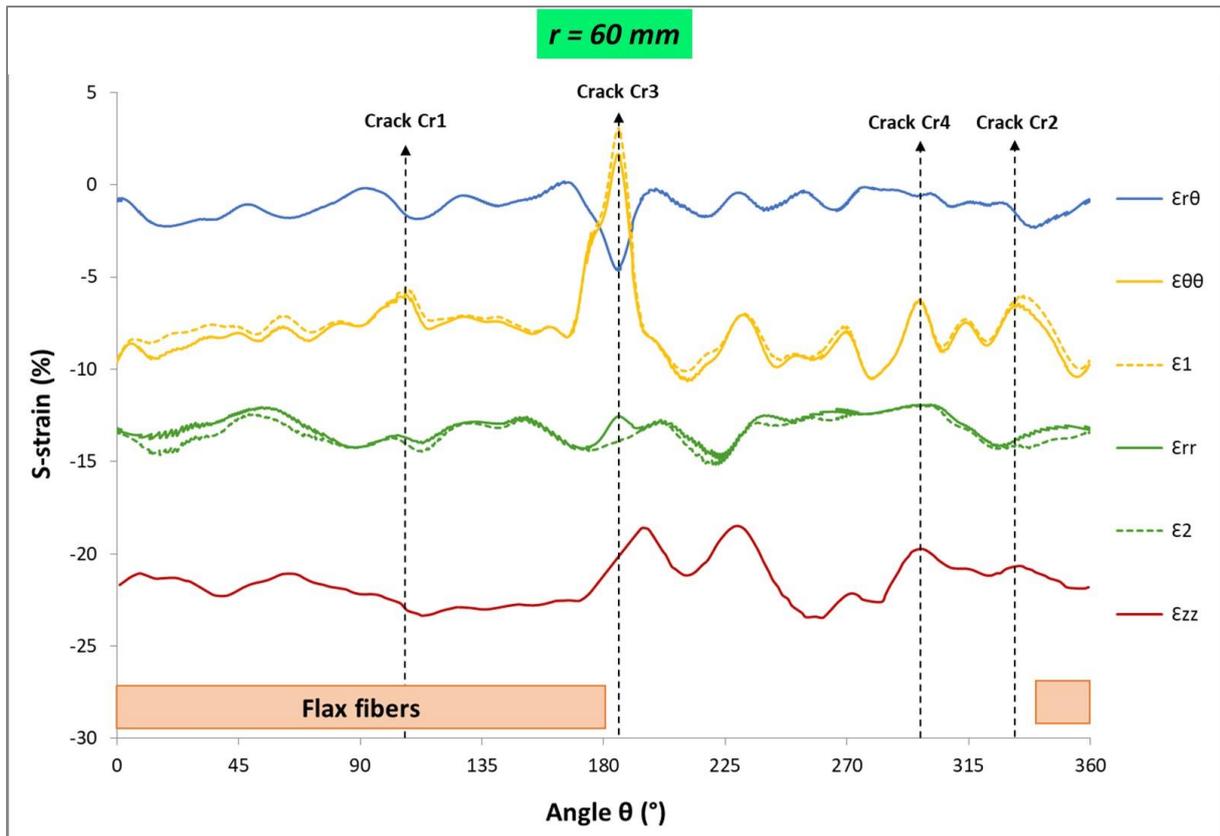


Figure 144(c): Evolution des déformations de cisaillement ($\epsilon_{r\theta}$), circonférentielles ($\epsilon_{\theta\theta}$), principales majeures (ϵ_1), radiales (ϵ_{rr}), principales mineures (ϵ_2) et verticales (ϵ_{zz}) à la fin de la dessiccation au milieu de l'anneau en argile ($r = 60 \text{ mm}$) en fonction de l'angle θ du contour de l'échantillon E2.

VI.3.7. Corrélation entre les techniques DIC et CRT

Nous analysons à présent la réponse simultanée des techniques DIC et CRT durant la dessiccation des argiles renforcées. L'évolution de la déformation circonférentielle en fonction de la teneur en eau est présentée dans la Figure 145, dans laquelle sont comparés les résultats obtenus à l'aide des deux techniques - DIC (photo a) et CRT (photo b) - pour l'échantillon de référence D1 (sans renforts).

La valeur maximale de la déformation circonférentielle obtenue à l'aide de la technique DIC est indiquée dans la Figure 145(a). Cette déformation décroît légèrement au début du processus de séchage jusqu'à la fissuration de l'échantillon à une teneur en eau de 25.5 %. Ensuite, elle augmente rapidement avec l'ouverture de la fissure jusqu'à ce qu'elle se stabilise à une valeur maximale de 36 %, correspondant à une teneur en eau d'environ 22 %. La pente de la variation de déformation circonférentielle DIC en fonction de la teneur en eau (DIC Slope sur la Figure 145(a)) est définie par sa valeur maximale pendant la fissuration du matériau, au voisinage immédiat de l'anneau métallique ($r = 35 \text{ mm}$).

La Figure 145(b) montre l'évolution de la déformation circonférentielle obtenue à l'aide de la technique CRT (jauge J4) en fonction de la teneur en eau de l'échantillon. Cette déformation décroît légèrement au début du processus de séchage jusqu'à la fissuration de l'échantillon à une teneur en eau de 25.5 %. Ensuite, elle augmente rapidement avec l'ouverture de la fissure jusqu'à ce qu'elle se stabilise à une valeur maximale d'environ 5 $\mu\text{m}/\text{m}$, correspondant à une teneur en eau de 22 %. La pente de la variation de déformation circonférentielle CRT en fonction de la teneur en eau (CRT slope sur la Figure 145(b)) est définie par sa valeur maximale pendant la fissuration du matériau, sur la circonférence interne de l'anneau métallique ($r = 25 \text{ mm}$).

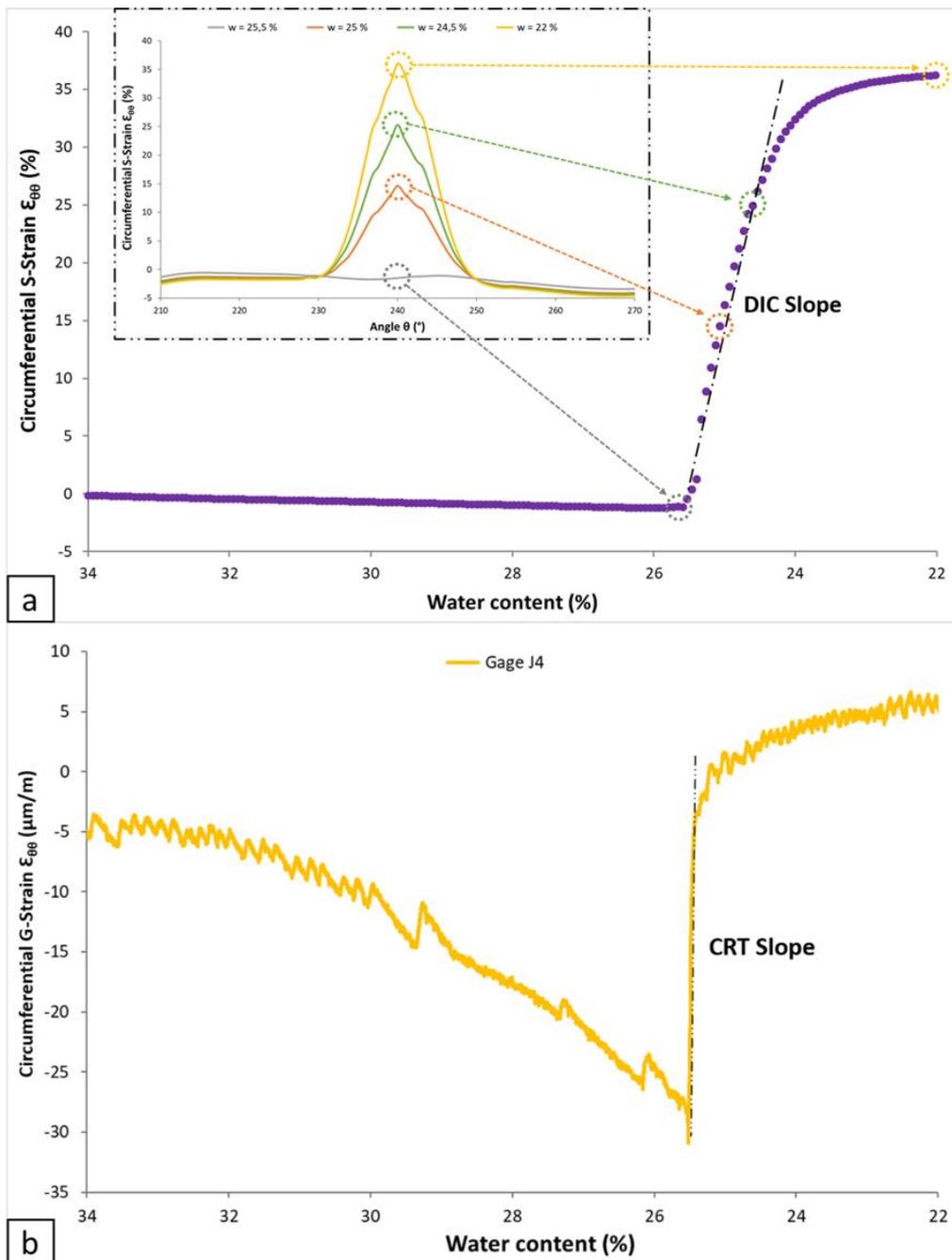


Figure 145: (a) Évolution de la déformation circonférentielle maximale (DIC) dans l'Ech D1 en fonction de la teneur en eau. (b) Évolution de la déformation circonférentielle dans la jauge J4 (CRT) dans l'Ech D1 en fonction de la teneur en eau.

La Figure 146 présente une comparaison entre la pente de la déformation DIC et la pente de la déformation CRT pour l'ensemble des échantillons avec et sans renforts. Nous observons un bon accord de l'évolution des pentes déterminées par les deux techniques, DIC et CRT. Les échantillons D1 et D2, sans renfort, montrent une pente DIC d'environ 22 %/% et une pente CRT d'environ $130 \cdot 10^{-4}$ %/%. Ces deux pentes diminuent en fonction du pourcentage de fibres de lin incorporées jusqu'à atteindre 1 %/% pour la pente DIC et $3 \cdot 10^{-4}$ %/% pour la pente CRT, dans les échantillons E6 et E7. Cependant, l'écart important observé dans l'échantillon E1 entre les pentes DIC et CRT est due à la présence de nombreuses fissures qui se sont propagées simultanément vers le bord extérieur de l'échantillon, ce qui a permis de répartir les sollicitations. Ce résultat met également en évidence l'effet du renforcement du sol par des fibres végétales sur la cinétique d'ouverture des fissures. En effet, le renfort permet de ralentir l'ouverture de la fissure partant de l'interface anneau métallique-argile, à travers le frottement sol/fibres.

De plus, la présence de boucles dans l'échantillon E6 et de fibres entrelacées dans l'échantillon E7, qui ont pour but d'améliorer le frottement sol/fibres, semble réduire les pentes de la déformation DIC et de la déformation CRT. Par conséquent, on peut constater que ces deux paramètres « DIC slope » et « CRT slope » sont pertinents pour caractériser l'effet des renforts sur la fissuration de l'argile dans le dispositif DIC-CRT.

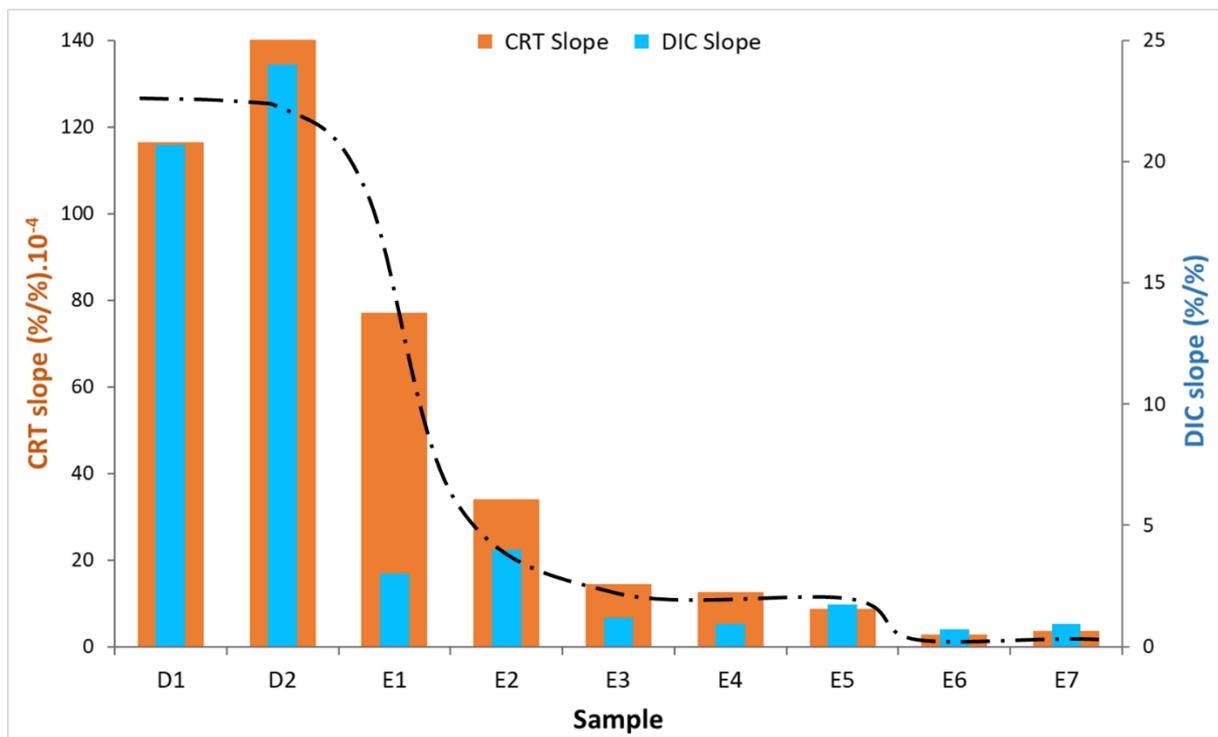


Figure 146: Pente de la déformation CRT et pente de la déformation DIC lors de la fissuration des échantillons avec et sans renfort.

VI.4. Effet de l'humidité relative ambiante sur le retrait et la fissuration des argiles

Afin d'étudier l'effet de l'humidité relative ambiante sur le retrait et la fissuration des argiles, une troisième série d'essais de retrait empêché, à l'aide de la technique DIC-CRT, est réalisée sur 7 échantillons de kaolinite. La Figure 147 présente un organigramme décrivant les différents paramètres étudiés dans cette série d'essais. Les essais de référence sont ceux réalisés à l'humidité relative ambiante la plus faible $HR = 40 \%$ (échantillons D1 et D2). La température ambiante est contrôlée à $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$.

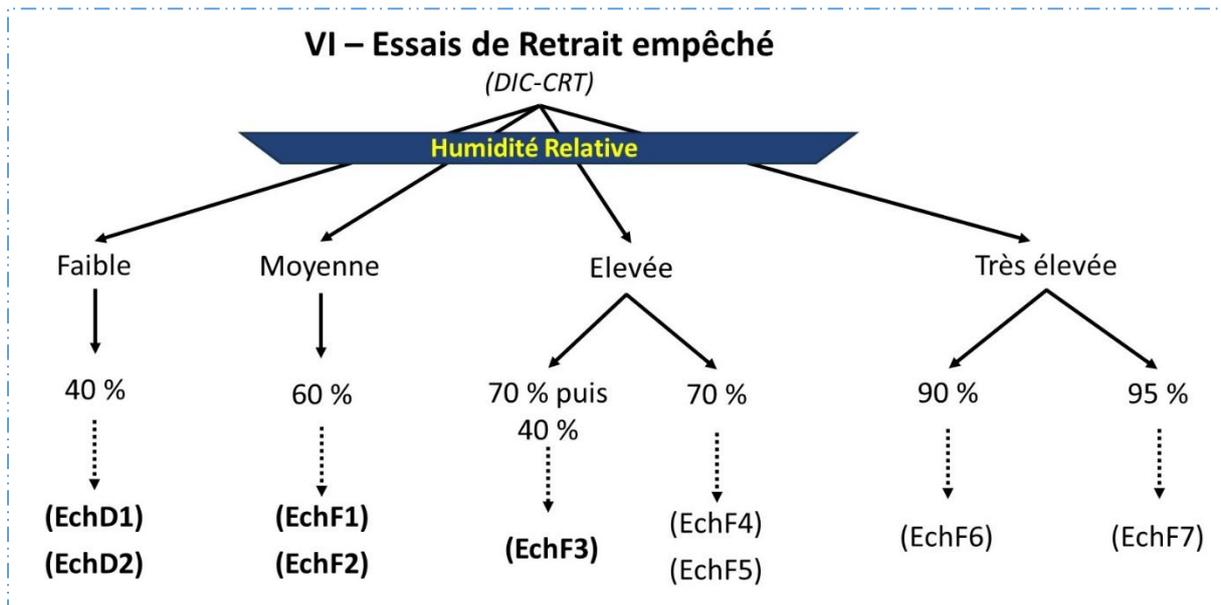


Figure 147: Essais de retrait empêché traitant l'effet de l'humidité relative ambiante.

VI.4.1. Méthodes

VI.4.1.1. Méthode de contrôle de l'humidité relative ambiante

Les humidités relatives de 40 % et de 60 % sont réglées dans la salle d'expérimentation, tandis que les humidités relatives de 70 % et de 95 % sont imposées à travers une enceinte hermétique dans laquelle sont placées des solutions salines saturées permettant de contrôler la phase vapeur dans l'atmosphère (Figure 148). Ces solutions salines sont placées dans quatre récipients d'un litre de volume chacun. L'enceinte hermétique consiste en une boîte de PVC, ayant des dimensions de 400 x 500 x 300 mm, dont la façade supérieure est formée d'une plaque de verre transparent d'épaisseur 3 mm. Le rôle de la plaque de verre est de permettre le champ de vision des appareils photo pendant la dessiccation pour l'analyse DIC. L'anneau métallique portant les jauges actives, ainsi que celui portant les jauges passives sont introduits dans l'enceinte. De même, un hygromètre (de marque Aviosys 8871) permet de mesurer l'humidité relative de l'air ambiant dans cette enceinte.

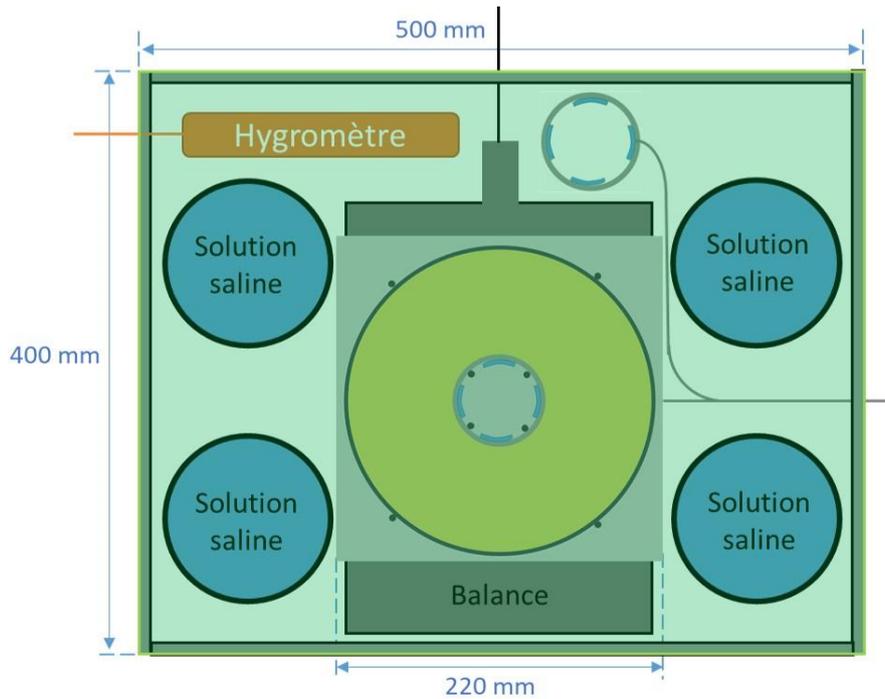


Figure 148: Vue de dessus de l'enceinte hermétique et des solutions salines permettant de contrôler l'humidité relative ambiante.

La solution saline utilisée pour imposer une humidité relative de 70 % (échantillons F3, F4 et F5) est l'hydroxyde de potassium KOH. Ce sel, ayant une masse molaire de 56.1 g/mol, permet en principe d'imposer une humidité de 9 % à une température de 20 °C. Néanmoins, le vapeur d'eau qui se dégage de l'échantillon d'argile lors du séchage entraîne une augmentation de l'humidité ambiante jusqu'à 70 %. La Figure 149 présente deux exemples d'essais de dessiccation à humidité contrôlée (cas des échantillons F5 et F6). On observe que, lors de la phase initiale de dessiccation, l'humidité relative dans le cas de l'échantillon F5 passe rapidement de 40 % à 70 % (en 20 minutes) puis se stabilise à cette valeur avec une variation de ± 2 % jusqu'à la diminution de la cinétique de séchage (pente de la teneur en eau en fonction du temps) à un temps de séchage de 20 jours. Au cours de cette phase, l'humidité relative ambiante est imposée par la quantité d'eau importante évaporée de l'échantillon que la solution saline n'arrive pas à équilibrer dans des temps courts. Ensuite, lorsque la teneur en eau tend vers sa valeur résiduelle, l'évaporation de l'eau de l'échantillon s'arrête et la solution saline poursuit l'absorption de l'excédent de vapeur d'eau de l'atmosphère pour tendre vers l'équilibre de la phase vapeur, ce qui entraîne une diminution progressive de l'humidité relative mesurée dans l'enceinte hermétique au-delà de 20 jours.

Par ailleurs, l'humidité relative ambiante de 90 % (échantillon F6) est imposée uniquement par la vapeur générée par la dessiccation de l'argile dans l'enceinte hermétique, en l'absence de solutions salines. On observe dans la Figure 149 que, lors de la phase initiale de dessiccation, l'humidité relative passe de 40 % à 90 % (en 8 heures) puis se stabilise sur cette valeur avec une variation de $\pm 3\%$ durant toute la phase de dessiccation où la teneur en eau moyenne de l'échantillon chute linéairement en fonction du temps, jusqu'à la diminution de la cinétique de séchage pour tendre vers la teneur en eau résiduelle après un temps de séchage de 50 jours. Ensuite, l'humidité relative diminue progressivement en tendant vers l'équilibre imposée par l'atmosphère de la salle d'expérimentation (HR = 40 %).

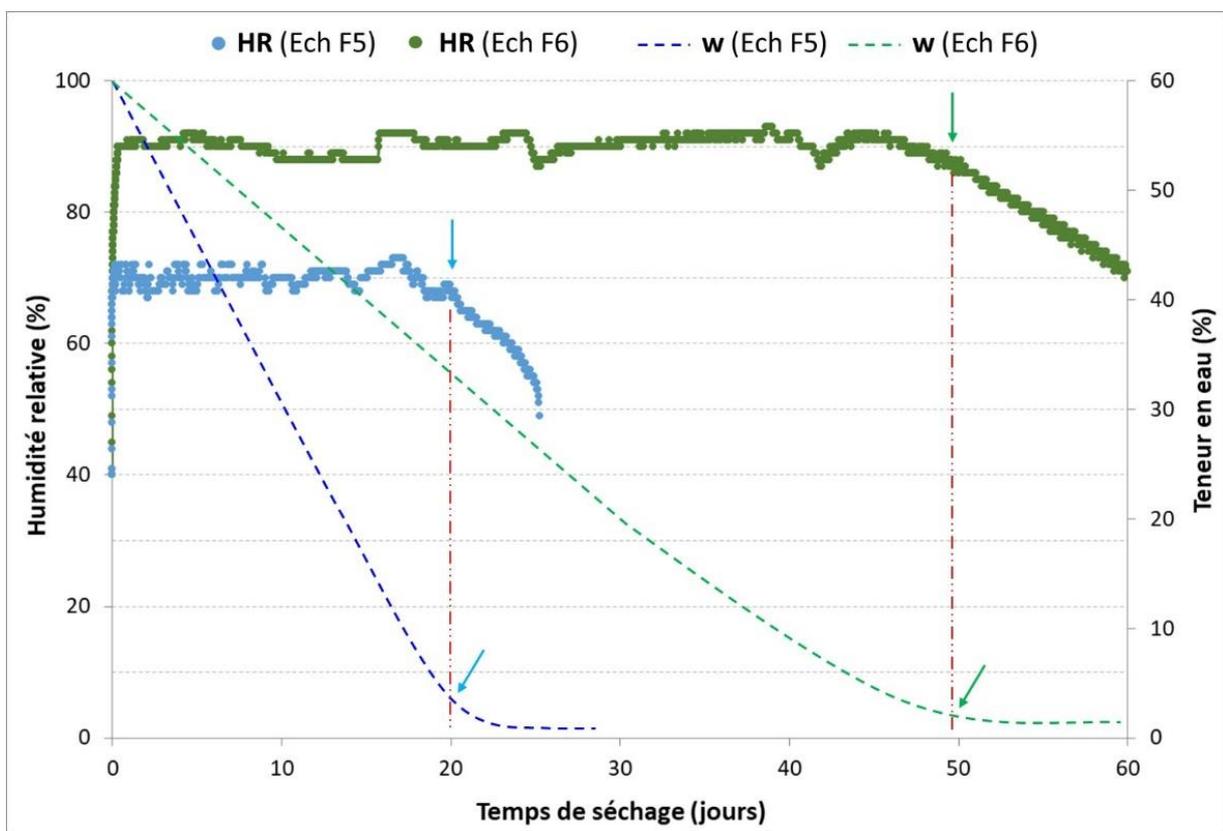


Figure 149: Evolution de la teneur en eau des échantillons F5 et F6 en fonction du temps de séchage, sous des humidités relatives contrôlées par la technique d'équilibre de vapeur.

VI.4.1.2. Relation succion - humidité relative

La formule reliant la succion à l'humidité relative correspondante est indépendante du sol. Elle est basée sur la loi de Kelvin, une des relations fondamentales de la thermodynamique. Cette loi est définie par l'expression suivante [Mitchell, 1993] :

$$u_a - u_w = \frac{\rho_l \times R \times T}{M_w} \times \ln(\text{HR}) \quad (31)$$

Avec : u_a et u_w sont respectivement les pressions de l'air et de l'eau (en Pa).

ρ_l est la masse volumique de l'eau ($\rho_l = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$)

R est la constante molaire des gaz parfaits ($R = 8.314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

T est la température thermodynamique du milieu (en °K)

M_w est la masse molaire de l'eau ($M_w = 18.016.10^{-3} \text{ kg.mol}^{-1}$)

HR est l'humidité relative ambiante.

A partir de cette loi, les humidités relatives imposées permettent d'avoir les succions suivantes (Tableau 14):

Humidité Relative (en %)	Succion (en MPa)
40	126
60	70
70	49
90	14
95	7

Tableau 14: Humidités relatives et succions correspondantes.

VI.4.1.3. Ré-calibration de la technique DIC suite à la présence de l'interface en verre

Comme la présence d'une plaque de verre transparent (épaisseur 3 mm) dans la façade supérieure de l'enceinte hermétique peut entraîner une réfraction du rayon lumineux captés par l'appareil photo, nous avons refait la calibration de la technique DIC pour tenir compte de ce phénomène. Cette calibration est faite de la même manière que celle présentée dans le paragraphe III.1.3.2 du Chapitre III.

La Figure 150 montre les écarts entre les déplacements mesurés et les déplacements imposés suivant les axes X, Y et Z. Un écart maximal de 0.1 mm est observé. Cet écart est dans l'ordre de grandeur de la précision de déplacement adoptée dans l'imagerie (subset) de la technique DIC (0.1 mm) (voir paragraphe III.1.3.1 du Chapitre III).

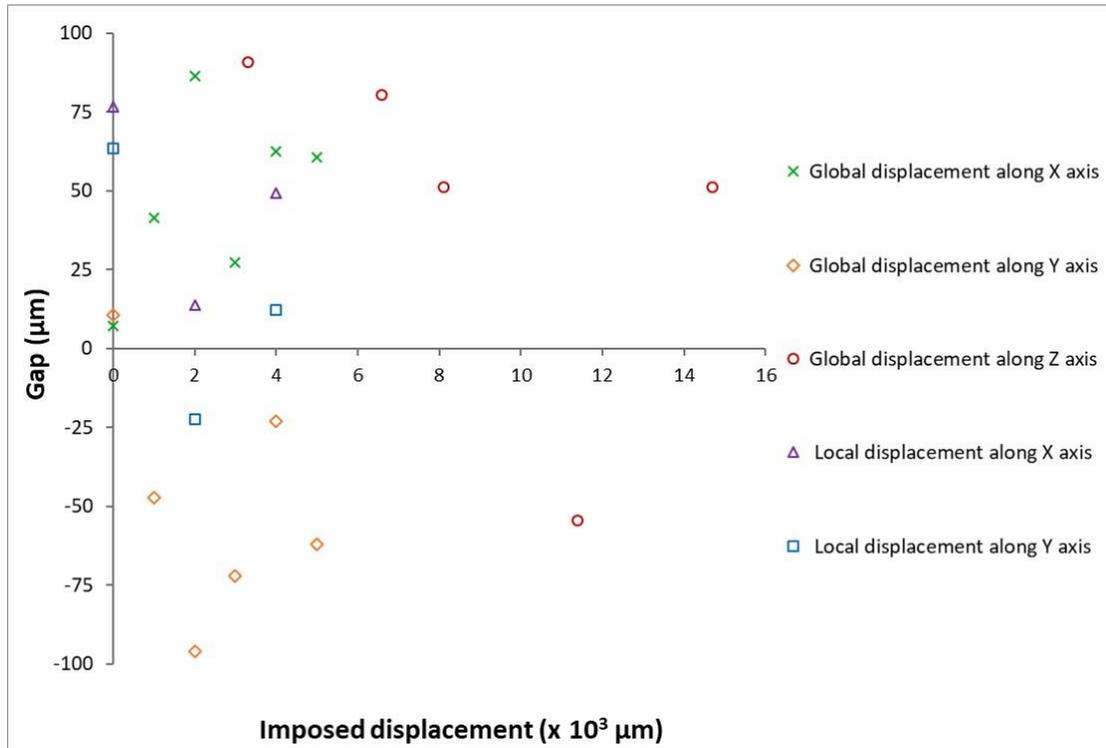


Figure 150: Ecart entre les déplacements mesurés et les déplacements imposés suivant les axes X, Y et Z.

VI.4.2. Effet de l'humidité relative ambiante sur la cinétique de séchage

La Figure 151 présente l'évolution de la teneur en eau moyenne dans les échantillons D1 et D2 ainsi que les échantillons F1 à F7 au cours de la dessiccation. Pendant la phase initiale de séchage, on observe que le comportement hydrique de ces échantillons comprend quatre cinétiques de séchage différentes. Les échantillons D1 et D2 ont une cinétique d'environ -9 %/jour (cinétique rapide), les échantillons F1 et F2 ont une cinétique d'environ -5 %/jour (cinétique moyenne), les échantillons F3, F4 et F5 ont une cinétique d'environ -3 %/jour (cinétique lente), tandis que les échantillons F6 et F7 ont une cinétique d'environ -1 %/jour (cinétique très lente). Notons que les échantillons F3 et F7 ont eu un changement dans leur cinétique de séchage pour des raisons qui seront expliquées ultérieurement. Cependant, à la fin de la dessiccation, tous ces échantillons atteignent une même teneur en eau résiduelle de l'ordre de 1 %. Ces quatre cinétiques de séchage mettent en évidence l'effet direct de l'humidité relative ambiante imposée sur le comportement hydrique du matériau.

La première fissure est apparue dans ces échantillons à des teneurs en eau comprises entre 23.5% et 27 %, correspondant à des succions allant de 2000 à 1000 kPa. Ceci indique que la cinétique de séchage n'a pas un effet significatif sur la teneur en eau à laquelle la première fissure apparaît dans l'échantillon.

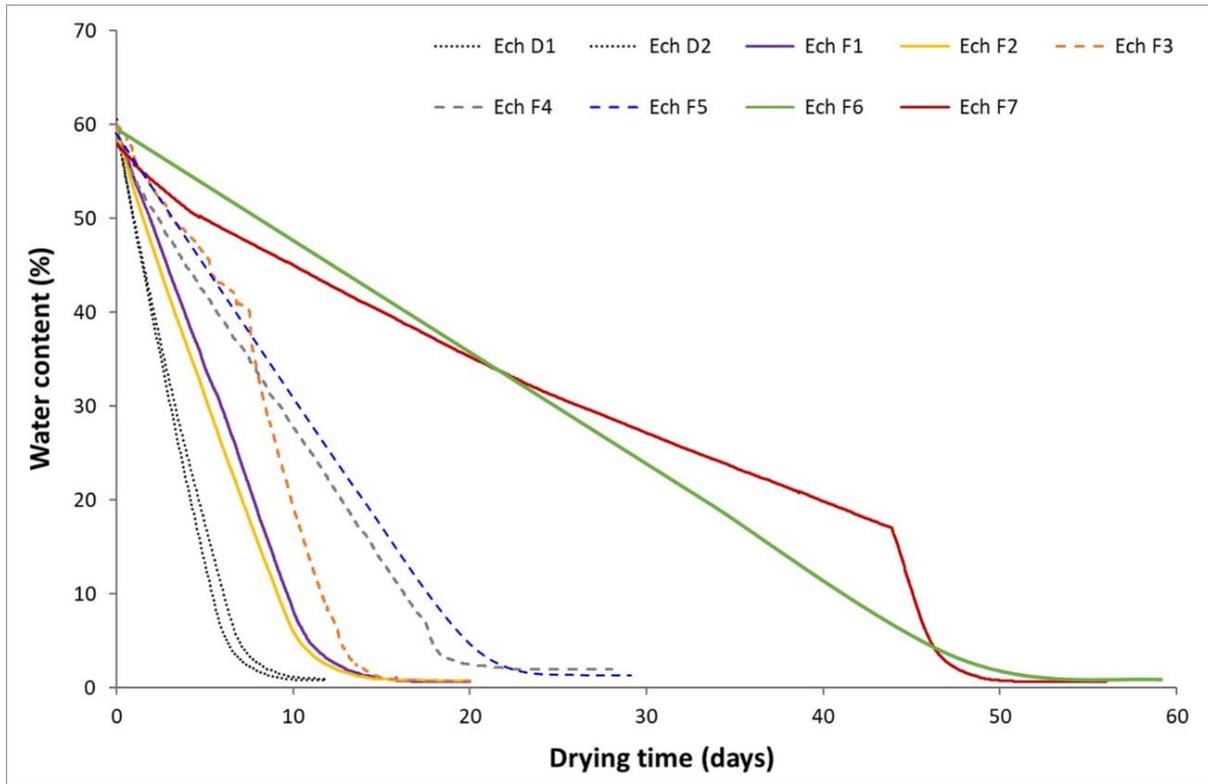


Figure 151: Evolution de la teneur en eau des échantillons étudiés au cours du séchage.

VI.4.3. Déformations mesurées par la technique CRT

Les Figure 152(a), Figure 152(b) et Figure 152(c) montrent l'évolution de la déformation circonférentielle de l'anneau métallique respectivement pour les échantillon F1, F4 et F3, ainsi que la succion déduite des courbes de rétention du matériau.

On observe que l'échantillon F1, ayant une cinétique de séchage moyenne, présente un comportement en déformation similaire aux échantillons D1 (Figure 120(a)) et D2 (Figure 120(b)), ayant une cinétique de séchage rapide. Néanmoins, dans la sous-phase B2, l'échantillon F1 se déforme avec une vitesse de $-30 \mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$, une fois et demi plus grande que celle des échantillons D1 et D2. En outre, cet échantillon F1 a atteint une déformation circonférentielle maximale de $-35 \mu\text{m}/\text{m}$ lors de la rupture (jauge J3), plus importante que celle mesurée dans les échantillons D1 ($-20 \mu\text{m}/\text{m}$) et D2 ($-25 \mu\text{m}/\text{m}$). De même, l'échantillon F2 (cinétique moyenne) a montré un comportement en déformation très similaire à l'échantillon F1, avec une déformation circonférentielle maximale de $-35 \mu\text{m}/\text{m}$ lors de la rupture (mesurée au niveau de la jauge J4). L'augmentation observée dans la déformation maximale à la rupture, lorsque la cinétique de séchage du matériau devient moins rapide, met en évidence l'influence de la cinétique de séchage sur le comportement en déformation du matériau argileux.

Dans le but de prospecter davantage l'effet de la cinétique de séchage sur le comportement en déformation des argiles, nous avons réalisé deux autres essais de retrait empêché avec une cinétique relativement lente (échantillons F4 et F5), ainsi que deux autres essais avec une cinétique relativement très lente (échantillons F6 et F7). Néanmoins, ces essais ont montré un comportement en déformation avec beaucoup de bruits au niveau des jauges d'extensométrie (voir un exemple du cas de l'échantillon F4 dans la Figure 152(b)). Ceci pourrait être dû aux conditions d'humidité élevée et fluctuante, qui malgré le soin apporté à l'étanchéité des jauges, le circuit électrique dans sa globalité peut être affecté par cet environnement. Afin de tenter de minimiser ce bruit, nous avons procédé à la réalisation de l'essai de dessiccation de l'échantillon F3 en deux étapes : une première étape sous une humidité relative ambiante de 70 % (cinétique lente) qui a duré jusqu'à 7.5 jours de temps de séchage, et une deuxième étape sous une humidité de 40 % (cinétique rapide) qui a duré jusqu'à la fin de la dessiccation (voir Figure 151 – Ech F3). En effet, la fin de la première étape correspond à une teneur en eau de 40 % (10 kPa de succion), à partir de laquelle la succion commence à croître dans le matériau (fin de la phase A dans la Figure 152(a), ainsi que dans les Figure 120(a) et Figure 120(b)).

La Figure 152(c) montre les déformations mesurées au niveau des jauges d'extensométrie dans l'échantillon F3. On observe un comportement en déformation un peu similaire à celui observé dans la Figure 152(a). Pendant la phase A (0 à 7.5 jours) qui correspond à la première étape de dessiccation (HR = 70 %), les jauges d'extensométrie montrent une remise à zéro de la déformation de l'anneau lors de la mise en œuvre du matériau. Une fois la deuxième étape de dessiccation entamée (HR = 40 %), le retrait augmente durant la phase B (7.5 à 9.5 jours) et l'anneau métallique se déforme rapidement avec une pente égale à $-27 \mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$ jusqu'à la fissuration de l'échantillon pour une déformation circonférentielle maximale d'environ $-50 \mu\text{m}/\text{m}$ mesurée au niveau de la jauge J3. Après la fissuration, l'anneau métallique se déforme dans le sens opposé (se détend) avec une pente égale à $+9 \mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$ (phase C).

Cette augmentation observée au niveau de la déformation maximale lors de la fissuration de l'échantillon confirme l'effet significatif de la cinétique du séchage sur le comportement en déformation du matériau argileux. Cet effet est surtout observé au début de la dessiccation (jusqu'à une teneur en eau de 40 %) lorsque le matériau est encore sous forme d'une boue sursaturée en eau. La relation relevée entre la cinétique de séchage et le comportement en déformation peut être due à l'effet direct que porte la vitesse d'évaporation d'eau sur l'équilibre thermodynamique au sein de la matrice argileuse [Whitaker, 1977]. En effet, lorsque la vitesse

d'évaporation d'eau est lente, l'échange de masse d'eau entre les zones d'argiles les plus humides et celles moins humides est suffisamment rapide pour maintenir à tout moment l'équilibre thermodynamique caractérisé par l'égalité des potentiels chimiques entre le liquide et sa vapeur. Cet équilibre thermodynamique permet d'avoir un matériau plus homogène tout autour de l'anneau métallique, ce qui implique une meilleure répartition des contraintes mécaniques dans l'échantillon d'argile. Par contre, une vitesse d'évaporation rapide empêche l'équilibre thermodynamique de s'établir au sein de la matrice argileuse, ce qui permet d'avoir une teneur en eau plus hétérogène au voisinage immédiat de l'anneau métallique. Etant donné que la résistance mécanique de l'argile est inversement proportionnelle à sa teneur en eau, l'hétérogénéité instaurée dans l'échantillon peut provoquer l'initiation des fissures dans les zones ayant la résistance mécanique la plus faible.

Cependant, ce constat nécessite d'être étayé avec des essais supplémentaires de dessiccation contrôlée afin d'étudier la reproductibilité de ce phénomène.

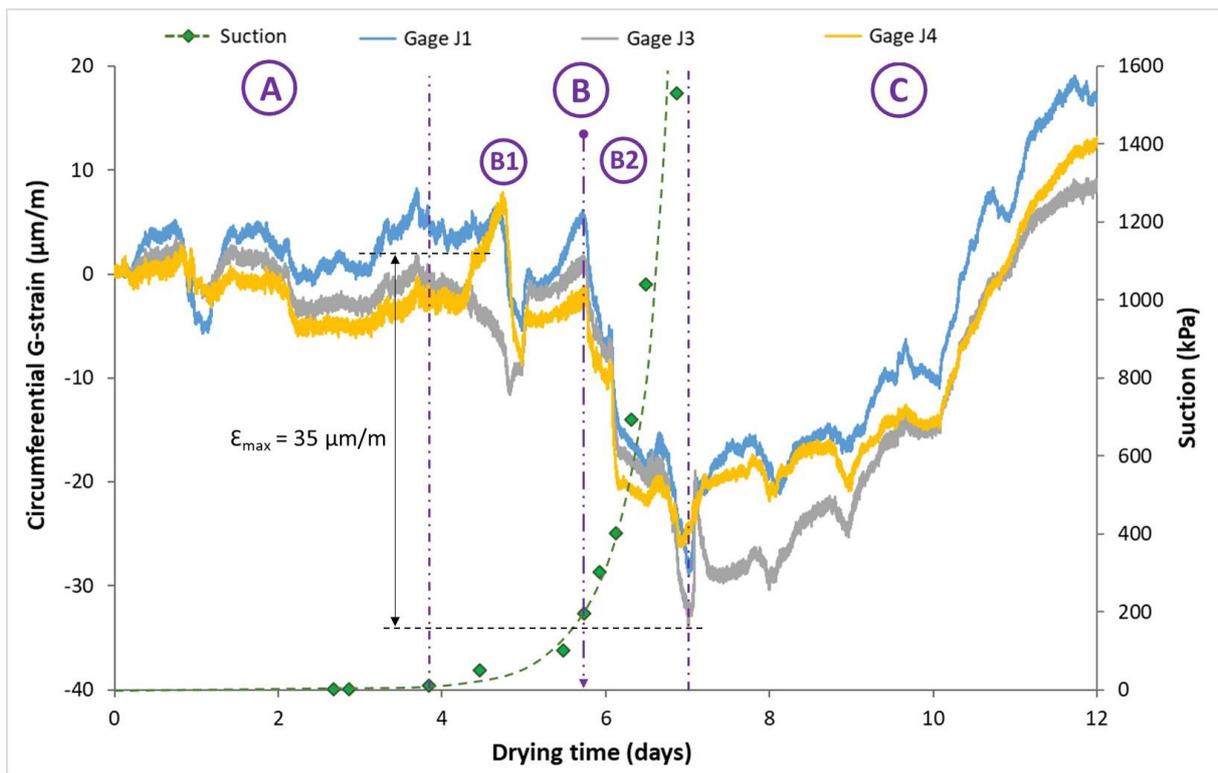


Figure 152(a): Déformations de l'anneau métallique dans l'échantillon F1 pendant le séchage. Comparaison avec l'évolution de la succion dans l'échantillon.

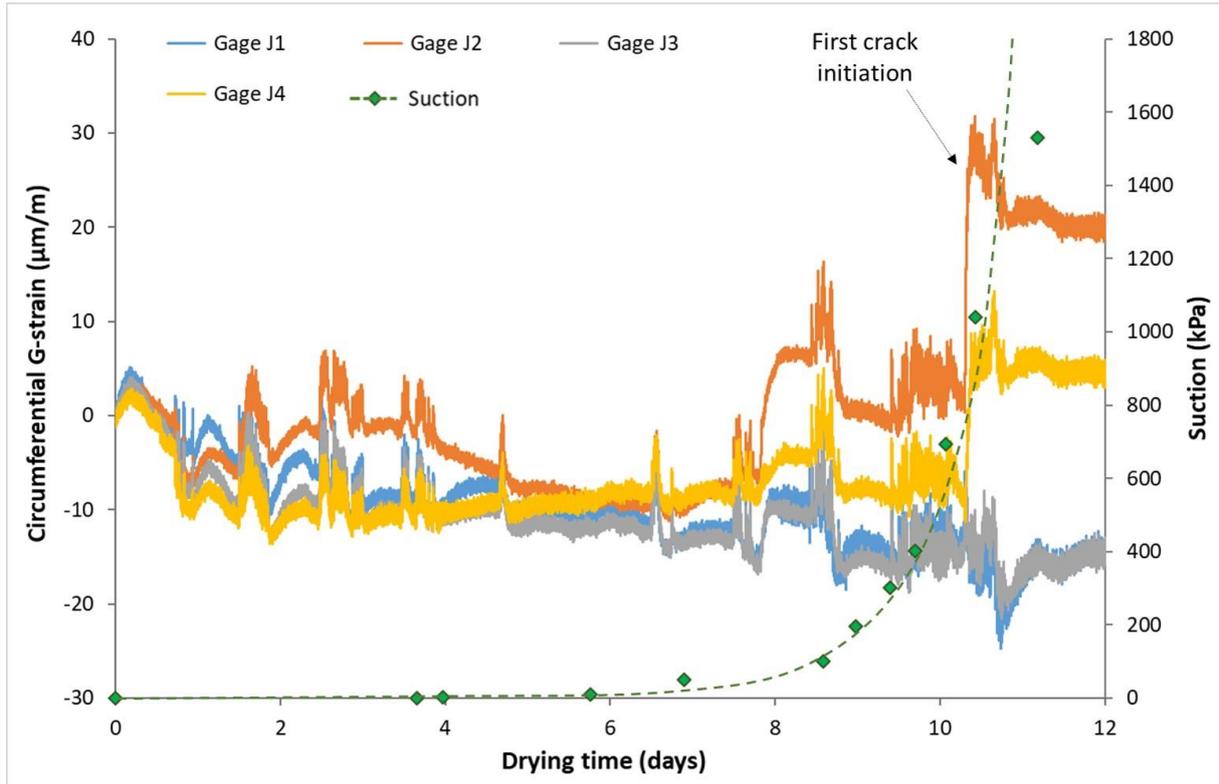


Figure 152(b): Déformations de l'anneau métallique dans l'échantillon F4 pendant le séchage. Comparaison avec l'évolution de la succion dans l'échantillon.

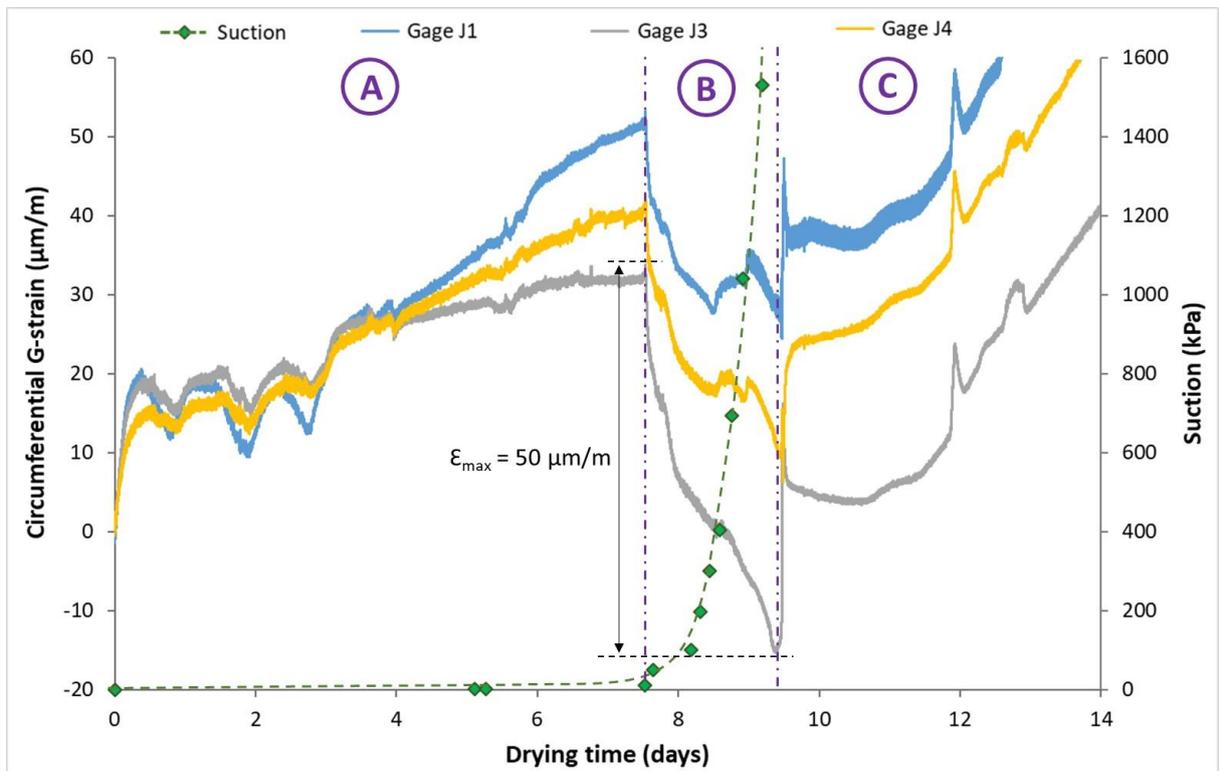


Figure 152(c): Déformations de l'anneau métallique dans l'échantillon F3 pendant le séchage. Comparaison avec l'évolution de la succion dans l'échantillon.

VI.4.4. Analyse du retrait et de la fissuration

La Figure 153 présente la densité de retrait global, ainsi que la densité de fissuration dans les échantillons D1 et D2 d'une part, et les échantillons F1 à F7 d'autre part, à la fin du processus de séchage, lorsque la teneur en eau de l'échantillon atteint sa valeur résiduelle.

On observe que la densité de retrait global de ces échantillons est comprise entre 20 et 26 %. De même, la densité de fissuration varie entre 0.5 et 0.8 %. Ceci indique que la cinétique du séchage n'a pas d'effet significatif sur l'état final de l'échantillon lorsque celui-ci atteint la teneur en eau résiduelle, alors que nous avons montré plus haut que cette cinétique de séchage joue un rôle dans l'initiation de la fissuration lorsque le matériau est encore dans son état quasi-saturé. Autrement dit, la cinétique de séchage lente retarde l'apparition de la première fissure, mais n'affecte pas dans la densité de fissuration totale en fin de dessiccation.

En outre, on peut constater que la succion imposée, déduite de la loi de Kelvin, n'affecte pas considérablement l'état de retrait et de fissuration du matériau argileux lorsqu'il atteint son état hydrique résiduel (fin de la dessiccation). La raison est que cette argile atteint sa limite de retrait à une succion relativement faible, de l'ordre de 1500 kPa correspondant à une teneur en eau de 24 %.

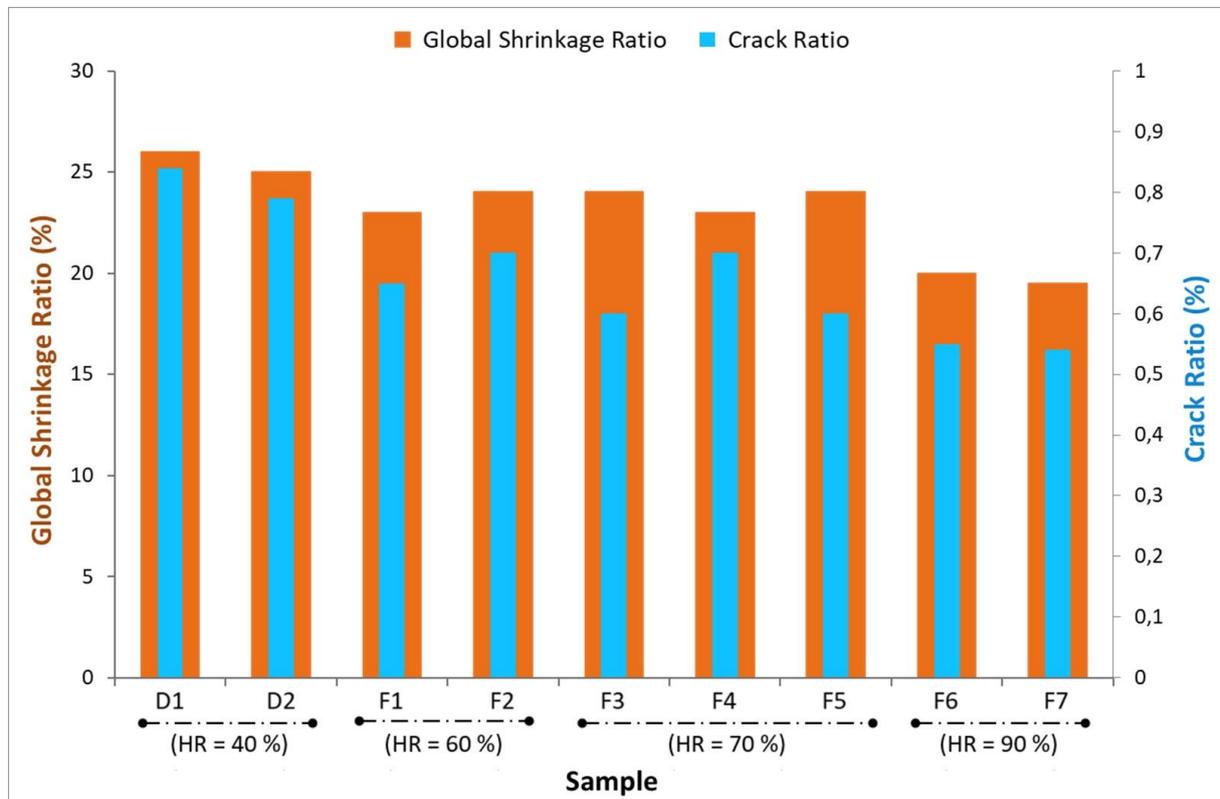


Figure 153: Densité de retrait global et densité de fissuration des échantillons étudiés à la fin de la dessiccation.

VI.4.5. Déformations mesurées par la technique DIC

Afin d'étudier l'influence de la cinétique du séchage du matériau sur la déformation moyenne dans les trois directions, nous avons effectué une comparaison de l'évolution des déformations principales majeures (ϵ_1), principales mineures (ϵ_2) et verticales (ϵ_z) moyennes au cours de la dessiccation pour les échantillons D1 (cinétique rapide) et F6 (cinétique très lente) (Figure 154). De même, une comparaison de l'évolution des déformations volumiques (ϵ_v) est présentée dans la même figure.

On remarque que toutes ces déformations atteignent leurs limites à une teneur en eau de 24 %, qui représente la teneur en eau correspondant à la limite de retrait du matériau (voir Figure 118(b)). De même, on observe que les déformations principales majeures (ϵ_1) et principales mineures (ϵ_2) dans l'échantillon F6 possèdent la même allure au cours du séchage, ainsi qu'elles atteignent quasiment les mêmes valeurs résiduelles à la fin de la dessiccation. En outre, les déformations principales majeures (ϵ_1) et verticales (ϵ_z) dans l'échantillon F6 sont plus importantes que celles dans l'échantillon D1. Par contre, la déformation principale mineure (ϵ_2) dans l'échantillon F6 est plus faible que celle dans l'échantillon D1. La variation de la déformation volumique avec la teneur en eau augmente plus rapidement dans l'échantillon F6 au début du séchage, puis diminue pour rejoindre la même déformation de l'échantillon D1 à la limite de retrait. Etant donné que les déformations principales mineures (ϵ_2) sont orientées dans la direction radiale, on peut constater qu'en diminuant la cinétique de séchage, le retrait vertical devient plus important, tandis que le retrait radial devient plus faible.

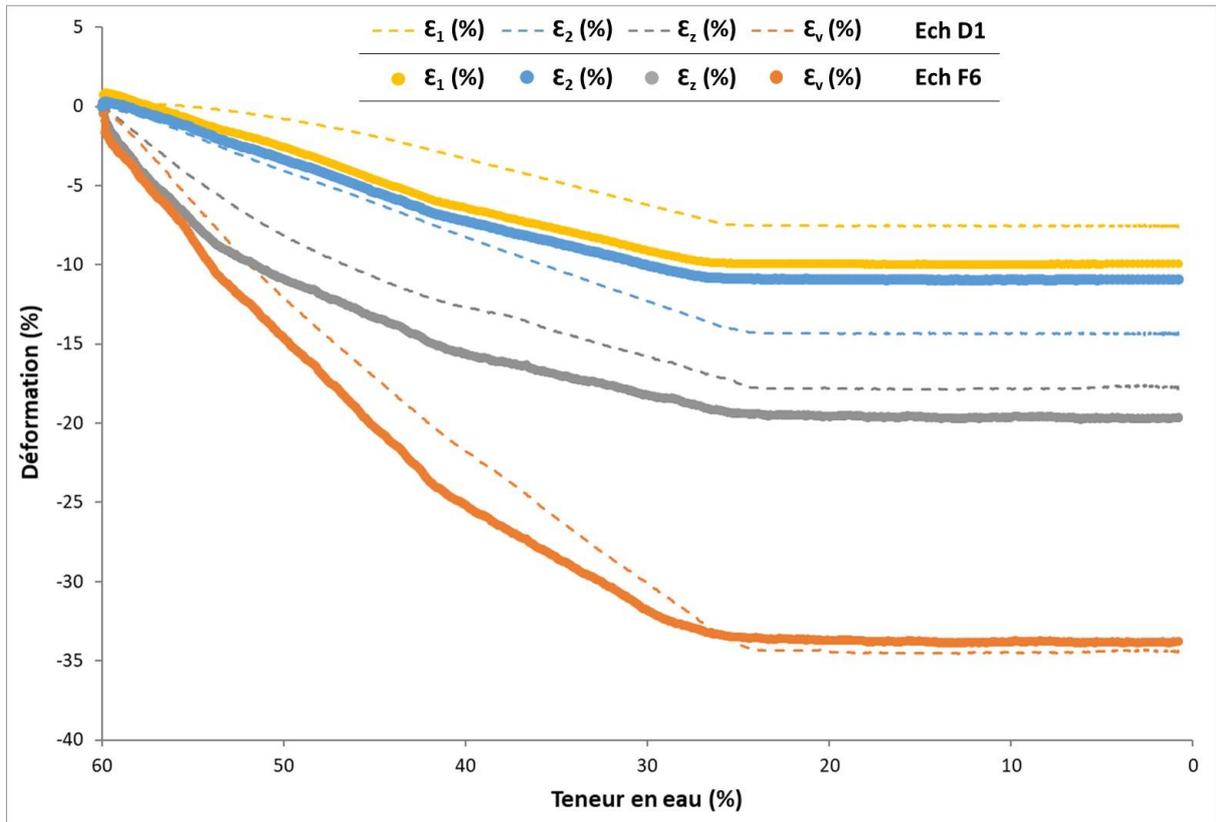


Figure 154: Comparaison entre l'évolution des déformations principales majeures (ϵ_1), principales mineures (ϵ_2) et verticales (ϵ_v) moyennes au cours du séchage dans les échantillons D1 et F6.

VI.5. Discussion : Contraintes mécaniques et succion

La compréhension de la relation entre les contraintes internes dues à la succion et le comportement mécanique des sols argileux intéresse les chercheurs et les ingénieurs depuis des décennies. La complexité de cette problématique est due à la complexité des interactions mécaniques au niveau des feuillets, des particules et des agrégats d'argiles, ainsi qu'aux facteurs structurels et physico-chimiques qui contribuent aux contraintes internes générées dans le sol au cours de la dessiccation.

VI.5.1. Estimation de la contrainte totale dans l'argile

Dans cette étude, nous avons d'une part estimé l'évolution de la succion au cours du séchage en se basant sur les courbes de rétention du matériau, et d'autre part nous avons estimé l'évolution de la contrainte totale dans le sol à l'aide de la technique CRT. Une influence directe des contraintes internes liées à la succion sur les déformations de retrait dans l'argile est observée lors de la dessiccation. La contrainte totale est dérivée des déformations mesurées à l'aide des jauges d'extensométrie situées au niveau de la circonférence interne de l'anneau métallique. En effet, les contraintes radiales à l'interface argile/métal étant supposées continues, l'Equation (18) nous permet de remonter à l'état de contrainte à cette interface. La Figure 155 présente l'évolution des contraintes circonférentielles à l'interface argile/métal au cours de la dessiccation de l'échantillon D1. On observe que ces contraintes, étant relativement faibles au début du séchage, commencent à augmenter à partir d'une teneur en eau d'environ 35 % jusqu'à la rupture du matériau à une teneur en eau de 26 %. Cette rupture (Major Crack) s'est produite au voisinage de la jauge J2 pour une contrainte circonférentielle d'environ 200 kPa. Néanmoins, une contrainte plus élevée de 250 kPa est mesurée un peu plus tard au niveau de la jauge J4. Etant donné que cette fissuration s'est ouverte par extension (voir Figure 123(C)), on peut définir cette contrainte maximale comme contrainte de traction maximale de l'échantillon étudié.

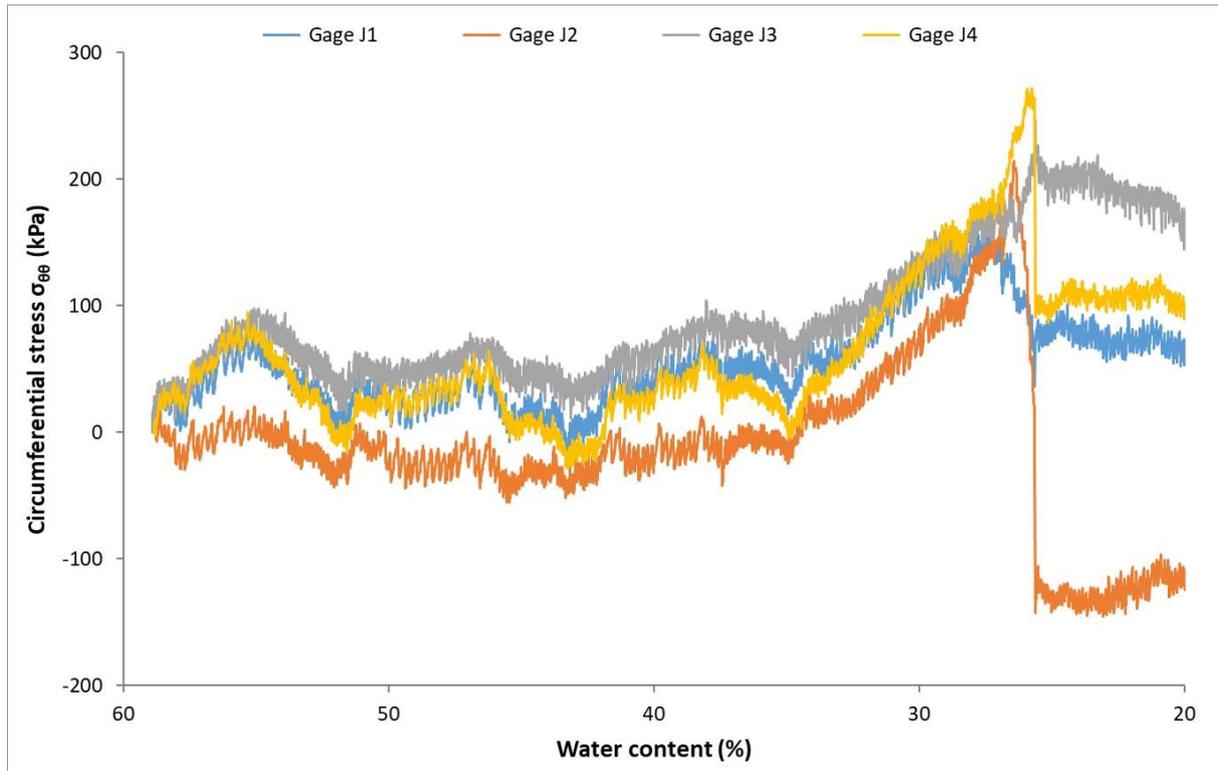


Figure 155: Evolution des contraintes circonférentielles à l'interface argile/métal au cours de la dessiccation.
Exemple du cas de l'échantillon D1.

La contrainte maximale estimée dans tous les échantillons ayant une cinétique de séchage d'environ -9 %/jour (à l'exception de l'échantillon D4) varie entre 250 et 330 kPa, indépendamment du type de renfort envisagé et de la teneur en eau initiale du matériau. Par conséquent, on peut définir cette plage de contraintes maximales de traction comme un ordre de grandeur de la résistance à la traction de cette argile, pour une cinétique du séchage d'environ -9 %/jour (cinétique rapide).

En revanche, les échantillons F1 et F2 ayant une cinétique d'environ -5 %/jour (cinétique moyenne) ont montré une contrainte maximale de traction de 450 kPa, tandis que l'échantillon F3 ayant une cinétique d'environ -3 %/jour (cinétique lente) a montré une contrainte maximale de traction de 650 kPa (Figure 156). Par conséquent, il semble qu'il y ait une relation inversement proportionnelle entre la cinétique du séchage du matériau et la contrainte maximale de traction mesurée lors de la fissuration de l'échantillon. Cependant, des essais supplémentaires sont nécessaires pour étayer ce constat.

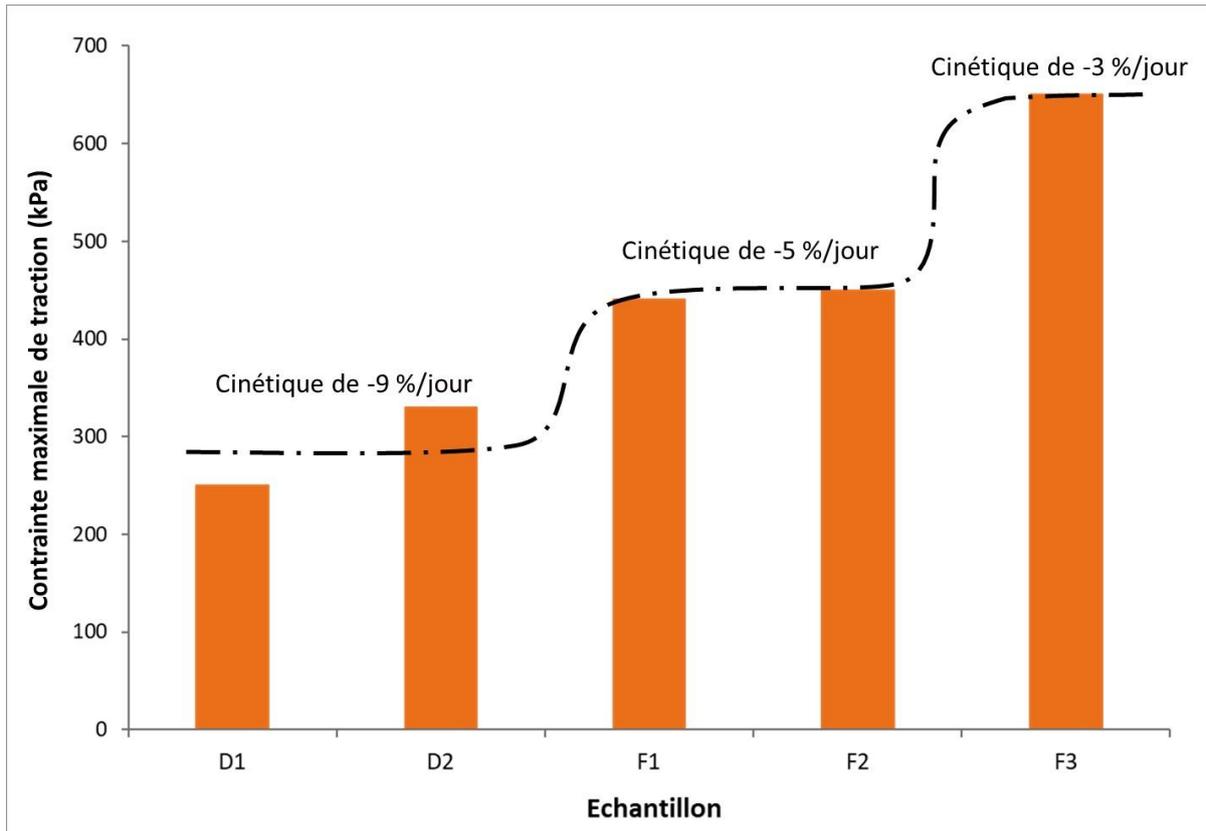


Figure 156: Evolution de la contrainte maximale de traction en fonction de la cinétique de séchage.

VI.5.2. Comparaison des contraintes DIC-CRT et ASTM Ring-Test

Dans le but d'étudier la fiabilité des contraintes mécaniques estimées, une comparaison est menée entre l'évolution des contraintes circonférentielles moyennes dans l'échantillon C3 d'une part (dispositif ASTM C1581) et dans les échantillons D1 et D2 (dispositif DIC-CRT) d'autre part (Figure 158(a)), en fonction de la teneur en eau moyenne de l'échantillon. Une contrainte moyenne représente la moyenne des contraintes estimées à partir de chacune des quatre jauges d'extensométrie. Notons que l'échantillon C3 possède les mêmes caractéristiques physiques (même matériau et teneur en eau initiale) que les échantillons D1 et D2. Le poids important du dispositif ASTM C1581 n'a pas permis d'avoir une mesure instantanée de la teneur en eau pendant le séchage. Néanmoins, la teneur en eau de l'échantillon C3 est estimée à partir de la teneur en eau initiale de l'échantillon et celle mesurée après sa fissuration (par des mesures destructives), en considérant une évolution linéaire de la teneur en eau globale pendant la phase initiale de séchage.

On observe que ces trois échantillons (C3, D1 et D2) montrent également des contraintes relativement faibles dès le début du séchage et jusqu'à une teneur en eau d'environ 35 %. Ensuite, les contraintes mécaniques augmentent rapidement avec un pente d'environ 24 kPa/%

jusqu'à la fissuration de l'échantillon à des teneurs en eau variant entre 26 et 28 %. Les contraintes moyennes estimées à la fissuration de ces échantillons varient de 190 à 240 kPa. Ce comportement mécanique similaire observé dans les échantillons C3, D1 et D2, malgré la différence entre leurs caractéristiques géométriques et les dispositifs expérimentés, met en évidence la reproductibilité de la technique CRT, ainsi que le bon ordre de grandeur des contraintes mécaniques estimées avec cette technique.

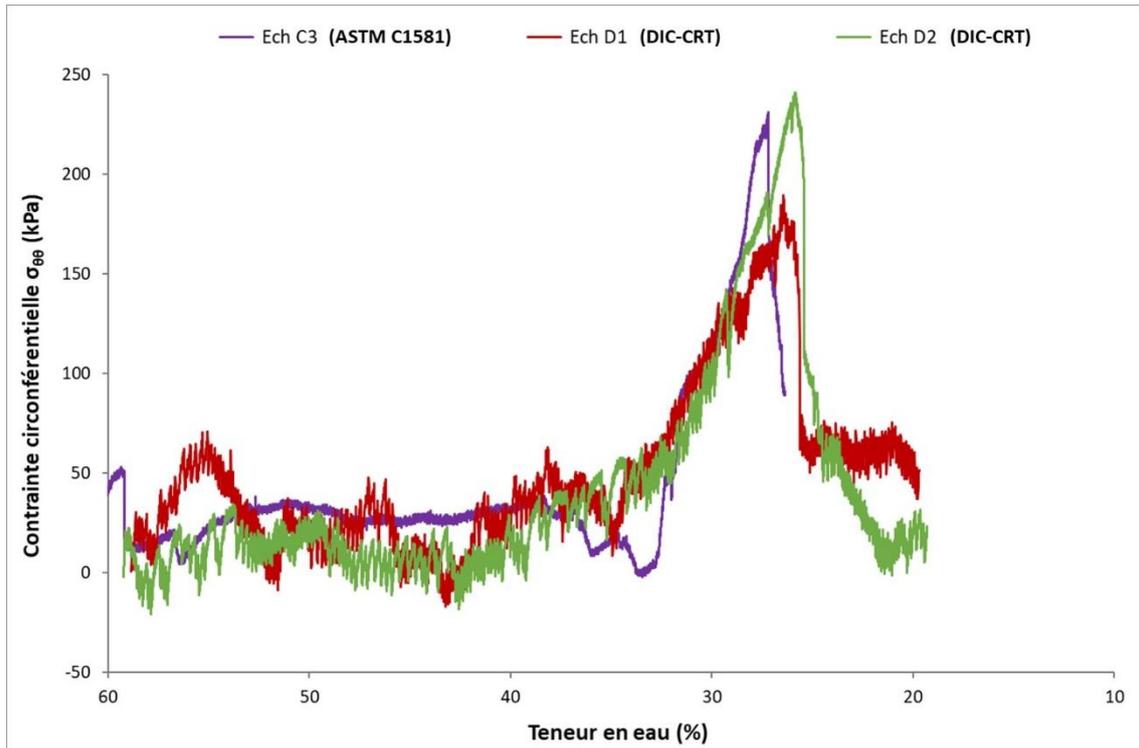


Figure 157: Comparaison entre les contraintes mécaniques moyennes estimées dans les échantillons C3, D1 et D2.

VI.5.3. Comparaison avec les résultats de la littérature

Par ailleurs, une comparaison est également menée dans la Figure 158(a) entre les contraintes mécaniques estimées dans les échantillons C3, D1 et D2 d'une part et celles estimées par Abou Najm et al. [Abou Najm, 2009] sur deux sols limoneux d'autre part. Notons que les contraintes estimées par Abou Najm et al. sont également obtenues à l'aide d'un dispositif Ring-Test ayant des dimensions différentes de notre dispositif DIC-CRT. On remarque que ces sols limoneux présentent un comportement mécanique très différent de notre sol argileux. Les contraintes circonférentielles dans le matériau commencent à augmenter dès le début du séchage avec une pente de 4 kPa/% pour le sol 1 ($w_{\text{initiale}} = w_{\text{saturation}} = 34\%$) et de 8 kPa/% pour le sol 2 ($w_{\text{initiale}} = w_{\text{saturation}} = 46\%$) jusqu'à la fissuration de l'échantillon pour des contraintes maximales respectivement de 47 kPa et de 63 kPa. Ensuite, les contraintes se relaxent dans les échantillons de la même façon que les échantillons D1 et D2. Ces valeurs de contraintes maximales,

relativement faibles par rapport à celles que nous avons mesuré sur la kaolinite, peuvent s'expliquer par la granulométrie différente pour ces deux matériaux. En effet, pour une teneur en eau donnée, par exemple $w = 20\%$, la succion dans les sols limoneux de Abou Najm et al. est de l'ordre de 100 kPa, alors que celle-ci est de l'ordre de 2 MPa dans le cas de la kaolinite. Cette différence de succion pour une teneur en eau donnée est liée directement à la différence de la contrainte mécanique maximale mesurée à la fissuration du matériau.

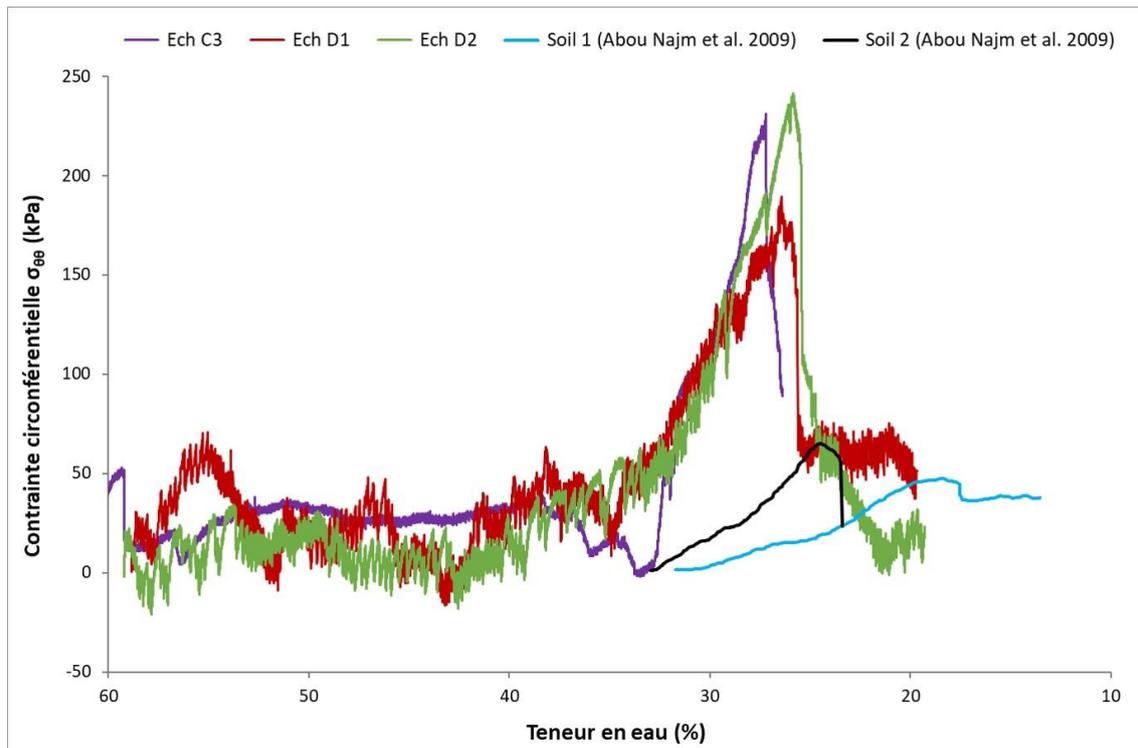


Figure 158(a): Comparaison entre les contraintes mécaniques moyennes estimées dans les échantillons C3, D1 et D2 et celles estimées par Abou Najm et al. [Abou Najm, 2009] sur deux sols limoneux.

La Figure 158(b) présente une comparaison entre les contraintes mécaniques maximales estimées à la fissuration des échantillons D1, D2, F1 et F3 (kaolinite P300/DIC-CRT) d'une part, et celles mesurées par Tang & Graham [Tang, 2000] (mélange d'un sable et d'une bentonite), Vesga & Vallejo [Vesga, 2006] (kaolinite), Abou Najm et al. [Abou Najm, 2009] (sol limoneux) et Lu et al. [Lu, 2007] (sol sableux) d'autre part. Rappelons que les contraintes estimées dans nos échantillons (D1, D2, F1 et F3), ainsi que ceux de Abou Najm et al. sont mesurées à l'aide de la technique de l'essai à l'anneau (Ring-Test). Par contre, les contraintes estimées par Tang & Graham, Vesga & Vallejo, et Lu et al. sont mesurées à l'aide des essais de traction simple, réalisés sur des échantillons à différentes teneurs en eau. Ces contraintes mécaniques sont présentées sur une échelle logarithmique afin que toute la gamme des types de sols soit reproduite. Les caractéristiques géotechniques de ces sols sont présentées dans le Tableau 15.

On remarque que les contraintes maximales de traction dans les sols sableux (Lu et al.) varient entre 0.4 et 20 kPa, celles des sols limoneux (Abou Najm et al.) varient entre 60 et 200 kPa, tandis que celles des sols argileux (Ech D1, Ech D2, Ech F1, Ech F3, Tang & Graham et Vesga & Vallejo) sont comprises entre 200 et 700 kPa. L'augmentation de la contrainte maximale de traction en fonction de la finesse du sol met en évidence la correspondance entre la granulométrie du sol et sa résistance à la traction (Tableau 15). Ceci est due à la relation inversement proportionnelle entre les diamètres des espaces poreux dans le sol et les contraintes internes liées à la succion qui se développent au cours de la dessiccation. Par conséquent, on peut constater que la succion acquière au sol sa résistance mécanique à la traction lors de la dessiccation.

De même, on observe un bon accord entre la résistance à la traction dans les échantillons de kaolinite étudiés par Vesga & Vallejo (traction simple) et dans nos échantillons (essai à l'anneau). Ceci met en évidence le bon ordre de grandeur des résultats obtenus à l'aide de la technique de l'essai à l'anneau dans les argiles (CRT).

Sol	Caractéristiques	Type d'essai
50 % sable (sous-granulaire moyen) 50 % argile (bentonite sodique $w_L = 240\%$; $IP = 200\%$) [Tang & Graham, 2000]	$w_{initiale} = 20\%$ $S_r = 85\%$ $\gamma_d = 16.7 \text{ kN/m}^3$	Traction simple
Kaolinite [Vesga & Vallejo, 2006]	$w_{initiale} = w_L = 44\%$ $IP = 18\%$	Traction simple
Limon argileux [Soil 1 - Abou Najm et al., 2009]	Granulométrie (sable (19 %) ; limon (49 %) ; argile (32 %)). $w_{saturation} = 34\%$	Ring-Test
Limon argileux [Soil 2 - Abou Najm et al., 2009]	Granulométrie (sable (15 %) ; limon (45 %) ; argile (40 %)). $w_{saturation} = 46\%$	Ring-Test
Sable moyen [Soil 1 - Lu et al., 2007]	Diamètre volumétrique moyen = $451 \mu\text{m}$; $200 \mu\text{m} < d < 900 \mu\text{m}$ $w_{initiale} = 25\%$	Traction simple
Sable limoneux [Soil 2 - Lu et al., 2007]	Diamètre volumétrique moyen = $105 \mu\text{m}$; $50 \mu\text{m} < d < 200 \mu\text{m}$ $w_{initiale} = 28\%$	Traction simple

Tableau 15: Caractéristiques géotechniques des sols étudiés par Tang & Graham [Tang, 2000], Vesga & Vallejo [Vesga, 2006], Abou Najm et al. [Abou Najm, 2009] et Lu et al. [Lu, 2007].

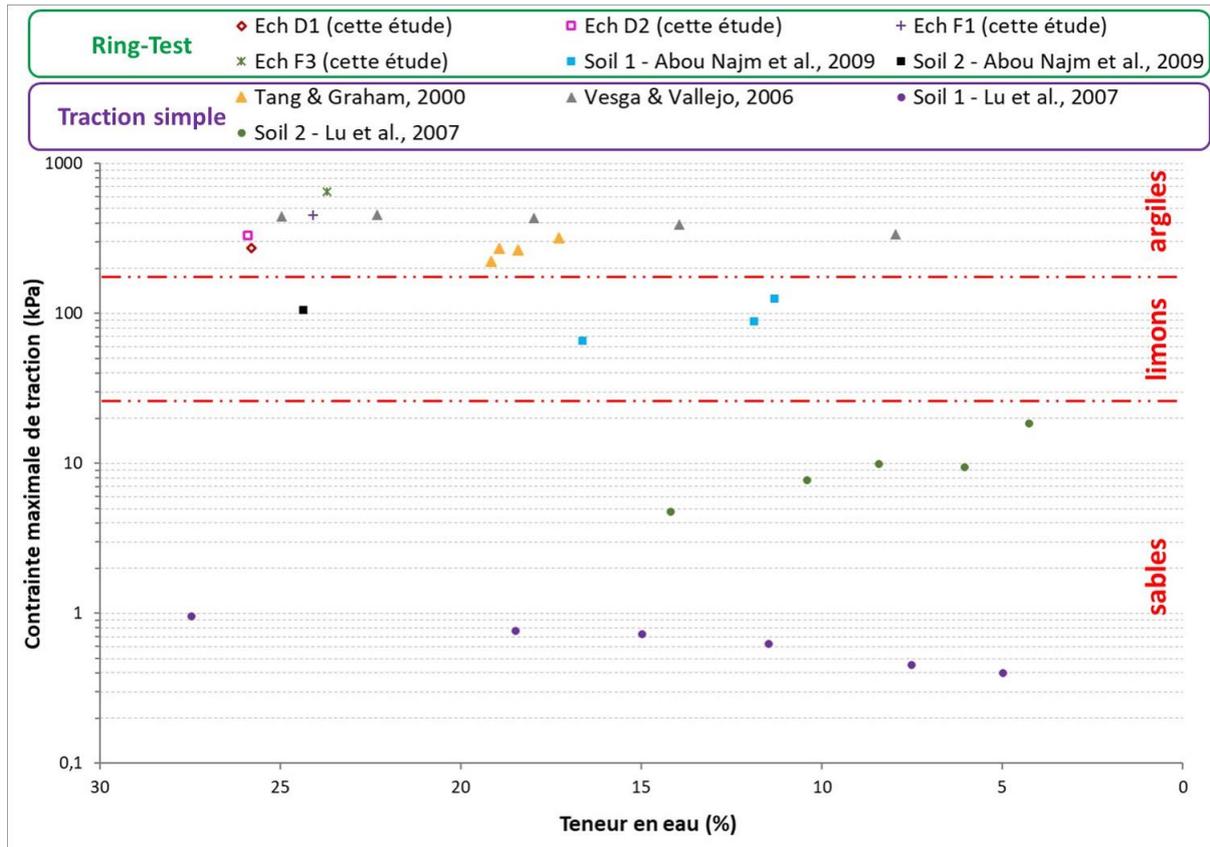


Figure 158(b): Comparaison entre les contraintes maximales dans les échantillons D1, D2, F1 et F3 d'une part et celles mesurées par Tang & Graham [Tang, 2000], Vesga & Vallejo [Vesga, 2006], Abou Najm et al. [Abou Najm, 2009] et Lu et al. [Lu, 2007] d'autre part.

VI.5.4. Analyse de l'évolution des contraintes totales et de la succion dans l'argile au cours de la dessiccation

La Figure 159 présente une comparaison entre l'évolution des contraintes totales et de la succion dans l'échantillon D1 au cours de la dessiccation. La succion représentée est déduite de la courbe de rétention du matériau (SWRC) à partir de la teneur en eau mesurée. On remarque que lorsque la teneur en eau atteint 40 %, la contrainte mécanique tend à augmenter en parfaite corrélation avec l'augmentation rapide de la succion. Ce phénomène se poursuit jusqu'à la rupture par fissuration représentée par les pics de contrainte mécanique culminant entre 150 et 250 kPa et correspondant à des valeurs de succion de l'ordre de 1500 kPa environ. Notant que l'ordre de grandeur de la succion est 10 fois plus important que celui de la contrainte mécanique. Par conséquent, chercher à relier ces deux valeurs passe nécessairement par une interprétation des contraintes internes d'origine capillaire induites par la succion. En d'autres termes, définir une notion de contrainte effective adaptée à l'argile tout au long de cette dessiccation, depuis son état initial saturé et jusqu'à sa teneur en eau résiduelle, en passant par son point de rentrée d'air.

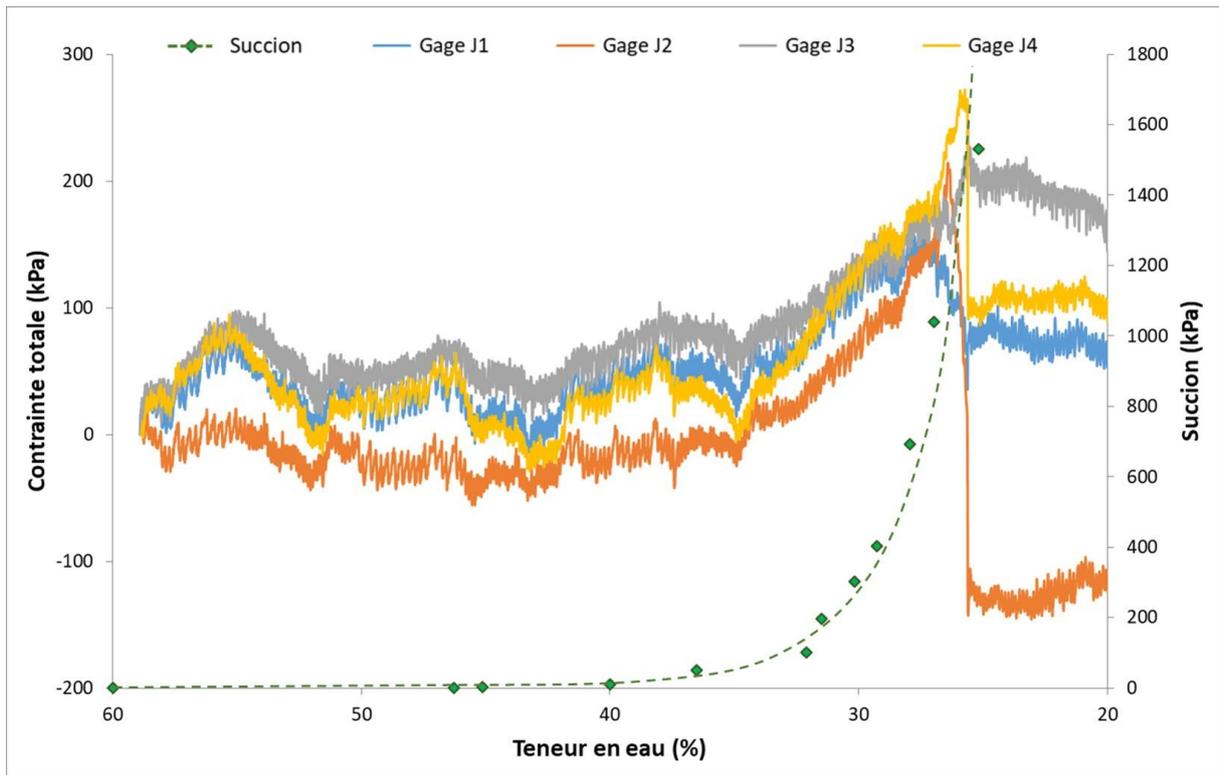


Figure 159: Comparaison entre l'évolution des contraintes totales et de la succion dans l'échantillon D1 au cours de la dessiccation.

VI.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié à l'aide du dispositif expérimental prototype (DIC-CRT) les déformations de retrait et la fissuration par dessiccation dans les sols fins argileux. Deux techniques expérimentales, la corrélation d'images numériques (2D/3D-DIC) associée à l'essai à l'anneau dans les argiles (CRT), sont utilisées pour évaluer à la fois les déformations et les contraintes qui se développent dans le sol tout au long de sa dessiccation. Ce dispositif expérimental permet de mettre en évidence l'importance du couplage de la technique 2D/3D-DIC avec la technique CRT. De même, des capteurs tensiométriques sont intégrés dans ce dispositif, afin de suivre l'évolution de la succion (dans la gamme 0-90 kPa) au cours de la dessiccation.

Les essais de retrait empêché réalisés sur une argile initialement préparée sous forme de boue ont montré que la première fissure apparaît dans l'échantillon alors que le matériau est encore quasi-saturé. Dans le cas d'un séchage vertical (séchage par la surface supérieure de l'échantillon), cette fissure part de l'interface avec l'anneau métallique et se propage radialement vers le diamètre extérieur de l'échantillon. L'analyse CRT a montré qu'il existe un bon accord entre l'augmentation de la succion dans l'argile et les déformations provoquant la fissuration de l'échantillon. D'autre part, l'analyse DIC a montré que les déformations circonférentielles augmentent en s'éloignant de l'anneau métallique alors que les déformations radiales diminuent. La déformation verticale de type compression, bien qu'elle soit aussi importante que les déformations dans le plan, n'a montré aucun effet significatif sur l'initiation et la propagation des fissures dans l'échantillon. La présence des pics de déformations circonférentielles au niveau des fissures indique que la fissuration dans le Ring-Test se produit généralement selon le mode d'ouverture (mode I), autrement dit qu'il s'agit d'une rupture par extension. De même, la combinaison des pics de déformations de cisaillement et circonférentielles lors de la bifurcation de la fissure montre que ce phénomène se produit dans le Ring-Test selon le mode mixte d'ouverture/glisement (modes I et II). La corrélation entre les techniques DIC et CRT met en évidence la complémentarité de ces deux techniques. La technique DIC permet de suivre le champ de déformation avant, pendant et après l'initiation des fissures, tandis que la technique CRT permet d'estimer les contraintes mécaniques qui provoquent la rupture locale dans l'échantillon, matérialisée par l'apparition d'une première discontinuité (fissuration).

L'analyse des déformations de retrait à l'aide des techniques DIC et CRT a montré que la rugosité des supports n'a pas un effet significatif sur le comportement en déformation du

matériau dans le dispositif DIC-CRT. La raison est que l'effet de la rugosité des supports est dominé par l'effet de l'épaisseur de l'échantillon. Ceci est compatible avec les observations du Chapitre 3 concernant l'échantillon B2.

Par contre, la teneur en eau initiale de l'échantillon a un effet significatif sur sa densité de retrait global et sa déformation résiduelle. Ceci est due au retrait que le matériau sursaturé subit lors de l'évaporation de la phase liquide. De même, l'analyse des déformations à l'aide de la technique DIC a montré qu'un état hydrique moins humide acquiert au matériau un comportement un peu plus fragile lors de la dessiccation.

Par ailleurs, l'effet du renforcement du sol est étudié avec différents types de renforts et de mise en œuvre. Dans le cas du renfort en treillis en acier à maille serrée, l'augmentation de la densité de fissuration indique que la densité des mailles serrées empêche le retrait local. En revanche, les renforts avec les fils de fibres de lin, plus espacées, montrent une baisse significative de la densité de fissuration avec le pourcentage de fibres. La raison peut être due au fait que le renfort reprend, par frottement sol/fibres, une partie de la sollicitation mécanique appliquée par l'anneau métallique sur l'argile. De même, l'analyse CRT a montré que le renfort à l'aide de fibres végétales n'a pas un effet significatif sur l'initiation des fissures. Par contre, l'analyse DIC a montré une réduction significative de l'intensité des fissures en fonction du pourcentage de fibres ajoutées. Les pentes des déformations « DIC slope » et « CRT slope », représentant la variation maximale des déformations lors de la fissuration du matériau, sont des paramètres pertinents pour caractériser l'effet des renforts sur la fissuration de l'argile dans le dispositif DIC-CRT. Par conséquent, on peut constater que le renfort, malgré qu'il n'a pas d'effet significatif sur l'initiation de la fissuration, permet de ralentir et de limiter sa propagation dans le matériau.

L'effet de l'humidité relative ambiante imposée sur la cinétique du séchage met en évidence une augmentation de la déformation maximale à la rupture, lorsque la cinétique de séchage devient lente. La relation entre la cinétique de séchage et le comportement en déformation du matériau peut être due à l'effet direct de la vitesse d'évaporation d'eau sur l'équilibre thermodynamique au sein de la matrice argileuse. Par ailleurs, nous avons observé une relation inversement proportionnelle entre la cinétique du séchage du matériau et la contrainte maximale de traction mesurée lors de la fissuration de l'échantillon.

Conclusion générale

Dans ce travail de thèse, nous avons prospecté les phénomènes de retrait et de fissuration par dessiccation dans les sols fins argileux à travers deux méthodes d'analyse expérimentale : le retrait libre et le retrait empêché. Pour la première méthode, nous avons utilisé la technique de corrélation d'images numériques (DIC) pour déterminer l'état de déformations qui se développent au sein du matériau tout au long du processus de dessiccation, depuis son état initial saturé et jusqu'à sa rupture par fissuration. Pour la deuxième méthode, nous avons utilisé la technique de l'essai à l'anneau (Ring-Test) pour estimer à l'état de contraintes dans le matériau associé à la dessiccation, notamment à la fissuration. Dans ce sens, nous avons mis au point un dispositif expérimental prototype, appelé DIC-CRT, adapté aux sols fins argileux et combinant trois techniques expérimentales : la corrélation d'images numériques (DIC), l'essai de retrait empêché à l'anneau (CRT), et la tensiométrie pour le suivi de la succion durant le processus de dessiccation.

Nous synthétisons ci-dessous les principaux résultats obtenus :

(i) Dans les essais de retrait libre, nous avons étudié l'effet des conditions aux limites (rugosité de la base), des caractéristiques intrinsèques du matériau (minéralogie) et de l'épaisseur de l'échantillon sur la fissuration par dessiccation. L'analyse de la fissuration a mis en évidence l'effet important de la rugosité du support et de l'épaisseur de l'échantillon ; ainsi, dans le cas de la kaolinite, l'apparition des discontinuités est constatée uniquement dans le cas d'un support rugueux et pour une faible épaisseur (8 mm). En revanche, ces discontinuités sont absentes dès que l'épaisseur devient relativement importante (32 mm). Par contre, dans le cas de la montmorillonite, la fissuration a lieu dans tous les cas, indépendamment de la rugosité du support et de l'épaisseur de l'échantillon. Ceci indique que la minéralogie du matériau joue un rôle dominant sur les mécanismes de retrait, comparé à la rugosité du support et à l'épaisseur de l'échantillon. Par ailleurs, nous avons observé que le retrait global diminue avec la rugosité du support, et augmente avec l'épaisseur de l'échantillon.

L'analyse des champs de déformation pré-fissuration a montré que l'initiation de la fissure dans une argile lors d'un retrait libre peut se produire de différentes manières : suivant le mode d'ouverture (mode I) suite à des sollicitations locales de traction ; suivant le mode de glissement (mode II) suite à un cisaillement local ; ou bien suivant le mode mixte d'ouverture/glissement (modes I et II) suite à des sollicitations locales combinées de compression et de cisaillement.

L'analyse de la stéréo-corrélation 3D a montré que les déformations verticales ne peuvent pas être négligées. Ces déformations sont plus homogènes en cas d'un séchage uniquement par la surface supérieure de l'échantillon.

(ii) Dans les essais de retrait empêché à l'aide du dispositif Ring-Test ASTM C1581, nous avons estimé les contraintes mécaniques qui se développent dans le matériau argileux et qui aboutissent à sa rupture locale par fissuration.

Des essais réalisés sur la kaolinite à différentes teneurs en eau initiales supérieures à sa limite de liquidité, ont montré que celles-ci n'ont pas un effet significatif sur son comportement durant la dessiccation. D'autre part, l'amendement de l'argile avec une fraction granulaire a rendu la rupture plus rapide lors de la dessiccation tout en améliorant sa résistance mécanique, notamment avec un amendement avec 25 % de sable. Cette rupture rapide peut être due à la diminution de la cohésion moyenne du matériau argileux lorsqu'il est mélangé avec un matériau granulaire non-cohésif.

(iii) Le dispositif Ring-Test ASTM C1581, à l'origine destiné à l'étude des matériaux cimentaires n'est pas adapté, par ses dimensions et sa sensibilité à l'étude de la dessiccation des argiles. Ceci a nécessité le développement d'un nouveau dispositif DIC-CRT.

Des essais de retrait empêché réalisés sur la kaolinite initialement préparée à $w = 1.5 w_L$ ont montré que la première fissure apparaît alors que le matériau est encore quasi-saturé. Dans le cas d'un séchage vertical (séchage par la surface supérieure), cette fissure s'amorce au niveau de l'interface argile-anneau métallique et se propage radialement vers le diamètre extérieur de l'échantillon. L'analyse CRT a montré qu'il existe un bon accord entre l'augmentation de la succion dans l'argile et les déformations provoquant la fissuration de l'échantillon. D'autre part, l'analyse DIC a montré que la fissuration se produit généralement selon le mode d'ouverture (mode I), autrement dit, une rupture par extension. Par ailleurs, l'analyse combinée des pics de déformations de cisaillement et circonférentielles lors de la bifurcation d'une fissure montre que ce phénomène se produit selon le mode mixte d'ouverture/glisement (modes I et II). La corrélation des résultats obtenus à l'aide des techniques DIC et CRT met en évidence la complémentarité de ces deux techniques.

L'analyse des déformations de retrait à l'aide des techniques DIC et CRT a montré que les conditions aux limites (rugosité du support) n'ont pas un effet significatif sur le comportement en déformation du matériau dans le dispositif DIC-CRT. Par contre, la teneur en eau initiale de

l'échantillon a montré un effet significatif sur sa densité de retrait global à la fin de la dessiccation.

Afin de minimiser la fissuration par dessiccation des argiles, différents types de renforts sont testés. Une baisse significative de la densité de fissuration en fonction du pourcentage de fibres de lin (jusqu'à 30 % dans les limites testées dans le cadre de ces travaux) est observée. De même, l'analyse CRT a montré que ces renforts n'ont pas un effet significatif sur l'initiation des fissures. Par contre, l'analyse DIC a montré une réduction significative de l'intensité des fissures en fonction du pourcentage de renfort. Ceci indique que le renfort par fibres de lin, malgré qu'il n'a pas d'effet significatif sur l'initiation de la fissuration, permet de ralentir et de limiter sa propagation dans le matériau.

Par ailleurs, les conditions aux limites hygrométriques conditionnent les cinétiques de séchage. Ainsi une augmentation de la contrainte maximale de traction à la rupture est constatée lorsque l'humidité relative ambiante imposée est élevée. Cette augmentation met en évidence l'influence de la cinétique du séchage sur la résistance mécanique de l'argile.

Perspectives

La comparaison qualitative entre l'évolution des contraintes totales et de la succion a montré que la succion a un effet significatif sur le comportement mécanique des sols argileux. Cependant, cette approche qualitative nécessite d'être complétée par une approche quantitative, afin d'étudier l'ampleur de la contribution de la succion à la contrainte totale dans les argiles. Cette approche s'avère être délicate de point de vue physique, du fait de la complexité de la microstructure et de la physico-chimie des sols argileux. En effet, chercher à relier la succion à la contrainte totale passe nécessairement par une interprétation des contraintes internes d'origine capillaire induites par la succion. En d'autres termes, définir une notion de contrainte effective adaptée à l'argile tout au long de cette dessiccation, depuis son état initial saturé et jusqu'à sa teneur en eau résiduelle, en passant par son point de rentrée d'air.

Par ailleurs, du point de vue techniques expérimentales, une réflexion sur la possibilité d'accéder à des mesures locales de la succion tout au long du processus de séchage permettrait de mieux lier succion et contrainte mécanique au voisinage des discontinuités, comme les fissures.

Références bibliographiques

A

[AASHTO, 2008]

AASHTO PP 34; AASHTO PP 34-99 and AASHTO PP 334-08. (2008). Standard Method of Test for Estimating the Cracking Tendency of Concrete. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, USA.

[Abou Najm, 2009]

Abou Najm, M., Mohtar, R. H., Weiss, J., & Braudeau, E. (2009). Assessing internal stress evolution in unsaturated soils. *Water Resources Research*, 45(5).

[Abu-Hejleh, 1995]

Abu-Hejleh, A. N., & Znidarčić, D. (1995). Desiccation theory for soft cohesive soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(6), 493-502.

[Adrienne, 2003]

Adrienne, P. (2003). *L'argile, médecine ancestrale de la tradition aux preuves scientifiques*, éditions Amirys SPRL, ISBN : 2-930353-15-5.

[Akazawa, 1953]

Akazawa, T. (1953). Tension Test Methods for Concretes, International Union of Testing and Research Laboratories for-Materials and Structures (RILEM). Paris, Bulletin, 16, 11-23.

[Al Qabany, 2012]

Al Qabany, A., Soga, K., & Santamarina, C. (2012). Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(8), 992-1001.

[Amarasiri, 2011]

Amarasiri, A. L., Kodikara, J. K., & Costa, S. (2011). Numerical modelling of desiccation cracking. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 35(1), 82-96.

[Amarisiri, 2014]

Amarisiri, A., Shannon, B., & Kodikara, J. (2014). Numerical modelling of desiccation cracking in a restrained ring test. *Canadian geotechnical journal*, 51(1), 67-76.

[Ameur, 2016]

Ameur, L. I. (2016). Étude expérimentale du phénomène de l'endommagement et de la fissuration d'une matrice poreuse. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, France.

[Andrianatrehina, 2016]

Andrianatrehina, S. R. (2016). Comportement hydro-mécanique des sols fins compactés au voisinage de la saturation : application aux remblais routiers. Thèse de doctorat. Université Le Havre Normandie, France.

[Anger, 2009]

Anger, R., Fontaine, L., Houben, H., Doat, P., & Van Damme, H. (2009). Bâtir en terre. Du grain de sable à l'architecture. Paris, Belin/Cité des sciences et de l'industrie.

[Anggraini, 2015]

Anggraini, V., Asadi, A., Huat, B. B., & Nahazanan, H. (2015). Effects of coir fibers on tensile and compressive strength of lime treated soft soil. *Measurement*, 59, 372-381.

[Approflon, 2010]

<https://www.approflon.com/semi-finis/semi-finis-ptfe/>

[ASTM, 1984]

ASTM C496. (1984). Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. *Annual Book of ASTM Standards*, 0.042, 336-41.

[ASTM, 2016]

ASTM C1581/C1581M-16; ASTM C1581-04 and ASTM C1581/C1581M-09a. (2016). Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

[Avila, 2004]

Avila, G. (2004). Study of shrinkage and cracking of clays - Application to clay in Bogota. Thèse de doctorat, Polytechnic University of Catalunya, Espagne.

[Avila, 2013]

Avila, G., Ledesma, A., & Lloret, A. (2013). One-dimensional cracking model in clayey soils. In *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris (France), 1077-1080.

B

[Bavelard, 2006]

Bavelard, G., & Beinish, H. (2006). Guide de bonnes pratiques des essais de compression sur éprouvettes. Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton.

[Baveye, 1989]

Baveye, P., & Valocchi, A. (1989). An evaluation of mathematical models of the transport of biologically reacting solutes in saturated soils and aquifers. *Water Resources Research*, 25(6), 1413-1421.

[Beddiar, 2005]

Beddiar, K., Fen-Chong, T., Dupas, A., Berthaud, Y., & Dangla, P. (2005). Role of pH in electro-osmosis: experimental study on NaCl–water saturated kaolinite. *Transport in Porous media*, 61(1), 93-107.

[Benchabane, 2006]

Benchabane, A. (2006). Etude du comportement rhéologique de mélanges argiles-polymères : Effets de l'ajout de polymères. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur - Strasbourg I, France.

[Besnard, 2006]

Besnard, G., Hild, F., & Roux, S. (2006). “Finite-element” displacement fields analysis from digital images: application to Portevin-Le Châtelier bands. *Experimental Mechanics*, 46(6), 789-803.

[Biarez, 1962]

Biarez, J. (1962). Contribution à l'étude des propriétés mécaniques des sols et des matériaux pulvérulents. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, France.

[Bishop, 1959]

Bishop, A. W. (1959). The principle of effective stress. *Teknisk ukeblad*, 39, 859-863.

[Bolt, 1955]

Bolt, G. H. (1955). Analysis of the validity of the Gouy-Chapman theory of the electric double layer. *Journal of Colloid Science*, 10(2), 206-218.

[Bolt, 1956]

Bolt, G. H. (1956). Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clays. *Geotechnique*, 6(2), 86-93.

[Bompard, 2010]

Bompard, P. (2010), Internal report TOTAL, Ecole Centrale Paris, France.

[Bresler, 1969]

Bresler, E., Kemper, W. D., & Hanks, R. J. (1969). Infiltration, redistribution, and subsequent evaporation of water from soil as affected by wetting rate and hysteresis. *Soil Science Society of America Journal*, 33(6), 832-840.

[Brigatti, 2006]

Brigatti, M.F., Galau, E. & Theng, B.K.G. (2006). Chapter 2: Structures and mineralogy of clay minerals. *Handbook of Clay Science*. Ed Elsevier, 19-86.

[Brindley, 1946]

Brindley, G. W., & Robinson, K. (1946). The structure of kaolinite. *Mineralogical Magazine and Journal of the Mineralogical Society*, 27(194), 242-253.

[Bronswijk, 1988]

Bronswijk, J. J. B. (1988). Modeling of water balance, cracking and subsidence of clay soils. *Journal of Hydrology*, 97, 199-212.

[Bronswijk, 1991]

Bronswijk, J. J. B. (1991). Relation between vertical soil movements and water-content changes in cracking clays. *Soil Science Society of America Journal*, 55(5), 1220-1226.

C

[Caner, 2011]

Caner, L. (2011). *Phyllosilicates des sols : de l'identification à la quantification*. Sciences de la Terre, Soutenance HDR, Université de Poitiers.

[Carlson, 1988]

Carlson, R. W., & Reading, T. J. (1988). Model study of shrinkage cracking in concrete building walls. *Structural Journal*, 85(4), 395-404.

[Carlson, 2000]

Carlson, W. D., Denison, C., & Ketcham, R. A. (2000). High-resolution X-ray computed tomography as a tool for visualization and quantitative analysis of igneous textures in three dimensions. *Visual Geosciences*, 4(3), 1-14.

[Carneiro, 1953]

Carneiro, F. L. B. (1953). Concrete Tensile Strength, International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures (RILEM). Paris, Bulletin, 13, 97-123.

[Chamley, 1969]

Chamley, H. (1969). Quelques modalités de la sédimentation argileuse marine aux environs de l'île de Crète. *Bull. Mus. Anthropol. Préhist. Monaco*, 14, 26-48.

[Chapman, 1913]

Chapman, D. L. (1913). LI. A contribution to the theory of electrocapillarity. *The London, Edinburgh, and Dublin philosophical magazine and journal of science*, 25(148), 475-481.

[Chauhan, 2019]

Chauhan, P., El Hajjar, A., Prime, N., & Plé, O. (2019). Unsaturated behavior of rammed earth: Experimentation towards numerical modelling. *Construction and Building Materials*, 227, 116646.

[Chebbi, 2020]

Chebbi, M., Guiras, H., & Jamei, M. (2020). Tensile behaviour analysis of compacted clayey soil reinforced with natural and synthetic fibers. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24(3), 354-380.

[Corte, 1960]

Corte, A. E., & Higashi, A. (1960). Experimental Research on Desiccation Cracks in Soil, Report No. 66. US Army Snow, Ice, and Permafrost Research Establishment, Corps of Engineers, Wilmette, IL, USA, 1-48.

[Costa, 2010]

Costa, W. D. S. M. (2010). Study of desiccation cracking and fracture properties of clay soils. Thèse de doctorat. Université Monash, Australie.

[Costa, 2018]

Costa, S., Kodikara, J., Barbour, S. L., & Fredlund, D. G. (2018). Theoretical analysis of desiccation crack spacing of a thin, long soil layer. *Acta Geotechnica*, 13(1), 39-49.

D

[Dafalla, 2013]

Dafalla, M. A. (2013). Effects of clay and moisture content on direct shear tests for clay-sand mixtures. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013.

[De Laplace, 1847]

De Laplace, P. S. (1847). *Œuvres complètes de Laplace*. (Vol. 1). Imprimerie royale.

[Derjaguin, 1941]

Derjaguin, B., & Landau, L. (1941). The theory of stability of highly charged lyophobic sols and coalescence of highly charged particles in electrolyte solutions. *Acta Physicochim. URSS*, 14(633-52), 58.

[Divya, 2014]

Divya, P. V., Viswanadham, B. V. S., & Gourc, J. P. (2014). Evaluation of tensile strength-strain characteristics of fiber-reinforced soil through laboratory tests. *Journal of Materials in civil Engineering*, 26(1), 14-23.

[Dixon, 1985]

Dixon, D. A., Gray, M. N., & Thomas, A. W. (1985). A study of the compaction properties of potential clay-sand buffer mixtures for use in nuclear fuel waste disposal. *Engineering geology*, 21(3-4), 247-255.

[Dong, 2014]

Dong, W., Zhou, X., & Wu, Z. (2014). A fracture mechanics-based method for prediction of cracking of circular and elliptical concrete rings under restrained shrinkage. *Engineering Fracture Mechanics*, 131, 687-701.

[Durelli, 1962]

Durelli, A. J., & Parks, V. (1962). Relationship of size and stress gradient to brittle failure stress. *Proc. 4th US National Congress of Applied Mechanics*, 931, 938.

E

[Eid, 2015]

Eid, J., Taibi, S., Fleureau, J. M., & Hattab, M. (2015). Drying, cracks and shrinkage evolution of a natural silt intended for a new earth building material. Impact of reinforcement. *Construction and Building Materials*, 86, 120-132.

[Eid, 2016]

Eid, J. (2016). *Élaboration d'un éco-géo-matériau à base de terre crue*. Thèse de doctorat, Université Le Havre Normandie, France.

[El Hajjar, 2020]

El Hajjar, A., Ouahbi, T., Eid, J., Hattab, M., & Taibi, S. Shrinkage cracking of unsaturated fine soils: New experimental device and measurement techniques. *Strain*, e12352. <https://doi.org/10.1111/str.12352>

F

[Fairhurst, 1964]

Fairhurst, C. (1964). On the validity of the Brazilian test for brittle materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1(4), 535-546.

[Filet, 2012]

Filet, A. E., Gadret, J. P., Loygue, M., & Borel, S. (2012). Biocalcis and its applications for the consolidation of sands. In *Grouting and deep mixing 2012* (pp. 1767-1780).

[Fleureau, 1988]

Fleureau, J. M., Wignyardarsono, L., & Zerhouni, M. I. (1988). Effect of surfactants on the mechanical properties of a kaolinite in relation to the solid-liquid contact angles. *Canadian Geotechnical Journal*, 25(4), 675-683.

[Fleureau, 1993]

Fleureau, J. M., Kheirbek-Saoud, S., Soemitro, R., & Taibi, S. (1993). Behavior of clayey soils on drying-wetting paths. *Canadian geotechnical journal*, 30(2), 287-296.

[Frydman, 1964]

Frydman, S. (1964). The applicability of the Brazilian (indirect tension) test to soils. *Australian journal of applied science*, 15, 335-343.

[Gantzer, 2002]

Gantzer, C. J., & Anderson, S. H. (2002). Computed tomographic measurement of macroporosity in chisel-disk and no-tillage seedbeds. *Soil and Tillage Research*, 64(1-2), 101-111.

[Gautier, 2008]

Gautier, M. (2008). Interactions entre argile ammoniée et molécules organiques dans le contexte du stockage des déchets. *Géologie appliquée*. Thèse de doctorat. Université d'Orléans, France.

[Gokhale, 1970]

Gokhale, K. V. G. K., & Anandakrishnan, M. (1970). Role of Active Clay in the Shrinkage Behavior in Multi-component Clay Sand Systems. *Soils and Foundations, Japanese Soc. Of Soil Mech. Found. Eng.*, 10(3), 92-94.

[Gouy, 1910]

Gouy, M. (1910). Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte. *J. Phys, Radium (Paris)*, 9, 457-468.

[Grahame, 1947]

Grahame, D. C. (1947). The electrical double layer and the theory of electrocapillarity. *Chemical reviews*, 41(3), 441-501.

[Grevers, 1989]

Grevers, M. C. J., JONG, E. D., & St. Arnaud, R. J. (1989). The characterization of soil macroporosity with CT scanning. *Canadian journal of soil science*, 69(3), 629-637.

[Griffith, 1921]

Griffith, A. A. (1921). The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical transactions of the royal society of London*, A221(582-593), 163-198.

[Grim, 1961]

Grim, R. E., & Vernet, J. P. (1961). Etude par diffraction des minéraux argileux de vases méditerranéennes. *Schweiz. Miner. Petrogr. Mitt*, 41, 65.

[Gruner, 1932]

Gruner, J. W. (1932). The crystal structure of kaolinite. *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*, 83(1-6), 75-88.

[Grzybowski, 1989]

Grzybowski, M., & Shah, S. P. (1989). Model to predict cracking in fiber reinforced concrete due to restrained shrinkage. *Magazine of Concrete Research*, 41(148), 125-135.

[Güven, 1992]

Güven, N. C. M. S., & Pollastro, R. M. (1992). Clay-water Interface and its Rheological Implications. CMS workshop lectures vol. 4. The Clay Minerals Society, Boulder, Colorado, USA.

H

[Haines, 1923]

Haines, W. B. (1923). The volume-changes associated with variations of water content in soil. The Journal of agricultural science, 13(3), 296-310.

[Hammad, 2010]

Hammad, T. (2010). Comportement des sédiments marins de grande profondeur : approche multiéchelle. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, France.

[Haouas, 2007]

Haouas, A. (2007). Comportement au jeune âge des matériaux cimentaires - Caractérisation et modélisation chimio-hydro-mécanique du retrait. Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Paris, France.

[Harison, 1994]

Hanson, J. A., Hardin, B. O., & Mahboub, K. (1994). Fracture toughness of compacted cohesive soils using ring test. Journal of geotechnical engineering, 120(5), 872-891.

[He, 2004]

He, Z., Zhou, X., & Li, Z. (2004). New experimental method for studying early-age cracking of cement-based materials. Materials Journal, 101(1), 50-56.

[Hejazi, 2012]

Hejazi, S. M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S. M., & Zadhoush, A. (2012). A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. Construction and building materials, 30, 100-116.

[Hendricks, 1942]

Hendricks, S. B. (1942). Lattice structure of clay minerals and some properties of clays. The Journal of Geology, 50(3), 276-290.

[Hofmann, 1933]

Hofmann, U., Endell, K., & Wilm, D. (1933). Structure cristalline et gonflement de la montmorillonite (En allemand : Kristallstruktur und quellung von montmorillonit). Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials, 86(1-6), 340-348.

[Hondros, 1959]

Hondros, G. (1959). The evaluation of Poisson's ratio and the modulus of materials of low tensile resistance by the Brazilian test with particular reference to concrete. *Australian Journal of Applied Science*, 10(3) :243-268.

[Hossain, 2004]

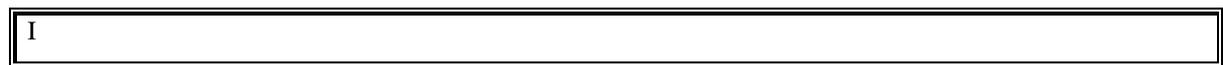
Hossain, A. B., & Weiss, J. (2004). Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens. *Cement and Concrete Composites*, 26(5), 531-540.

[Hubert, 2008]

Hubert, F. (2008). Modélisation des diffractogrammes de minéraux argileux en assemblages complexes dans deux sols de climat tempéré : implications minéralogique et pédologique. Thèse de doctorat, Université de Poitiers.

[Hueckel, 1992]

Hueckel, T. A. (1992). Water–mineral interaction in hygromechanics of clays exposed to environmental loads: a mixture-theory approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(6), 1071-1086.



[Indarto, 1991]

Indarto (1991). Comportement mécanique et compactage des matériaux de barrage. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, France.

[Inglis, 1913]

Inglis, C. E. (1913). Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. *Transactions of the Institution of Naval Architects*, 55, 219-241.

[Irwin, 1948]

Irwin, G. R. (1948). *Fracture dynamics in fracturing of metals*. American Society of Metals, Cleveland, Ohio.

[Irwin, 1954]

Irwin, G.R., & Kies, J.A. (1954). Critical energy rate analysis of fracture strength. *Welding Journal Research Supplement*, 33 (4), 193s-198s.

[Irwin, 1957]

Irwin, G. R. (1957). Analysis of stresses and strains near the end of a crack transversing a plate, *Journal of Applied Mechanics*, 24, 361-364.

[ISRM, 1978]

ISRM. (1978). Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 15, 99-103.

J

[Jaeger, 1969]

Jaeger, J. C., Cook, N. G., & Zimmerman, R. (1969). *Fundamentals of Rock Mechanics* (Vol. 513). Malden, MA: Blackwell Publishing, London, England.

[Jaradat, 2017]

Jaradat, K. A., Darbari, Z., Elbakhshwan, M., Abdelaziz, S. L., Gill, S. K., Dooryhee, E., & Ecker, L. E. (2017). Heating-freezing effects on the orientation of kaolin clay particles. *Applied Clay Science*, 150, 163-174.

[Jolivet, 1994]

Jolivet, J.P. (1994). De la solution à l'oxyde : Condensation des cations en solution aqueuse, chimie de surface des oxydes. International. editions/CNRS edition Paris, 387.

[Jones, 2018]

Jones, E. M., & Iadicola, M. A. (2018). A good practices guide for digital image correlation. International Digital Image Correlation Society.

K

[Kanema, 2016]

Kanema, J. M., Eid, J., & Taibi, S. (2016). Shrinkage of earth concrete amended with recycled aggregates and superplasticizer: Impact on mechanical properties and cracks. *Materials & Design*, 109, 378-389.

[Keller, 1985]

Keller, W.D. (1985). The nascence of clay minerals. *Clays and Clay Minerals*, 33, 161-172.

[Kenney, 1977]

Kenney, T. C. (1977). Residual strength of mineral mixtures. *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics*, 1, 155-160.

[Kindle, 1917]

Kindle, E. M. (1917). Some factors affecting the development of mud cracks, *The Journal of Geology*, 25(2), 135-144.

[Kindle, 1923]

Kindle, E.M. (1923). Notes on Mud Crack and Ripple Mark in Recent Calcareous Sediments, *Journal of Geology*, 31(2), 138-145.

[Kodikara, 1998]

Kodikara, J., Barbour, S. L., & Fredlund, D. G. (1998). An idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation: Discussion. *Canadian geotechnical journal*, 35(6), 1112-1114.

[Kodikara, 2002]

Kodikara, J., Barbour, S., & Fredlund, D. G. (2002). Structure development in surficial heavy clay soils: a synthesis of mechanisms. *Australian Geomechanics: Journal and News of the Australian Geomechanics Society*, 37(3), 25.

[Kodikara, 2004]

Kodikara, J. K., Nahlawi, H., & Bouazza, A. (2004). Modelling of curling in desiccating clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(3), 560-566.

[Kodikara, 2006]

Kodikara, J. K., & Choi, X. (2006). A simplified analytical model for desiccation cracking of clay layers in laboratory tests. *Proc. UNSAT2006 Conference, Arizona (USA)*, 2558-2567.

[Kodikara, 2013]

Kodikara, J., & Costa, S. (2013). Desiccation cracking in clayey soils: mechanisms and modelling. In *Multiphysical testing of soils and shales* (pp. 21-32). Springer, Berlin, Heidelberg.

[Konrad, 1997]

Konrad, J. M., & Ayad, R. (1997). Desiccation of a sensitive clay: field experimental observations. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6), 929-942.

[Kouta, 2020]

Kouta, N., Saliba, J., & Saiyouri, N. (2020). Effect of flax fibers on early age shrinkage and cracking of earth concrete. *Construction and Building Materials*, 254, 119315.

[Kovler, 1993]

Kovler, K., Sikuler, J., & Bentur, A. (1993). Restrained shrinkage tests of fiber-reinforced concrete ring specimens: effect of core thermal expansion. *Materials and Structures*, 26(4), 231-237.

[Krishnayya, 1974]

Krishnayya, A. V. G., & Eisenstein, Z. (1974). Brazilian tensile test for soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 11(4), 632-642.

L

[Lachenbruch, 1961]

Lachenbruch, A. H. (1961). Depth and spacing of tension cracks. *Journal of Geophysical Research*, 66(12), 4273-4292.

[Lambe, 1953]

Lambe, T. W. (1953). The structure of inorganic soil. In Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 79(10), 1-49.

[Lambe, 1958]

Lambe, T. W. (1958). The structure of compacted clay. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 84(2), 1-34.

[Lambe, 1960]

Lambe, T. W. (1960). A mechanistic picture of shear strength in clay. In Proc. ASCE Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, (Vol. 437).

[Lecocq, 2003]

Lecocq, N., & Vandewalle, N. (2003). Dynamics of crack opening in a one-dimensional desiccation experiment. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 321(3-4), 431-441.

[Lee, 1982]

Lee, S. L., Lo, K. W., & Lee, F. H. (1982). A numerical model for crack propagation in soils. Proceedings of the international conference on finite element methods, Shanghai, 405-411.

[Lee, 1988]

Lee, F. H., Lo, K. W., & Lee, S. L. (1988). Tension crack development in soils. Journal of geotechnical engineering, 114(8), 915-929.

[Le Pluart, 2004]

Le Pluart, L., Duchet, J., Sautereau, H., Halley, P., & Gerard, J. F. (2004). Rheological properties of organoclay suspensions in epoxy network precursors. Applied clay science, 25(3-4), 207-219.

[Li, 2003]

Li, H., Wei, S., Qing, C., & Yang, J. (2003). Discussion on the position of the shear plane. Journal of colloid and interface science, 258(1), 40-44.

[Liu, 2020]

Liu, B., Zhu, C., Tang, C. S., Xie, Y. H., Yin, L. Y., Cheng, Q., & Shi, B. (2020). Bio-remediation of desiccation cracking in clayey soils through microbially induced calcite precipitation (MICP). Engineering Geology, 264, 105389.

[Lloret, 1998]

Lloret, A., Ledesma, A., Rodriguez, R. L., Sanchez, M. J., Olivella, S. & Suriol, J. (1998). Crack initiation in drying soils. Proc. 2nd International Conference on Unsaturated Soils, Beijing, China, 497-502.

[Lu, 2007]

Lu, N., Wu, B., & Tan, C. P. (2007). Tensile strength characteristics of unsaturated sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(2), 144-154.

[Luckham, 1999]

Luckham, P. F., & Rossi, S. (1999). The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. *Advances in colloid and interface science*, 82(1-3), 43-92.

M

[Maison, 2008]

Maison, T., Laouafa, F., & Fleureau, J. M. (2008). Analyse microscopique des mécanismes de dessiccation et de gonflement des sols argileux. *Journées Nationales de Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur JNGG'08*, Jun 2008, Nantes, France.

[Malhotra, 1967]

Malhotra, V. M., & Zoldners, N. G. (1967). Comparison of ring-tensile strength of concrete with compressive, flexural, and splitting-tensile strengths. *Journal of Materials*, 160-199.

[Marshall, 1935]

Marshall, C. E. (1935). Layer lattices and the base-exchange clays. *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*, 91(1-6), 433-449.

[Milot, 1964]

Milot, G. (1964). *Géologie des argiles. Altération, Sédimentologie, Géochimie.*, Paris, pp. 499.

[Mitchell, 1993]

Mitchell, J. K., & Soga, K. (1993). *Fundamentals of Soil Behavior*, John Wiley & Sons. Inc., New York, 422.

[Mokaya, 1995]

Mokaya, R., & Jones, W. (1995). Pillared clays and pillared acid-activated clays: a comparative-study of physical, acidic, and catalytic properties. *Journal of Catalysis*, 153(1), 76-85.

[Moon, 2006a]

Moon, J. H., Rajabipour, F., Pease, B., & Weiss, J. (2006). Quantifying the influence of specimen geometry on the results of the restrained ring test. *Journal of ASTM international*, 3(8), 1-14.

[Moon, 2006b]

Moon, J.H., & Weiss, J. (2006). Estimating residual stress in the restrained ring test under circumferential drying, *Cement Concr. Compos.* 28 (5) 486-496.

[Morris, 1992]

Morris, P. H., Graham, J., & Williams, D. J. (1992). Cracking in drying soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(2), 263-277.

[Müller, 1961]

Müller, G. (1961). Les sédiments récents dans le golfe de Naples (En allemand : Die rezenten sedimente im Golf von Neapel). *Beiträge zur Mineralogie und Petrographie*, 8(1), 1-20.

[Mustafaev, 1989]

Mustafaev, A.A. (1989). Les fondations sur sols affaissables et gonflants (En russe : Fundamenty na prosadochnykh i nabukhayushchikh gruntakh). *Vyshchaya Shkola, Moscou*, 1-358.

N

[Norrish, 1954]

Norrish, K. (1954). The swelling of montmorillonite. *Discussions of the Faraday society*, 18, 120-134.

O

[Orowan, 1950]

Orowan, E. (1950). Fundamentals of brittle behavior in metals. *Fatigue and fracture of metals*, 139-167.

P

[Page, 2017]

Page, J., Khadraoui, F., Boutouil, M., & Gomina, M. (2017). Multi-physical properties of a structural concrete incorporating short flax fibers. *Construction and Building Materials*, 140, 344-353.

[Pauling, 1930]

Pauling, L. (1930). The structure of the micas and related minerals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 16(2), 123.

[Pedro, 1994]

Pedro, G. (1994). Les conditions de formation des constituants secondaires. *Pédologie. 2-Constituants et propriétés du sol*. Bonneau, M. Souchier, B., Paris, 665.

[Péron, 2008]

Péron, H. (2008). Desiccation cracking of soils. *Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse*.

[Perret, 1999]

Perret, J., Prasher, S. O., Kantzas, A., & Langford, C. (1999). Three-dimensional quantification of macropore networks in undisturbed soil cores. *Soil Science Society of America Journal*, 63(6), 1530-1543.

[Peters, 1982]

Peters, W. H., & Ranson, W. F. (1982). Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Optical engineering*, 21(3), 213427.

[Petrovic, 1982]

Petrovic, A. M., Siebert, J. E., & Rieke, P. E. (1982). Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning 1. *Soil Science Society of America Journal*, 46(3), 445-450.

[Peyton, 1992]

Peyton, R. L., Haeffner, B. A., Anderson, S. H., & Gantzer, C. J. (1992). Applying X-ray CT to measure macropore diameters in undisturbed soil cores. *Geoderma*, 53(3-4), 329-340.

[Phillips, 1997]

Phillips, D. H., & Lannutti, J. J. (1997). Measuring physical density with X-ray computed tomography. *Ndt & E International*, 30(6), 339-350.

[Pons, 1980]

Pons, C. H. (1980). Evidence of relationships between texture and structure in smectite systems by small angle synchrotron X ray scattering; Thèse de l'Université d'Orléans, France.

[Pusch, 1982]

Pusch, R. (1982). Mineral-water interactions and their influence on the physical behavior of highly compacted Na bentonite. *Canadian Geotechnical Journal*, 19(3), 381-387.

R

[Réthoré, 2009]

Réthoré, J., Roux, S., & Hild, F. (2009). An extended and integrated digital image correlation technique applied to the analysis of fractured samples: The equilibrium gap method as a mechanical filter. *European Journal of Computational Mechanics*, 18(3-4), 285-306.

[Rhaïem, 1986]

Rhaïem, H. B., Tessier, D., & Pons, C. H. (1986). Comportement hydrique et évolution structurale et texturale des montmorillonites au tours d'un cycle de dessiccation-humectation : partie I. Cas des montmorillonites calciques. *Clay Minerals*, 21(1), 9-29.

[Rice, 1968]

Rice, J. R. (1968). A path independent integral and the approximate analysis of strain concentrations by notches and cracks. *Journal of Applied Mechanics*, 379-386.

[Rosenqvist, 1955]

Rosenqvist, I. T. (1955). Investigations in the clay-electrolyte-water system. Norwegian Geotechnical Institute.

[Roux, 2009]

Roux, J. (2009). *Pratique de l'eurocode 2*. Editions Eyrolles.

S

[Samouëlian, 2004]

Samouëlian, A., Richard, G., Cousin, I., Guerin, R., Bruand, A., & Tabbagh, A. (2004). Three-dimensional crack monitoring by electrical resistivity measurement. *European Journal of Soil Science*, 55(4), 751-762.

[Sanchez, 2013]

Sanchez, M., Atique, A., Kim, S., Romero, E., & Zielinski, M. (2013). Exploring desiccation cracks in soils using a 2D profile laser device. *Acta Geotechnica*, 8(6), 583-596.

[Sarkar, 2000]

Sarkar, S. L., Herbert, B. E., & Scharlin, R. J. (2000). Injection stabilization of expansive clays using a hydrogen ion exchange chemical. In *Advances in Unsaturated Geotechnics*, 487-516.

[Schreier, 2009]

Schreier, H., Orteu, J. J., & Sutton, M. A. (2009). *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications (Vol. 1)*. Boston, MA: Springer-Verlag US.

[See, 2003]

See, H. T., Attiogbe, E. K., & Miltenberger, M. A. (2003). Shrinkage cracking characteristics of concrete using ring specimens. *Materials Journal*, 100(3), 239-245.

[Seed, 1961]

Seed, H. B., Mitchell, J. K., & Chan, C. K. (1961). The strength of compacted cohesive soils, 877-964.

[Segetin, 2007]

Segetin, M., Jayaraman, K., & Xu, X. (2007). Harakeke reinforcement of soil-cement building materials: manufacturability and properties. *Building and environment*, 42(8), 3066-3079.

[Seifert, 2007]

Seifert, D., & Engesgaard, P. (2007). Use of tracer tests to investigate changes in flow and transport properties due to bioclogging of porous media. *Journal of contaminant hydrology*, 93(1-4), 58-71.

[Shannon, 2015]

Shannon, B., Kodikara, J., & Rajeev, P. (2015). The use of restrained ring test method for soil desiccation studies. *Geotechnical Testing Journal*, 38(1), 98-112.

[Shin, 2011]

Shin, H., & Santamarina, J. C. (2011). Desiccation cracks in saturated fine-grained soils: particle-level phenomena and effective-stress analysis. *Géotechnique*, 61(11), 961-972.

[Soemitro, 1994]

Soemitro, R.A.A. (1994). Contribution à l'étude du rôle de la pression interstitielle négative dans le gonflement et d'autres aspects du comportement des sols non saturés. Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, France.

[Souli, 2004]

Souli, H., Fleureau, J. M., Trabelsi-Ayadi, M., & Kbir-Arighuib, N. (2004). Etude hydromécanique et physicochimique d'une montmorillonite pour barrière anti-pollution. Conférence JNGG, Lille, 175-182.

[Souli, 2008]

Souli, H., Fleureau, J. M., Ayadi, M. T., & Besnard, M. (2008). Physicochemical analysis of permeability changes in the presence of zinc. *Geoderma*, 145(1-2), 1-7.

[Sridharan, 1970]

Sridharan, A. (1970). Some Studies on the Strength of Partly Saturated Clays. PhD Thesis, University Microfilms, Lafayette, Indiana.

[Stern, 1924]

Stern, O. (1924). La théorie de la double couche électrolytique (En allemand : Zur theorie der elektrolytischen doppelschicht). *Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie*, 30(21-22), 508-516.

[Stirk, 1954]

Stirk, G. B. (1954). Some aspects of soil shrinkage and the effect of cracking upon water entry into the soil. *Australian Journal of Agricultural Research*, 5(2), 279-296.

[Stirling, 2013]

Stirling, R. A., Simpson, D. J., & Davie, C. T. (2013). The application of digital image correlation to Brazilian testing of sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 60, 1-11.

[Swamy, 1979]

Swamy, R. N., & Stavrides, H. (1979). Influence of fiber reinforcement on restrained shrinkage and cracking. In *Journal Proceedings*, 76(3), 443-460.

T

[Taibi, 1994]

Taibi, S. (1994). Comportement mécanique et hydraulique des sols soumis à une pression interstitielle négative- Etude expérimentale et modélisation. Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, France.

[Taibi, 2007]

Taibi, S. (2007). Contribution à l'étude du comportement Thermo-Hydro-Mécanique des sols non saturés, Application à la géotechnique environnementale. Soutenance HDR, Université du Havre, France.

[Tang, 2000]

Tang, G. X., & Graham, J. (2000). A method for testing tensile strength in unsaturated soils. *Geotechnical Testing Journal*, 23(3), 377-382.

[Tang, 2018]

Tang, C. S., Wang, D. Y., Zhu, C., Zhou, Q. Y., Xu, S. K., & Shi, B. (2018). Characterizing drying-induced clayey soil desiccation cracking process using electrical resistivity method. *Applied Clay Science*, 152, 101-112.

[Tang, 2019]

Tang, C. S., Zhu, C., Leng, T., Shi, B., Cheng, Q., & Zeng, H. (2019). Three-dimensional characterization of desiccation cracking behavior of compacted clayey soil using X-ray computed tomography. *Engineering geology*, 255, 1-10.

[Tay, 2001]

Tay, Y. Y., Stewart, D. I., & Cousens, T. W. (2001). Shrinkage and desiccation cracking in bentonite-sand landfill liners. *Engineering Geology*, 60(1-4), 263-274.

[Terzaghi, 1936]

Terzaghi, K. V. (1936). The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear. In *First international conference on soil Mechanics*, 1936 (Vol. 1, pp. 54-59).

[Touret, 1990]

Touret, O., Pons, C. H., Tessier, D., & Tardy, Y. (1990). Study of the distribution of water of Mg²⁺ saturated clays at high water contents. *Clay minerals*, 25(2), 217-233.

[Vallejo, 2000]

Vallejo, L. E., & Mawby, R. (2000). Porosity influence on the shear strength of granular material-clay mixtures. *Engineering Geology*, 58(2), 125-136.

[Van Geet, 2000]

Van Geet, M., Swennen, R., & Wevers, M. (2000). Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocus X-ray computerised tomography. *Sedimentary Geology*, 132(1-2), 25-36.

[Van Genuchten, 1980]

Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.

[Verwey, 1948]

Verwey, E. J. W., Overbeek, J. T. G., & Van Nes, K. (1948). *Theory of the stability of lyophobic colloids: the interaction of sol particles having an electric double layer*. Elsevier Publishing Company.

[Vesga, 2006]

Vesga, L. F., & Vallejo, L. E. (2006). Direct and indirect tensile tests for measuring the equivalent effective stress in a kaolinite clay. In *Unsaturated Soils 2006* (pp. 1290-1301).

[Viswanadham, 2010]

Viswanadham, B. V. S., Jha, B. K., & Pawar, S. N. (2010). Influence of geofibers on the flexural behavior of compacted soil beams. *Geosynthetics International*, 17(2), 86-99.

[Wan, 1995]

Wan, A. W. L., Gray, M. N., & Graham, J. (1995). On the relations of suction, moisture content and soil structure in compacted clays. In *Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, France, 1*, 215-222.

[Wang, 2015]

Wang, Y., & Li, X. (2015). Experimental study on cracking damage characteristics of a soil and rock mixture by UPV testing. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(3), 775-788.

[Wang, 2017]

Wang, L. L., Zhang, G. Q., Hallais, S., Tanguy, A., & Yang, D. S. (2017). Swelling of shales: a multiscale experimental investigation. *Energy & Fuels*, 31(10), 10442-10451.

[Wei, 2014]

Wei, X. (2014). Etude micro-macro de la fissuration des argiles soumises à la dessiccation. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, France.

[Wei, 2016]

Wei, X., Hattab, M., Bompard, P., & Fleureau, J.M. (2016). Highlighting some mechanisms of crack formation and propagation in clays on drying path. *Géotechnique*, 66(4), 287-300.

[Wei, 2020]

Wei, X., Bicalho, K. V., El Hajjar, A., Taibi, S., Hattab, M., & Fleureau, J. M. (2020). Experimental Techniques for the Study of the Cracking Mechanisms in Drying Clays. *Geotechnical Testing Journal*, 44(2).

[Weiss, 2002]

Weiss, W. J., & Shah, S. P. (2002). Restrained shrinkage cracking: the role of shrinkage reducing admixtures and specimen geometry. *Materials and Structures*, 35(2), 85-91.

[Whitaker, 1977]

Whitaker, S. (1977). Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: a theory of drying. In *Advances in heat transfer* (Vol. 13, pp. 119-203). Elsevier.

[Wilson, 1999]

Wilson, M.J. (1999). The origin and formation of clay minerals in soils: Past, present and future perspectives. *Clay Minerals*, 34, 7-25.

Y

[Yigzaw, 2009]

Yigzaw, Z. (2009). Analyse des processus de retrait-gonflement de sols argileux en réponse à des sollicitations hydriques cycliques : rôle de la microstructure. Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, France.

[Young, 1805]

Young, T. (1805). An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical transactions of the royal society of London*, (95), 65-87.

Annexes

Annexe 1

Identification granulométrique à l'aide du microscope optique [Hammad, 2010]

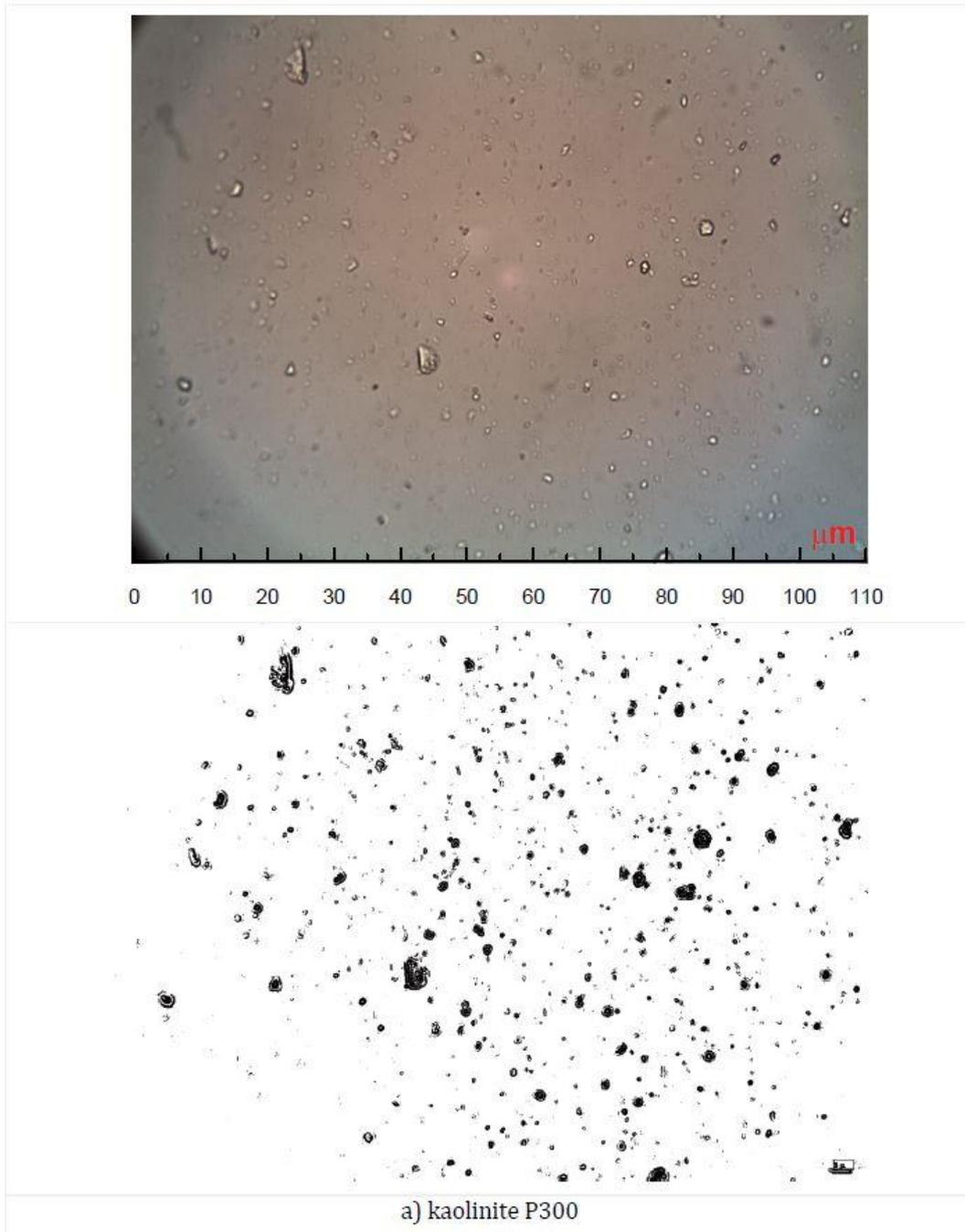


Figure A1.1 : Principe d'identification granulométrique de la kaolinite P300 à l'aide du microscope optique.

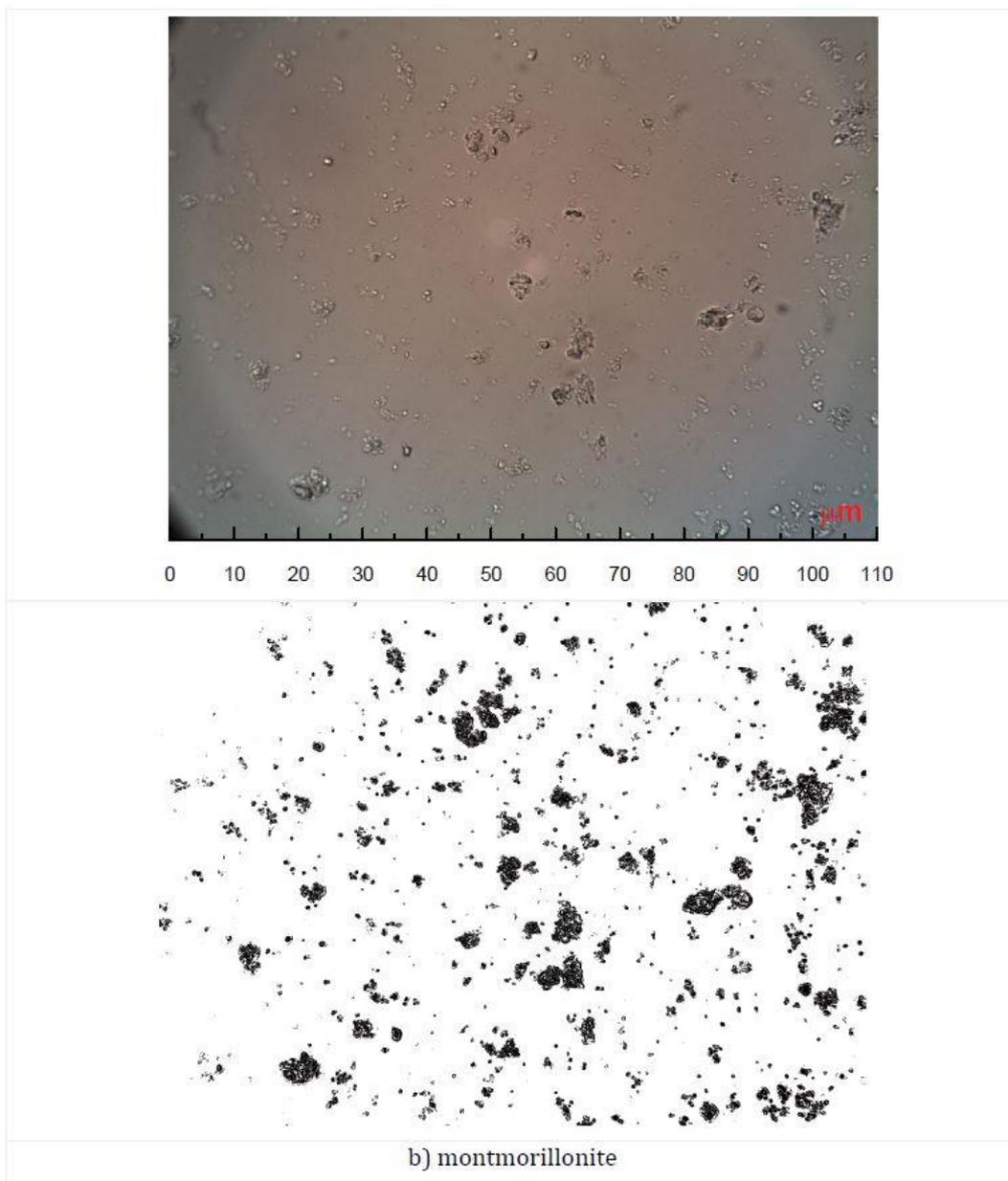


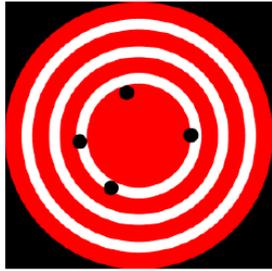
Figure A1.2 : Principe d'identification granulométrique de la montmorillonite grecque à l'aide du microscope optique.

Annexe 2(a)

Différence entre erreurs systématiques (*Systematic Error*)
et erreurs aléatoires (*Random Error*) [Jones, 2018].

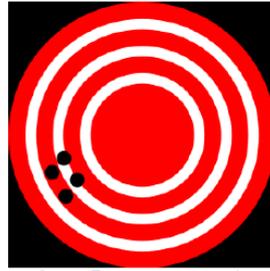
Precision vs Accuracy

Two types of errors: Random and Systematic



Accurate but not Precise

Large *Random Error*
Small *Systematic Error*



Precise but not Accurate

Small *Random Error*
Large *Systematic Error*

Figure A2.1 : Différence entre erreurs systématiques (*Systematic Error*) et erreurs aléatoires (*Random Error*).

Annexe 2(b)

Comparaison entre les résultats des logiciels VIC 2D et Istra 4D

Dans le but de comparer les déformations calculées par les deux logiciels VIC 2D et Istra 4D, un essai de dessiccation est réalisé sur une argile sous forme d'un anneau ayant un diamètre intérieur de 60 mm, un diamètre extérieur de 200 mm et une épaisseur de 30 mm. La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre l'évolution de la déformation principale majeure ϵ_1 pour ces deux logiciels sur un cercle tracé à un rayon de 35 mm par rapport au centre de l'anneau, à deux instants donnés t_1 et t_2 . On peut constater que les deux courbes se superposent avec de petits écarts, ce qui indique que les résultats des deux logiciels peuvent être considérés comme fiables.

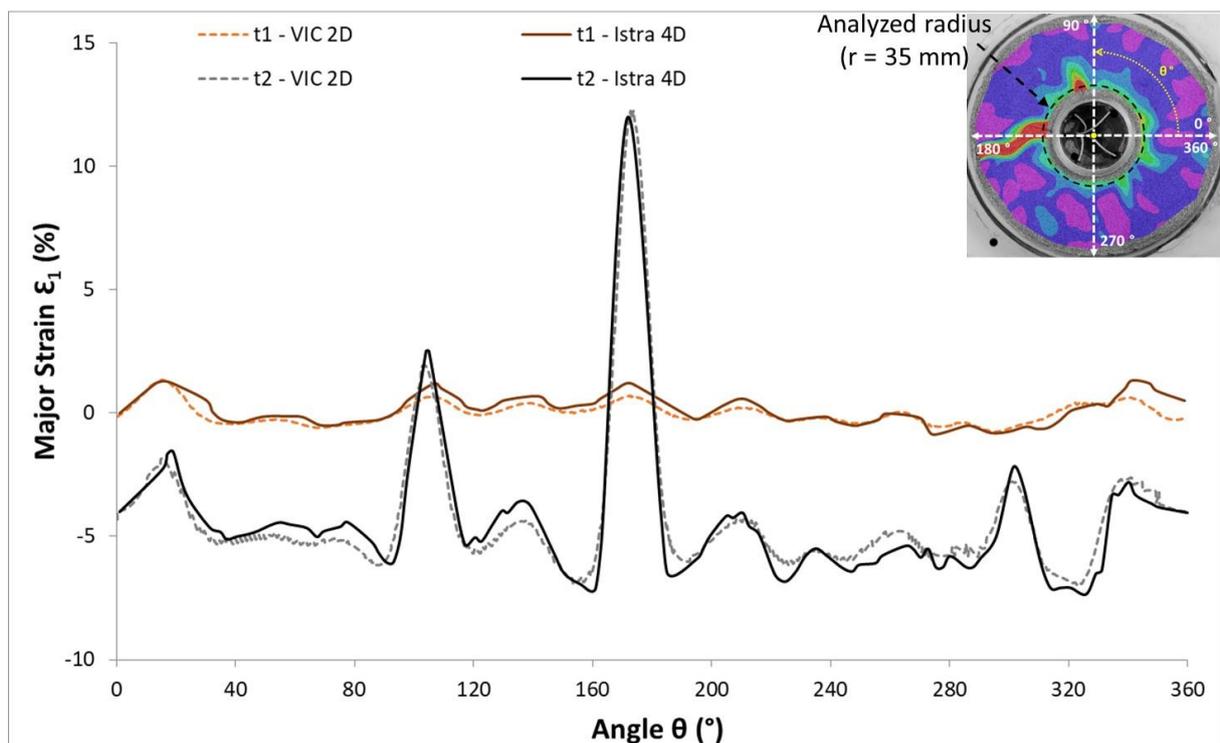


Figure A2.2 : Comparaison entre les déformations principales majeures mesurées par les logiciels VIC 2D et Istra 4D.

Annexe 3

Rainures tracées sur la plaque de PVC pour augmenter le frottement sol/support (EchA5).

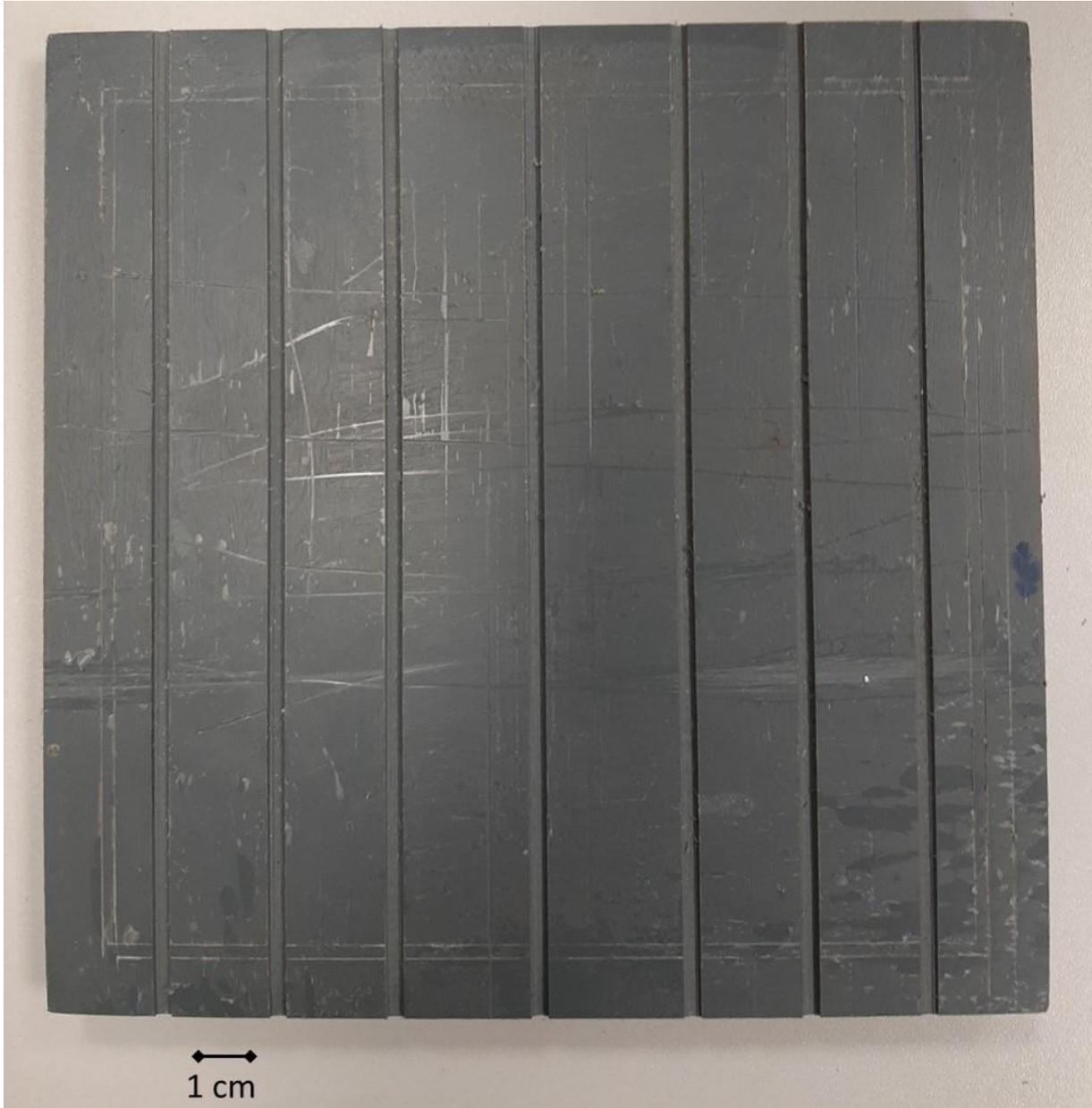


Figure A3.1 : Rainures tracées sur la plaque de PVC pour augmenter le frottement sol/support (EchA5).

Annexe 4

Vue du dessus de l'échantillon E1 à la fin de la dessiccation



Figure A4.1 : Vue du dessus de l'échantillon E1 à la fin de la dessiccation.

Annexe 5

CV – Ahmad El Hajjar

EL HAJJAR Ahmad

Adresse: Log 229 – 10 Rue Aviateur Guérin
76600 Le Havre

Tél: 07 50 20 39 74

E-mail: Ahmad.el-hajjar@doct.univ-lehavre.fr

Permis B – 26 ans.



FORMATION

- 2020 - 2021 Contrat temporaire d'enseignement et de recherche (ATER) temps partiel à l'**Université Le Havre Normandie**.
- 2017 - 2020 Doctorat en Génie Civil au LOMC (Laboratoire des Ondes et des Milieux Complexes) - **Université Le Havre Normandie**.
- 2016 - 2017 Master 2 IMACS (International Master in Advanced Clay Science).
Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées - Université de Poitiers
- 2015 - 2017 Diplôme Eau et Génie Civil - Parcours Construction et Géotechnique.
ENSIP (École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers)
Pfe: Influence de l'argile sur le comportement mécanique d'un mélange argile/ciment.
- 2014 - 2015 Master 1 - Spécialité Génie Civil - **Polytech Lille**.
- 2011 - 2014 Licence en Génie Civil (BTP) - **Université Libanaise - IUT**.
Pfe: Études de gros œuvre d'un centre commercial.
- 2010 - 2011 Baccalauréat (Sciences générales) - **Collège Universelle**.

EXPÉRIENCES PROFESSIONNELLES

- Avril /Août 2017** Stage de 18 semaines au sein du laboratoire "LOCIE".
Activités confiées: Préparation par compactage, caractérisation du sol, équilibrage en humidité, tests mécaniques.
Projet: Vulnérabilité du bâtiment en terre crue vis-à-vis des conditions hydriques.
- Juillet/Sept 2016** Stage de 10 semaines au sein de la société "KHATIB & ALAMI".
Fonction: Conducteur de travaux.
Projet: Construction d'un bâtiment résidentiel (Second œuvre).
- Avril / Juin 2014** Stage de 8 semaines au sein de la société "AZZOUHOUR".
Fonction: Conducteur de travaux.
Projet d'hydrologie urbaine, de routes, et de murs de soutènement.
- Juillet/Août 2013** Stage de 6 semaines au sein de la société "KHATIB & ALAMI".
Fonction: Assistant ingénieur.
Projet: Construction d'une tour d'habitation (Gros œuvre).

CONNAISSANCE LINGUISTIQUE

- Anglais

- Français

- Arabe

Liste des publications

❖ Articles publiés dans des revues :

- **El Hajjar A.**, Ouahbi T., Eid J., Hattab M., & Taibi, S. (2020), Shrinkage cracking of unsaturated fine soils: New experimental device and measurement techniques. *Strain*, 12352.
- Wei X., Bicalho K., **El Hajjar A.**, Taibi S., Hattab M., & Fleureau J. (2020), Experimental Techniques for the Study of the Cracking Mechanisms in Drying Clays. *Geotechnical Testing Journal*, 44(2).
- Chauhan P., **El Hajjar A.**, Prime N., & Plé O. (2019), Unsaturated behavior of rammed earth: Experimentation towards numerical modelling. *Construction and Building Materials*, 227, 116646.

❖ Articles publiés dans des colloques :

- **El Hajjar A.**, Chauhan P., Prime N., & Plé O. (2018, April). Effect of suction on the mechanical characteristics of uniformly compacted rammed earth. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 143, No. 1, p. 012045). IOP Publishing.
- **El Hajjar A.**, Chauhan P., Prime N., & Plé O. Methodology to study the suction effects on mechanical characteristics of rammed earth, 36ème Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC, Juin 2018, Saint-Etienne, France.
- **El Hajjar A.**, Eid J., Bouchemella S., Ouahbi T. & Taibi S. Retrait et fissuration des sols argileux par dessiccation, 36ème Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC, Juin 2018, Saint-Etienne, France.
- Bouchemella S., **El Hajjar A.**, Ouahbi T. & Taibi S. Etude expérimentale du retrait dans un matériau argileux en utilisant l'essai à l'anneau, 36ème Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC, Juin 2018, Saint-Etienne, France.
- **El Hajjar A.**, Bouchemella S., Eid J., Ouahbi T. & Taibi S. Mécanismes de retrait et de fissuration des sols fins argileux, 4ème colloque international Sols Non Saturés & Construction Durable UNSAT, Octobre 2018, Oran, Algérie.
- **El Hajjar A.**, Eid J., Bouchemella S., Ouahbi T. & Taibi S. Desiccation and cracking behaviour of clayey soils: experimental characterization and mechanisms identification, The XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering ECSMGE 2019, Septembre 2019, Reykjavik, Iceland.
- **El Hajjar A.**, Eid J., Ouahbi T. & Taibi S. Risk of damage and desiccation cracking of construction materials based on raw earth, International Conference of Engineering Risk INCER 2019, Avril 2018, Beyrouth, Lebanon.

Enseignement

- 2018 - 2019 : 64h de monitorat à l'Université du Havre.
 - License 3 : Mécanique des sols (6h TP).
 - Master 1 : Soutènements (20h TD, 16h TP), Logiciels Bureau d'études (2h Cours, 20h TP).
- 2019 - 2020 : 64h de monitorat à l'Université du Havre.
 - License 3 : Dessin technique (30h TP).
 - Master 1 : Soutènements (12h TP), Logiciels Bureau d'études (2h Cours, 20h TP).

DIVERS

- Lecture, Football et natation.