AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

Thèse

Pour l'obtention du Grade de :

DOCTEUR de L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Spécialité : **Mécanique des sols**

Présentée par :

Lamine IGHIL AMEUR

Étude expérimentale du phénomène de l'endommagement et de la fissuration d'une matrice poreuse

---

Soutenue publiquement le 9 décembre 2016

Devant le jury composé de :

Philippe COSENZA	Rapporteur
Muriel GASC	Examinateur
Mahdia HATTAB	Directrice de thèse
Pierre-Yves HICHER	Président
Farimah MASROURI	Examinateur
Guillaume ROBIN	Invité
Said TAIBI	Rapporteur

Ecole Doctorale Énergie Mécanique et Matériaux (ED 409)
Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux
LEM3 - UMR CNRS 7239, site web: *www.lem3.fr*
Université de Lorraine - Île du Saulcy - 57045 METZ Cedex 1 - France

"Pour ce qui est de l'avenir, il ne s'agit pas de le prévoir, mais de le rendre possible."

Antoine de Saint-Exupéry

Remerciements

Je tiens en premier lieu à exprimer ma reconnaissance et ma profonde gratitude à Mme Mahdia HATTAB, Professeure des Universités au laboratoire LEM3-UMR 7239 de l'Université de Lorraine et directrice de thèse, pour m'avoir guidé durant toute la période de ce travail de recherche. Je ne la remercierai jamais assez pour son entière disponibilité, tant humainement que scientifiquement, et de m'avoir toujours orienté vers les questions clefs dans la réalisation de mes travaux.

J'adresse ensuite mes remerciements aux professeurs M. Said TAIBI de l'Université du Havre et M. Philippe COSENZA de l'Université de Poitiers pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce travail. Je remercie également M. Pierre-Yves HICHER Professeur de l'École Centrale Nantes, Mme Farimah MASROURI Professeure de l'Université de Lorraine et Mme Muriel GASC directrice de recherche au CEREMA d'avoir accepté d'être membres du jury de thèse.

Mes remerciements s'adressent aussi à M. Guillaume ROBIN, Ingénieur d'études au LEM3, pour son aide dans la conception et le montage du dispositif expérimental de mesures ultrasonores et dans la maitrise des essais. Je tiens également à remercier M. Mohamad JRAD, Ingénieur d'études au LEM3, pour sa disponibilité et ses conseils dans la réalisation des nombreux essais expérimentaux. J'en profite pour remercier l'ensemble des collègues du LEM3.

Enfin, je voudrai adresser mes remerciements à tous ceux qui de près ou de loin m'ont supporté et soutenu durant ces années de thèse. Je pense à mes parents, mes sœurs et à une personne très spéciale qui a su m'encourager et être patiente dans les moments difficiles et d'intense travail.

Résumé

L'objectif dans cette recherche expérimentale est de contribuer à la compréhension des phénomènes de l'endommagement et de la fissuration dans les sols argileux saturés sous chargement hydrique (dessiccation) et mécanique (chemins de contrainte).

L'étude mécanique est axée sur l'identification des propriétés élastiques du matériau endommagé sous chargement triaxial à différents niveaux et chemins de contrainte. Les principaux points traités étaient, l'influence de la contrainte de consolidation (p'_{ic}), du degré de surconsolidation (OCR) et du chemin de contrainte sur la vitesse d'onde de compression. Les résultats montrent que les propriétés élastiques sont affectées et évoluent avec la déformation. La contractance semble augmenter la vitesse d'onde de compression à mesure que p'_{ic} croît et densifie le matériau. En revanche, la dilatance semble plutôt diminuer la vitesse d'onde de compression. Par ailleurs, différents chemins triaxiaux conduits à un niveau de contrainte donné ont montré que les vitesses d'onde sont très proches si les chemins sont normalement consolidés. Les vitesses sont proches également si les chemins sont surconsolidés. En revanche, à un même état de contrainte, la vitesse d'onde est différente si on compare un chemin normalement consolidé avec un chemin surconsolidé.

La deuxième partie de l'étude porte sur une analyse approfondie des mécanismes d'amorçage et de propagation des fissures sous dessiccation libre et contrôlée d'une argile initialement saturée. L'analyse via la corrélation d'images numériques (CIN) a permis, en premier lieu, une caractérisation multiéchelle du phénomène de retrait opéré au cours du séchage. Différents phénomènes ont été identifiés : le phénomène de relaxation, caractérisé par un changement de signe de la déformation locale extension / compression, le mécanisme de fissuration par extension (mode I), identifié par la cartographie des directions des déformations principales. L'étude a été complétée par des essais de traction indirecte par flexion 3 points réalisés sur des poutrelles de kaolin K13 initialement soumises à différentes succions. L'effet de la succion initiale sur la résistance à la traction a donc été observé. Les résultats montrent que plus la succion initiale est élevée, plus la pente de la courbe de variations de la résistance à la traction est élevée. D'autre part, la déformation de la zone tendue de la poutrelle atteint sa valeur critique lorsque la contrainte atteint la résistance maximale à la traction de l'argile.

Mots clés : argile, chemin triaxial, endommagement, propagation ultrasonore, dessiccation, retrait, succion, corrélation d'images numériques, fissuration, déformation critique, résistance à la traction.

Abstract

The objective of this experimental research is to contribute to understanding phenomena of damage and cracking in saturated clay soils under hydric loading (desiccation) and mechanical loading (stress paths).

Mechanical study focuses on identifying the elastic properties of the damaged material under triaxial loading at different levels and stress paths. The main issues were the influence of; the consolidation stress (p'_{ic}), the overconsolidation ratio (OCR) and the stress path on the compression wave velocity. The results show that the elastic properties are affected and evolve with strain. Contractancy appears to increase the compression wave velocity as p'_{ic} increase and densifies the material. However, dilatancy seems rather decrease the compression wave velocity. Moreover, various triaxial paths performed at a given stress level showed that the wave velocities are very close if the paths are normally consolidated. Velocities are also close if the paths are overconsolidated. However, at the same stress state, the wave velocity is different when comparing a normally consolidated path with an overconsolidated path.

The second part of the study focuses on a thorough analysis of the cracks' initiation and propagation mechanisms under free and controlled desiccation on initial saturated clay. Analysis via the digital image correlation (DIC) allowed, first, a multi-scales characterization of the shrinkage phenomenon operated during drying. Different phenomena were identified; the relaxation phenomenon characterized by a change of the local strain's sign extension / compression, the cracking mechanism by extension (mode I) identified by the map of the directions of the principal strains. The study was completed with indirect tensile tests by bending performed on kaolin k13 beams initially submitted to different suctions. The effect of the initial suction on the tensile strength has been observed. The results show that more the initial suction is high, the greater the slope of the curve of changes in the tensile strength is high. On the other hand, strain of the tension zone of the beam reaches its critical value when the stress reaches the maximum tensile strength of the clay.

Key words: clay, triaxial path, damage, ultrasonic propagation, desiccation, shrinkage, suction, digital image correlation, cracking, critical strain, tensile strength.

Table des matières

Introduction générale 29

Chapitre I. Etat de l'art - Etude bibliographique 33

I.1. Argile : propriétés physiques, microstructure et milieux non-saturés..... 36

I.1.1. Généralités sur les argiles 36
I.1.1.1 Terminologie 36
I.1.1.2 Classification des minéraux argileux 42
I.1.1.3 Surface spécifique des particules argileuses 43
I.1.2. Microstructure des argiles.....45
I.1.2.1 Microstructure et chemin oedométrique 45
I.1.2.2 Microstructure et chemin isotrope 47
I.1.2.3 Microstructure et chemin triaxial..... 50
I.1.3. Comportement de l'argile comme milieu non saturé - Evolution des paramètres hydriques 53
I.1.3.1 Variables représentant l'état de contrainte 54
I.1.3.2 Classification des sols non saturés 55
I.1.3.3 Méthodes expérimentales d'imposition et de contrôle de la succion 57
I.1.3.4 Courbe de rétention d'eau - Evolution des paramètres hydriques 59
I.1.3.5 Chemin de dessiccation et chemin normalement consolidé NC 62

I.2. Comportement élastique des argiles et des sols- Caractérisation 66

I.2.1. Comportement élastique : généralités 66
I.2.1.1 Effet de la contrainte effective moyenne 66
I.2.1.2 Effet de l'indice des vides 68
I.2.2. Caractérisation du comportement élastique.....69
I.2.2.1 Caractérisation du domaine élastique sous chargement triaxial..... 69
I.2.2.2 Caractérisation du domaine élastique par les méthodes dynamiques..... 71

I.3. Endommagement et fissuration des argiles et des roches argileuses : amorçage et évolution 75

I.3.1. Phénomène d'endommagement et de fissuration mécanique.....75
I.3.1.1 Introduction du phénomène..... 75
I.3.1.2 Endommagement sur chemin triaxial 75

I.3.1.3 Analyse des déformations localisées 77
I.3.1.4 Comportement de dilatance des argiles surconsolidées 80
I.3.2. Endommagement élastique 82
I.3.2.1 Propriétés élastiques du matériau endommagé 82
I.3.2.2 Identification de la déformation localisée par propagation ultrasonore 84
I.3.2.3 Caractérisation de l'anisotropie élastique induite 86
I.3.3. Fissuration de l'argile sous sollicitations hydriques 88
I.3.3.1 Fissuration par dessiccation 88
I.3.3.2 Mécanique de la rupture et propagation des fissures 90
I.3.4. Endommagement de l'argile sous sollicitation mécanique 93
I.3.4.1 Critères de la rupture du sol soumis à une tension 94
I.3.4.2 Méthodes de mesures de la résistance à la traction 96
I.3.4.3 Traction par flexion - Principe et calcul 98

Chapitre II. Propriétés du matériau et techniques expérimentales 105

II.1. Propriétés physiques du matériau et préparation d'éprouvettes consolidées 107

II.1.1. Kaolin K13 - propriétés minéralogiques 107
II.1.2. Confection des éprouvettes consolidées 108

II.2. Propriétés mécaniques de l'argile identifiées sous chargement oedométrique 110

II.2.1. Conditions d'essai 110
II.2.2. Comportement sous chargement oedométrique 111

II.3. Essai ultrason 115

II.3.1. Mesure de vitesse d'onde par propagation ultrasonore 115
II.3.1.1 Eléments théoriques de la méthode 115
II.3.1.2 Méthode de découpe des échantillons d'essai 117
II.3.1.3 Dispositif expérimental 120
II.3.1.4 Principe de l'essai ultrason 120
II.3.1.5 Vérification de la transparence acoustique de la membrane 121
II.3.2. Validation du système et confrontation aux résultats des essais oedométriques 122
II.3.2.1 Rôle de l'épaisseur et de la fréquence 122

II.3.2.2 Variation de la vitesse d'onde avec l'indice des vides 123
II.3.2.3 Module dynamique et caractérisation de la porosité d'anisotropie 125
II.3.2.4 Modules statiques et modules dynamiques 128

II.4. Chargement triaxial 131

II.4.1. Système expérimental et mise en place de l'échantillon 131
II.4.1.1 Dispositif expérimental 131
II.4.1.2 Mise en place de l'échantillon 132
II.4.2. Phases d'essai 133

II.5. Mesure du champ des déplacements de l'argile au cours du séchage par la méthode de corrélation d'images numériques 139

II.5.1. Techniques de dessiccation 139
II.5.1.1 Mesure de la température et de l'humidité relative et éléments de base 139
II.5.1.2 Dessiccation libre 141
II.5.1.3 Dessiccation contrôlée 144
II.5.2. Méthode de corrélation d'images numériques 148
II.5.3. Validation 150
II.5.3.1 Influence du mouchetis et lumière 151
II.5.3.2 Transparence de la chambre de dessiccation vis-à-vis des mesures 152

II.6. Essai de traction indirecte par flexion 155

II.6.1. Dispositif expérimental et principe de fonctionnement 155
II.6.2. Préparation des échantillons 156
II.6.3. Calibration du capteur de force 159

Chapitre III. Comportement mécanique de l'argile sur chemin triaxial .. 163

III.1. Loi expérimentale phénoménologique sous différents chemins de contrainte 165

III.1.1. Chemins isotropes - Caractéristiques intrinsèques Cc, Cs 165
III.1.2. Chemins à σ'_3=constante 166
III.1.2.1 Comportement normalement consolidé à σ'_3=constante 167
III.1.2.2 Comportement surconsolidé à σ'_3=constante 170
III.1.3. Chemins à p'=constante 174

III.1.3.1 Comportement normalement consolidé à p'=constante 174
III.1.3.2 Comportement surconsolidé à p'=constante 177
III.1.4. Discussion et comparaison entre les deux chemins triaxiaux 180
III.1.4.1 Comparaison entre les chemins à p'=constante et à σ'_3=constante 180
III.1.4.2 Analyse des chemins fixés au même niveau de contrainte P2 avec différentes conditions de chargement 184

III.2. Identification des propriétés élastiques par propagation d'onde ultrasonore en fonction du niveau de contrainte 191

III.2.1. Evolution de la vitesse d'onde V_p sur différents chemins triaxiaux 191
III.2.1.1 Chemins isotropes 191
III.2.1.2 Chemins à σ'_3=constante..... 194
III.2.1.3 Chemins purement déviatoriques..... 199
III.2.1.4 Etude de l'état ultime et différents chemins de contrainte..... 204
III.2.2. Propriétés élastiques du niveau de contrainte fixe P2 - Influence du chemin de contrainte sur les propriétés élastiques du niveau P2.....207
III.2.3. Effet de l'endommagement et du processus de rupture sur les propriétés élastiques.....212
III.2.4. Discussion.....215

Chapitre IV. Comportement de l'argile sous dessiccation libre et contrôlée.....219

IV.1. Courbe de rétention d'eau et variations des paramètres hydriques 221

IV.1.1. Caractéristiques des chemins de séchage 221
IV.1.1.1 Dessiccation contrôlée 221
IV.1.1.2 Dessiccation libre 225
IV.1.2. Courbe de retrait - Limite de retrait (SL) 227
IV.1.3. Courbe de rétention d'eau et succion globale.....228

IV.2. Phénomène de retrait 230

IV.2.1. Aspects bibliographiques 230
IV.2.1.1 Mécanisme de retrait..... 230
IV.2.1.2 Calcul et estimation du retrait..... 231
IV.2.1.3 Evolution de la teneur en eau locale sur chemin de séchage 231
IV.2.2. Dessiccation contrôlée et retrait 232

IV.2.2.1 Méthodologie pour la mesure et l'estimation des déformations globales 232
IV.2.2.2 Retrait - Estimation de la déformation volumique globale 239
IV.2.2.3 Analyse du retrait à l'échelle locale 241
IV.2.3. Séchage libre et retrait 252
IV.2.3.1 Analyse des déformation globales 253
IV.2.3.2 Estimation de la déformation volumique globale 254
IV.2.3.3 Champ des déplacements locaux 256

IV.3. Estimation de la succion locale dans la matrice 262

IV.3.1. Méthodologie de calcul de la succion locale 262
IV.3.2. Distributions de la succion locale sur différents chemins hydriques 265
IV.3.3. Une loi pour la distribution de la succion locale 267

IV.4. Analyse des déformations locales via la CIN 271

IV.4.1. Evolution des déformations locales sous dessiccation contrôlée 271
IV.4.1.1 Cartographies Vic2D des déformations locales 271
IV.4.1.2 Distributions des déformations locales dans les zones sélectionnées 282
IV.4.1.3 Calcul local par les déformation principales 287
IV.4.2. Evolution des déformations locales sous séchage libre 288
IV.4.2.1 Cartographies Vic2D des déformations locales 288
IV.4.2.2 Distributions des déformations locales dans les zones sélectionnées 292

Chapitre V. Identification des mécanismes de fissuration sous différentes sollicitations 299

V.1. Fissuration sur chemin de séchage 301

V.1.1. Dessiccation contrôlée à succion imposée 301
V.1.1.1 Faible succion (s_{glob} = 38 MPa) 301
V.1.1.2 Moyenne succion (110 MPa) 307
V.1.1.3 Forte succion (361 MPa) 315
V.1.2. Séchage libre 323
V.1.3. Discussion 325
V.1.3.1 Dessiccation contrôlée - Influence de la succion globale imposée 325
V.1.3.2 Fissuration - comparaison entre chemins de séchage libre et contrôlé 331

V.2. Poutrelles sous traction indirecte par flexion 334

V.2.1. Analyse du comportement global 334
V.2.1.1 Caractéristiques des poutrelles et des essais réalisés 334
V.2.1.2 Résultats du comportement global..... 336
V.2.2. Identification du comportement local par la CIN (Vic2D).....340
V.2.2.1 Faible succion (38 MPa) 340
V.2.2.2 Moyenne succion (110 MPa) 344
V.2.2.3 Forte succion (361 MPa)..... 346
V.2.3. Comparaison des résultats - Discussion 349
V.2.3.1 Mode de fissuration..... 349
V.2.3.2 Relation entre la résistance à la traction et la teneur en eau..... 353
V.2.3.3 Effet de la succion initiale sur la résistance à la traction 353

V.3. Discussion..... 355

V.3.1. Notion de la déformation critique.....355
V.3.1.1 Chemins de séchage 355
V.3.1.2 Poutrelles sous traction par flexion 357
V.3.1.3 Comparaison des résultats 359
V.3.2. Propagation du réseau de fissures - Influence de la succion locale.....360

Conclusions et perspectives..... 367

Références bibliographiques 373

Annexes..... 387

Table des illustrations

Figure I.1 : Unités texturales d'après (a) Bergaya and Lagaly (2006) et (b) Touret et al. (1990). 36

Figure I.2 : Représentation de la structure cristallographique des minéraux argileux (d'après Mitchell, 1993; cité par Delage et Cui, 2000). 37

Figure I.3 : Représentation schématique : (a) feuillet de la kaolinite (Delage et Cui, 2000), (b) ensemble de cristallites de kaolinite (Bouziri, 2007). 37

Figure I.4 : Représentation schématique de la décroissance du potentiel Ψ_x et de la concentration de la double couche électrique dues à une augmentation de la force ionique (Luckham et Rossi, 1999). 38

Figure I.5 : Notion de la double couche électrique et l'évolution du potentiel Ψ en fonction de la distance à la particule (d'après Güven and Pollastro, 1992 et Li et al., 2003 dans Benchabane, 2006). 39

Figure I.6 : Schéma de la particule de kaolinite (Tessier, 1984). 40

Figure I.7 : Représentation schématique des particules primaires des principales familles de minéraux argileux (d'après Tessier, 1984). 41

Figure I.8 : Schéma des particules de (a) kaolinite, (b) smectite et (c) chlorite (Truche, 2010). 42

Figure I.9 : Différentes formes de particules argileuses d'après Velde (1995). 43

Figure I.10 : Surface spécifique des particules argileuses d'après Eslinger and Peaver (1988). 44

Figure I.11 : Orientations des particules de kaolinite sur chemins oedométriques (Vasseur et al., 1995). 46

Figure I.12 : Organisation des particules de kaolinite sur chemin oedométrique (Hammad, 2010). 47

Figure I.13 : Photographies au MEB : (a) plan horizontal - essai premier type, (b) plan vertical - essai premier type, (c) plan horizontal - essai deuxième type, (d) plan vertical - essai deuxième type (Sivakumar et al., 2002). 48

Figure I.14 : Observation sur la kaolinite consolidée isotropiquement à 300 kPa (Hicher et al., 2000). 49

Figure I.15 : Observation sur la kaolinite consolidée isotropiquement à 1400 kPa (Bouziri, 2007). 49

Figure I.16 : Chargement triaxial surconsolidé à σ'_3=1000 kPa : (a) chemin de contrainte, (b) points d'observation au MEB à ε_1=5, 15 et 25 % (Bouziri, 2007). 50

Figure I.17 : Orientation des particules au point d'observation Ob_3 dans le plan vertical (Bouziri, 2007). 51

Figure I.18 : Photographie au MEB prise au point OB_3 dans le plan horizontal (Bouziri, 2007). 51

Figure I.19 : Orientation des particules en chargement triaxial classique (σ'_3=300 kPa) à ε_1=19.5% dans le plan vertical (Hicher et al., 2000). 52

Figure I.20 : Représentation schématique d'un sol non-saturé (par Wheeler et al., 2003). 53

Figure I.21 : Hystérésis hydraulique dans la courbe de rétention d'eau (par Wheeler et al., 2003). 53

Figure I.22 : Variables de l'état de contrainte dans un sol non-saturé (dans Fredlund, 1979). 54

Figure I.23 : Diagramme de Mohr étendu pour un sol non-saturé (par Fredlund, 1979). 55

Figure I.24 : Classification des sols en fonction de leur degré d'humidité et leur granulométrie (par Taibi, 1994). 55

Figure I.25 : Phase d'eau discontinue (par Taibi, 1994). 56

Figure I.26 : Dispositif expérimental de la plaque tensiométrique (cité dans Wei, 2014). 57

Figure I.27 : Contrôle de la succion par translation d'axe d'après Richards (1941) dans Delage et Cui (2000). 58

Figure I.28 : Application de la méthode osmotique par Wei (2014). 58

Figure I.29 : Schéma de principe de la technique d'équilibre de vapeur par Delage et Cui (2000)..... 59

Figure I.30 : Premier cycle de dessiccation-humidification sur l'argile blanche préparée sous forme de boue (w=1,5w_L) par Zerhouni (1991) dans Taibi (1994). 60

Figure I.31 : Courbe de rétention d'eau - premier cycle de dessiccation-humidification sur l'argile jaune initialement sous forme de boue (w=1,5w_L) par Indarto (1991) dans Taibi (1994). 61

Figure I.32 : Evolution des paramètres hydriques sur chemin de séchage pour le kaolin P300 et M65 (Wei et al., 2013). 62

Figure I.33 : Caractéristiques de la courbe de retrait d'un sol naturel d'après Stirk (1954) dans Tang et al. (2011)..... 63

Figure I.34 : Courbe de retrait obtenue par Tang et al. (2011) sur l'argile de Romainville. 63

Figure I.35 : Comparaison du chemin de séchage NC et des chemins oedométriques et isotropes NC dans le domaine saturé pour l'argile jaune (Kaolin P300) par Taibi (1994). 64

Figure I.36 : Chemins expérimentaux des essais de drainage dans le domaine saturé reportés sur les corrélations isotropes de Zervoyannis (1982) dans Taibi (1994). 65

Figure I.37 : Relation entre le module de Young et la contrainte effective moyenne dans les argiles à une valeur constante de l'indice des vides Hicher (1996). 67

Figure I.38 : Influence de la limite de liquidité sur le paramètre de puissance n (Hicher, 1996). 67

Figure I.39 : Relation entre le module de Young et l'indice des vides pour les argiles (Biarez et Hicher, 1994)..... 68

Figure I.40 : Cellule triaxiale pour les petites déformations par Hicher (1996). 69

Figure I.41 : Evolution du module sécant au cours d'un essai triaxial sur un sol (sable, argile) (Dano et Hicher, 2002). 70

Figure I.42 : Evolution du module sécant en fonction de l'amplitude de la déformation dans la kaolinite normalement consolidée (Biarez et Hicher, 1994). 71

Figure I.43 : Exemple d'ondes de compression sur le plan vertical (a) et le plan horizontal (b) (Bhuiyan et al., 2013)..... 72

Figure I.44 : Schéma de principe de l'installation associée aux Bender éléments (Dano et Hicher, 2002)..... 73

Figure I.45 : Phases de comportement d'une roche lors d'un essai de compression uniaxiale ou triaxiale (Gaombalet, 2004). 76

Figure I.46 : Courbes de contrainte-déformation axiales (Raynaud et al., 2008). 77

Figure I.47 : Déformation à faible pression de confinement : (a) déformation volumique en fonction de la déformation axiale, (b) photographie de l'échantillon 02 après la rupture (Raynaud et al., 2008).... 78

Figure I.48 : Déformation à pression de confinement modérée : (a) déformation volumique en fonction de la déformation axiale, (b) photographie de l'échantillon 03 après la rupture (Raynaud et al., 2008). 78

Figure I.49 : Courbe de déformation volumique en fonction de la déformation axiale à forte pression de confinement (Raynaud et al., 2008). 79

Figure I.50 : Positions des zones analysées à la porosimétrie au Mercure : (a) faible pression, (b) pression modérée, (c) forte pression (Raynaud et al., 2008)..... 79

Figure I.51 : Variations de la déformation volumique en fonction du déviateur (Hattab et Hicher, 2004). 80

Figure I.52 : Conditions du changement de volume dans le plan [q - p'] (Hattab et Hicher, 2004)..... 81

Figure I.53 : Représentation schématiques des positions des transducteurs ultrasons (Sarout et al., 2007)..... 82

Figure I.54 : Résultats à une pression de confinement p_c=15 MPa : (a) courbe contrainte - déformation axiales, (b) Evolution des vitesses de compression Vp et de cisaillement Vs (Sarout et al., 2007). 83

Figure I.55 : Résultats expérimentaux de deux essais triaxiaux sur la kaolinite : (a) courbe contrainte-déformation, (b) vitesses d'onde de compression sur les deux plans vertical et horizontal (Bhuiyan et al., 2013). 84

Figure I.56 : Eprouvette d'argile (marne de Beaucaire) déformée et localisation des zones de mesures (Hall et al., 2007). 85

Figure I.57 : Coupes horizontales de la reconstruction tomographique à rayons X dans les trois zones de mesures (i), (ii) et (iii) (Hall et al., 2007). 85

Figure I.58 : Anisotropie de la vitesse d'onde en fonction de la contrainte verticale dans les essais oedométriques avec des mélanges sable-argile (Bhuiyan et al., 2010). 86

Figure I.59 : Effet de la décompression sur le module élastique dynamique : (a) directions de mesures ultrasons, (b) variations du module dynamique suivant ces directions (Wei et al., 2016b). 87

Figure I.60 : Modèles théoriques plausibles des fissures de dessiccation dans un milieu idéalisé (Bažant and Cedolin, 1991). 89

Figure I.61 : Formation du réseau de fissures à la fin du séchage : (a) échantillon 300×300×4 mm^3, (b) échantillon 300×300×12 mm^3 (Péron et al., 2009a). 89

Figure I.62 : Etat des contraintes à la pointe de la fissure dans le mode d'ouverture - mode I (Konrad and Ayad, 1997b). 91

Figure I.63 : Modes de fissuration considérés dans les problèmes 3D (Degarmo et al., 2003). 92

Figure I.64 : (a) Dimension de l'échantillon d'argile, (b) dispositif expérimental (Wei et al., 2016). 92

Figure I.65 : Fissuration par la mode d'ouverture : (a) ε_{xx} à t=37.33h (M35, support lisse), (b) déformations principales mécaniques dans la zone I (Wei et al., 2016). 93

Figure I.66 : Critère de Mohr-Coulomb. 94

Figure I.67 : Théories dérivées de l'enveloppe de Mohr : (a) Théorie de Griffith, (b) Théorie de Griffith modifiée (Brace, 1960). 95

Figure I.68 : Appareil de traction directe (Nahlawi et al., 2004). 96

Figure I.69 : Courbes de chargement en traction directe (Nahlawi et al., 2004). 96

Figure I.70 : Essais de traction indirecte : (a) par flexion (Ajaz and Parry, 1975), (b) par double poinçon (Fang and Chen, 1972). 97

Figure I.71 : Essais de traction par flexion : (a) flexion 3 points, (b) flexion 4 points (Camp Devernay, 2008). 98

Figure I.72 : Diagrammes de distribution des contraintes et déformations dans un essai de flexion (d'après Ajaz and Parry, 1975b). 99

Figure II.1 : Composition minéralogique de la kaolinite P300 : (a) analyse par diffraction des rayons X (Hattab et al., 2010), (b) photo au MEB (Hammad, 2010). 107

Figure II.2 : Préparation de la boue : (a) poudre déshydratée, (b) boue d'argile et (c) conditionnement. 108

Figure II.3 : Représentation schématique du consolidomètre. 109

Figure II.4 : Confection des éprouvettes d'argile consolidée au consolidomètre: (a) Tourneur de découpe, (b) éprouvette cylindrique découpée. 109

Figure II.5 : Variations du tassement en fonction du temps - Essai Set1_5MPa. 111

Figure II.6 : Détermination de t_{100} par construction graphique (méthode de Casagrande) pour le palier σ'_v=5MPa de l'essai Set1_5MPa. 112

Figure II.7 : Variations d'indice des vides en fonction de la contrainte verticale effective et effet de l'anisotropie initiale. 112

Figure II.8 : Courbes oedométriques (ε_1 - σ'_v) dans les deux séries *Set 1* et *Set 4*. 113

Figure II.9 : Evolution du module élastique statique en fonction de l'indice des vides en déchargement oedométrique 114

Figure II.10 : Schéma de principe de la méthode d'insertion-substitution..... 115
Figure II.11 : Signaux temporels de référence dans l'eau et transmis à travers l'échantillon Set1_5MPa (Tableau. II.2). 116
Figure II.12 : Processus de découpe des échantillons d'argile pour la mesure ultrasonore : (a) plan vertical "V", (b) plan horizontal "H". 117
Figure II.13 : Schéma de découpe des échantillons d'Argilite de Bure. 119
Figure II.14 : Dispositif expérimental de mesure de la vitesse d'onde de compression. 120
Figure II.15 : Schéma de principe définissant la surface traitée de l'échantillon..... 121
Figure II.16 : Mesure de vérification de la transparence de la membrane utilisée..... 121
Figure II.17 : Comparaison des signaux temporels transmis dans l'eau, sans et avec membrane.... 122
Figure II.18 : Influence de l'épaisseur de l'échantillon et de la fréquence centrale des transducteurs sur la vitesse d'onde de compression. 123
Figure II.19 : Variations de la vitesse d'onde de compression verticale et horizontale en fonction de l'indice des vides de déchargement avec une épaisseur d=20mm et une fréquence f=1MHz. 124
Figure II.20 : Vitesse d'onde de compression en fonction de la porosité dans les sols argileux. 125
Figure II.21 : Variations du module dynamique en fonction de l'indice des vides..... 127
Figure II.22 : Propriétés de l'anisotropie induite par le chargement oedométrique..... 128
Figure II.23 : Photographies au MEB de la kaolinite sous chargement oedométrique (σ'_v=1MPa) : observations sur les plans (a) vertical et (b) horizontal (Hammad, 2010)..... 128
Figure II.24 : Relation entre les modules statique et dynamique de la kaolinite sous chargement oedométrique..... 129
Figure II.25 : Variations du rapport E_{dyn}/E_{stat} en fonction de l'indice des vides sur chemin oedométrique..... 130
Figure II.26 : Appareil triaxial de révolution (LEM3). 131
Figure II.27 : Mise en place de l'éprouvette dans la cellule triaxiale : (a) éprouvette mise en place, (b) composants nécessaires utilisés. 132
Figure II.28 : Préparation de l'échantillon : (a) éprouvette cylindrique découpée, (b) photographie du système anti-frettage. 133
Figure II.29 : Rampe de saturation obtenue pour le Kaolin K13. 134
Figure II.30 : Chargement et déchargement isotropes dans le plan (p' - q). 135
Figure II.31 : Exemple de variations du volume en fonction du temps lors de la consolidation isotrope : (a) chargement, (b) déchargement. 135
Figure II.32 : Etat de contrainte durant la phase de cisaillement. 136
Figure II.33 : Chemin triaxial à σ'_3 = constante : (a) normalement consolidé, (b) surconsolidé. 137
Figure II.34 : Chemin triaxial à p' = constante : (a) normalement consolidé, (b) surconsolidé. 137
Figure II.35 : Schéma de principe du contrôle de la succion par phase vapeur. 140
Figure II.36 : Evolution de la teneur en eau en fonction du temps sous une humidité relative contrôlée HR= 7% imposée par la solution saline saturée KOH..... 140
Figure II.37 : Schéma du dispositif expérimental assurant la dessiccation libre. 141
Figure II.38 : Représentation de l'échantillon sur le support. 142
Figure II.39 : Topographie 3D de la surface donnée par le microscope confocal : (a) *S1-téflon*, (b) *S2-perspex*. 143
Figure II.40 : Exemple de profile obtenu sur *S1-téflon* : (a) position du profile dans le plan (X, Y) de la surface traitée, (b) altitude des points du profile par rapport au plan Z=0. 143

Figure II.41 : Schéma du dispositif expérimental de la technique d'équilibre de vapeur. 145
Figure II.42 : Exemple d'une image enregistrée au cours d'un essai de dessiccation contrôlée..... 145
Figure II.43 : Sensibilité de l'humidité relative aux fluctuations de la température (Delage et al., 1998). 148
Figure II.44 : Organigramme des étapes de mesures par la corrélation d'images. 149
Figure II.45 : Calibration de l'échelle sur le logiciel Vic-2D. 150
Figure II.46 : Choix des paramètres de calcul avec Vic-2D. 150
Figure II.47 : Choix du mouchetis : (a) mouchetis très dense, (b) mouchetis faiblement dense. 151
Figure II.48 : Disposition et orientation de l'éclairage sur le système expérimental de la dessiccation. 152
Figure II.49 : Déplacements et rotation imposés à l'échantillon. 153
Figure II.50 : Déformations ε_{xx} dans le cas de la rotation : (a) sans vitre, (b) avec vitre. 153
Figure II.51 : Photographie du dispositif expérimental des essais de flexion. 155
Figure II.52 : Principe de fonctionnement du système de flexion..... 156
Figure II.53 : Schéma de découpe des poutrelles d'argile. 157
Figure II.54 : Imposition de la succion aux poutrelles découpées et aux échantillons destinés à la mesure de la teneur en eau dans le dessiccateur..... 157
Figure II.55 : Evolution de la teneur en eau des poutrelles en fonction du temps d'exposition à la succion imposée (361 MPa). 158
Figure II.56 : Exemple de mouchetis appliqué sur une poutrelle montée sur le dispositif de flexion.. 158
Figure II.57 : Caractéristiques du capteur de force FSR1 (Lextronic). 159
Figure II.58 : Photographie de la table de contrôle électronique utilisée pour l'étalonnage du capteur de force FSR1..... 159
Figure II.59 : Courbes de calibration du capteur de force FSR1. 160
Figure III.1 : Mesure ultrasonore à la fin du chargement triaxial : (a) état final de l'éprouvette après déchargement triaxial, (b) découpe des échantillons pour les mesures ultrasons. 164
Figure III.2 : Evolution de l'indice des vides sur chemin isotrope..... 166
Figure III.3 : Etat de contrainte dans un chemin triaxial à σ'_3=constante. 167
Figure III.4 : Comportement normalement consolidé du Kaolin K13 sur chemin triaxial à σ'_3=constante. 169
Figure III.5 : Photographie de l'éprouvette d'argile à la fin de l'essai OC-sig200 (OCR =5). 170
Figure III.6 : Comportement surconsolidé du Kaolin K13 sur chemin triaxial à σ'_3=constante. 173
Figure III.7 : Etat de contrainte dans un chemin triaxial à p'=constante. 174
Figure III.8 : Comportement normalement consolidé du Kaolin K13 sur chemin triaxial à p'=constante. 176
Figure III.9 : Comportement surconsolidé du Kaolin K13 sur chemin triaxial à p'=constante. 178
Figure III.10 : Variations de la déformation volumique en fonction du déviateur. 179
Figure III.11 : Chemins purement déviatoriques et à σ'_3=constante dans les plans [q - ε_1] et [q - p']. 180
Figure III.12 : Variations de la déformation volumique et de l'indice des vides pour les chemins normalement consolidés dans les plans [ε_v - ε_1] et [e - log p']. 181
Figure III.13 : Iso-déformations : (a) construction des points dans le plan [q - p'], (b) variations de l'indice des vides pour les chemins normalement consolidés dans le plan [e - logp']..... 182

Figure III.14 : Présentation des chemins purement déviatoriques et à σ'_3=constante dans les plans [q - ε_1] et [q - p']. 183

Figure III.15 : Variations de la déformation volumique et de l'indice des vides pour les chemins surconsolidés dans les plans : (a) [ε_v - ε_1] et (b) [e - log p']. 183

Figure III.16 : Variations de la déformation volumique en fonction du déviateur en normalement consolidés et en surconsolidé sur les chemins à : (a) σ'_3=constante et (b) p'=constante. 184

Figure III.17 : Présentation des chemins conduits au point P2 en normalement consolidé dans les plans [q - ε_1] et [q - p']. 185

Figure III.18 : Variations de volume de l'éprouvette au point P2 en normalement consolidé dans les plans [ε_1 - ε_v] et [e - log p']. 185

Figure III.19 : Localisation du point P2 dans les domaines de contractance et de dilatance établis dans le plan [q - p'] par Hattab et Hicher, 2004. 186

Figure III.20 : Chemins surconsolidés conduits au point P2 dans les plans [q - ε_1] et [q - p']. 187

Figure III.21 : Variations de volume de l'éprouvette au point P2 en surconsolidé dans les plans [ε_1 - ε_v] et [e - log p']. 187

Figure III.22 : Déformation volumique en fonction du déviateur au point P2 suivant différents chemins. 189

Figure III.23 : Mesures ultrasonores sur chemins isotropes : (a) vitesse d'onde de compression en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins isotropes dans le plan [q - p']. 191

Figure III.24 : Anisotropie élastique : (a) variations du paramètre χ en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins isotropes dans le plan [q - p']. 192

Figure III.25 : Observations au MEB de la kaolinite sur chemins isotropes : (a) p'_{ic} = 300 kPa (Hicher et al., 2000), (b) p'_{ic} = 1400 kPa (Bouziri, 2007). 193

Figure III.26 : Propriétés élastiques à l'état ultime sur chemins normalement consolidés à σ'_3=constante : (a) vitesse d'onde de compression en fonction de l'indice des vides final, ... 194

Figure III.27 : Anisotropie élastique : (a) variations du paramètre χ en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins normalement consolidés à σ'_3=constante dans le plan [q - p']. 195

Figure III.28 : Propriétés élastiques sur chemins surconsolidés à σ'_3=constante : (a) vitesse d'onde en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins de contrainte dans le plan [q - p']. 196

Figure III.29 : Anisotropie élastique : (a) variations du paramètre χ en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins surconsolidés à σ'_3=constante dans le plan [q - p']. 197

Figure III.30 : Propriétés élastiques sur chemins à σ'_3=cste de même contrainte de consolidation ... 198

Figure III.31 : Propriétés élastiques sur chemins normalement consolidés à p'=constante : (a) vitesse d'onde en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins de contrainte dans le plan [q - p'], (c) variations de volume dans le plan [ε_v - ε_1]. 199

Figure III.32 : Anisotropie élastique : (a) variations du paramètre χ en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins normalement consolidés à p'=constante dans le plan [q - p']. 200

Figure III.33 : Propriétés élastiques sur chemins surconsolidés à p'=constante : (a) vitesse d'onde en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins de contrainte dans le plan [q - p'], (c) variations de volume dans le plan [ε_v - ε_1]. 201

Figure III.34 : Anisotropie élastique : (a) variations du paramètre χ en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins surconsolidés à p'=constante dans le plan [q - p']. 202

Figure III.35 : Propriétés élastiques sur chemins à σ'_3=cste de même contrainte de consolidation ... 203

Figure III.36 : Effet du chemin de contrainte en normalement consolidé : (a) vitesse d'onde en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins de contrainte dans le plan [q - p'], (c) variations de volume dans le plan [ε_v - ε_1]. 205

Figure III.37 : Effet du chemin de contrainte en surconsolidé : (a) vitesse d'onde en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins de contrainte dans le plan [q - p']. 206

Figure III.38 : Déformation volumique plastique en fonction du déviateur au point P2 suivant différents chemins. 207

Figure III.39 : Propriétés élastiques au point P2 sur chemins normalement consolidés : (a) vitesse d'onde en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins de contrainte dans le plan [q - p'], (c) variations de volume dans le plan [ε_v - ε_1]. 208

Figure III.40 : Propriétés élastiques au point P2 sur chemins surconsolidés : (a) vitesse d'onde en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins de contrainte dans le plan [q - p'], (c) variations de volume dans le plan [ε_v - ε_1]. 209

Figure III.41 : Effet de la surconsolidation au point P2 : (a) vitesse d'onde en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins de contrainte dans le plan [q - p'], ... 210

Figure III.42 : Anisotropie élastique au même niveau de contrainte du point P2 sur différents chemins normalement consolidés et surconsolidés. 211

Figure III.43 : Variations de l'indice des vides en fonction de la contrainte moyenne effective sur les chemins choisis. 212

Figure III.44 : Chemins de contraintes choisis et localisation des mesures ultrasons dans [q - p']. ... 213

Figure III.45 : Vitesses d'onde de compression obtenues dans les différents chemins étudiés dans cette analyse en fonction de l'indice des vides final. 214

Figure III.46 : Vitesse d'onde de compression en fonction de la porosité dans tous les essais. 215

Figure IV.1 : Dessiccation contrôlée - évolution de la teneur en eau et l'humidité relative imposée en fonction du temps (a) CD-s361, (b) CD-s110, (c) CD-s38. Variations de la succion imposée calculée : (e) CD-s361, (f) CD-s110, (g) CD-s38. 222

Figure IV.2 : Dessiccation contrôlée - vitesse de séchage en fonction du temps sous différents niveaux de succion imposée (moy = valeur moyenne). 224

Figure IV.3 : Valeurs caractéristiques du temps de séchage en fonction de la succion globale. 225

Figure IV.4 : Dessiccation libre - évolution de la teneur en eau et l'humidité relative mesurée en fonction du temps (sm : sans mouchetis / mmd : mouchetis moins dense). 226

Figure IV.5 : Dessiccation libre - vitesse de séchage en fonction du temps (moy = valeur moyenne). 226

Figure IV.6 : Courbe de retrait - (a) variations de l'indice des vides et du degré de saturation en fonction de la teneur en eau (Indarto, 1991 cité dans Taibi, 1994; Wei, 2014), (b) représentation schématique de l'état du matériau au cours du séchage. 227

Figure IV.7 : Variations de la teneur en eau en fonction de la succion globale de l'échantillon (Indarto, 1991 cité dans Taibi, 1994; Wei, 2014). 228

Figure IV.8 : Déformations globales et indice des vides en fonction de la teneur en eau moyenne (Péron et al., 2009a). 230

Figure IV.9 : Schéma de découpe des échantillons pour la mesure de la teneur en eau locale sur chemin de séchage libre : (a) première ligne, (b) 3 premières lignes (Wei, 2014). 232

Figure IV.10 : Variations de la teneur en eau locale sur chemin de séchage libre : (a) première ligne, (b) deuxième ligne (Wei, 2014). 232

Figure IV.11 : Organigramme de calcul des déformations globales induites par le séchage. 233

Figure IV.12 : Estimation des déformations globales longitudinale (a) et transversale (b) par la CIN (exemple essai CD2-s361 au début du séchage). 234

Figure IV.13 : Déformations globales calculées dans l'essai CD2-s361 235

Figure IV.14 : Déformations globales avec correction de la déformation verticale. 236

Figure IV.15 : Variations des déformations globales en fonction du temps à différentes succions : .. 238

Figure IV.16 : Variations des déformations globales à différents niveaux de succion : 239
Figure IV.17 : Déformation volumique globale en fonction du temps à différents niveaux de succion. 240
Figure IV.18 : Vitesse de retrait en fonction du temps sous différents niveaux de succion globale. .. 240
Figure IV.19 : Cartographies Vic2D des déplacements locaux à la limite de retrait $w=w_{SL}$ 242
Figure IV.20 : Schéma du champ des déplacements locaux au cours du séchage. 243
Figure IV.21 : Disposition des différentes zones de calcul P_i de la déformation verticale locale - cartographie Vic2D ε_{xx} à t=26h de l'essai CD2-s361 245
Figure IV.22 : Variations de la déformation verticale locale obtenues pour chaque zone P_i - cas de l'essai CD2-s361 245
Figure IV.23 : Organigramme de la méthode adoptée pour l'estimation de la déformation de retrait locale. 247
Figure IV.24 : Variations des composantes de chaque déformation locale : (a) longitudinale, (b) transversale et (c) verticale en fonction du temps - Essai CD2-s361. 248
Figure IV.25 : Variations des déformations de retrait locales : (a) longitudinale, (b) transversale et (c) verticale en fonction du temps à différents niveau de succion. 249
Figure IV.26 : Positions des lignes X-X' et Y-Y' des distributions - cartographie Vic2D ε_{xx} à t=26h ($w=w_{SL}$) de l'essai CD2-s361. 250
Figure IV.27 : (a) distribution de la déformation longitudinale locale ε_{xx} sur la ligne X-X' (b) distribution de la composante mécanique sur la ligne X-X' (essai CD2-s361). 251
Figure IV.28 : (a) distribution de la déformation longitudinale locale ε_{yy} sur la ligne Y-Y' (b) distribution de la composante mécanique sur la ligne Y-Y' (essai CD2-s361). 252
Figure IV.29 : Variations des déformations globales en fonction du temps à différentes conditions : 253
Figure IV.30 : Déformations globales et propriétés du support : 254
Figure IV.31 : Déformation volumique globale en fonction du temps à différentes conditions d'essai. 255
Figure IV.32 : Vitesse de retrait en fonction du temps sous différentes conditions d'essai. 255
Figure IV.33 : Cartographies Vic2D des déplacements locaux à la limite de retrait $w=w_{SL}$ 257
Figure IV.34 : Variations des composantes de retrait et mécanique chaque déformation locale : (a) longitudinale, (b) transversale et (c) verticale en fonction du temps - Essai FD-pers. 258
Figure IV.35 : Positions des lignes X-X' et Y-Y' des distributions - cartographie Vic2D de ε_{xx} à t=31h ($w=w_{SL}$) de l'essai FD-pers. 259
Figure IV.36 : (a) distribution de la déformation longitudinale locale ε_{xx} sur la ligne X-X' (b) distribution de la composante mécanique sur la ligne X-X' (essai FD-pers). 260
Figure IV.37 : (a) distribution de la déformation longitudinale locale ε_{yy} sur la ligne Y-Y' (b) distribution de la composante mécanique sur la ligne Y-Y' (essai FD-pers). 261
Figure IV.38 : Variations de la teneur en eau en fonction de la succion globale de l'échantillon (Indarto, 1991 cité dans Taibi, 1994; Wei, 2014). 262
Figure IV.39 : Méthodologie d'estimation de la succion locale à partir du calcul des déformations locales sur un chemin hydrique. 264
Figure IV.40 : Cartographies de distribution de la succion locale estimée s_{loc} : (a1, a2) CD2-s361, (b1, b2) CD3-s110, (c1, c2) CD2-s38 et (d1, d2) FD-pers. 266
Figure IV.41 : Localisation des zones P_i étudiées sur la distribution de la succion locale - cas de l'essai CD2-s361 à la limite de retrait (t_{SL} = 26h, w_{SL}=17%) 268
Figure IV.42 : Distribution de la succion locale suivant la ligne P1-X sur le chemin hydrique CD2-s361. 268

Figure IV.43 : Comparaison des distributions de la succion locale suivant les différentes lignes P1, P2 et P3 longitudinales (X) et transversales (Y) sur le chemin hydrique CD2-s361. 269

Figure IV.44 : Variations de la succion locale sur différents chemins hydriques. 270

Figure IV.45 : Cartographies Vic2D des déformations locales de l'essai CD2-s361 à t = 26h (w = w_{SL}) 273

Figure IV.46 : Localisation des zones d'extension ou de fissuration sur les cartographies Vic2D des déformations locales à la fin du séchage contrôlé : cas de l'essai CD2-s361 (t= 165h, w= 2.65%)... 275

Figure IV.47 : Cartographies Vic2D des déformations locales de l'essai CD3-s110 à t = 44h (w = w_{SL}). 277

Figure IV.48 : Localisation des zones d'extension ou de fissuration sur les cartographies Vic2D des déformations locales à la fin du séchage contrôlé : cas de l'essai CD3-s110 (t= 162h, w=1.68%).... 279

Figure IV.49 : Cartographies Vic2D des déformations locales de l'essai CD3-s38. 281

Figure IV.50 : Positions des lignes sélectionnées pour le calcul des distributions de déformations locales - cartographie ε_{xx} cas de l'essai CD2-s361 (t= 80h)..... 282

Figure IV.51 : Distributions des déformations locales suivant la ligne X-X' : (a) ε_{xx}, (b) ε_{yy} et (c) ε_{xy} en fonction du temps. 283

Figure IV.52 : Distributions des déformations locales suivant la ligne Y-Y' : (a) ε_{xx}, (b) ε_{yy} et (c) ε_{xy} en fonction du temps. 284

Figure IV.53 : Positions des lignes sélectionnées pour le calcul des distributions de déformations locales - cartographie ε_{xx} cas de l'essai CD2-s361 (t = 80h)..... 285

Figure IV.54 : Distributions des déformations locales suivant la ligne X-X' : (a) ε_{xx}, (b) ε_{yy} et (c) ε_{xy} en fonction du temps. 286

Figure IV.55 : Distributions des déformations locales suivant la ligne Y-Y' : (a) ε_{xx}, (b) ε_{yy} et (c) ε_{xy} en fonction du temps. 287

Figure IV.56 : Calcul par les déformations locales : (a) cartographie obtenue après calcul dans la zone *I-CD2-s361*, (b) cartographie ε_{xx} cas de l'essai CD2-s361 (t= 16.5h, w= 27.6%). 288

Figure IV.57 : Cartographies Vic2D des déformations locales de l'essai FD-pers à t = 31h (w = w_{SL}). 289

Figure IV.58 : Localisation des zones d'extension ou de fissuration sur les cartographies Vic2D des déformations locales à la fin du séchage libre : cas de l'essai FD-pers (t_{fin}= 164h, w= 1.35%). 291

Figure IV.59 : Positions des lignes sélectionnées pour le calcul des distributions de déformations locales - cartographie ε_{xx} cas de l'essai FD-pers (t= 42h, w= 7.63%)..... 292

Figure IV.60 : Distributions des déformations locales suivant la ligne X-X' : (a) ε_{xx}, (b) ε_{yy} et (c) ε_{xy} en fonction du temps. 293

Figure IV.61 : Distributions des déformations locales suivant la ligne X-X' : (a) ε_{xx}, (b) ε_{yy} et (c) ε_{xy} en fonction du temps. 294

Figure V.1 : Déformation longitudinale ε_{xx} à t= 87.7h (w= 28.8%) - cas de l'essai CD3-s38. 302

Figure V.2 : Distributions des déformations locales sur les lignes horizontale A-A' et verticale B-B' traversant la zone *I-CD3-s38*..... 303

Figure V.3 : Déformations longitudinale et transversale dans la zone *I-CD3-s38* à différents temps de séchage. 304

Figure V.4 : Cartographies Vic2D des déformations locales de l'essai CD3-s38 à t= 87.7h (w= 28.8%) 305

Figure V.5 : Déformations principales locales dans la zone *I-CD3-s38* identifiée sur la figure V.1 à différents temps de séchage. 307

Figure V.6 : Déformation longitudinale ε_{xx} à la fin du séchage contrôlé à moyenne succion imposée (t=162h, essai CD3-s110). 307

Figure V.7 : Distributions de la déformation longitudinale sur la ligne horizontale A-A' (Fig. V.5) traversant les zones (a) *I-CD3-s110* et (b) *II-CD3-s110*. 309

Figure V.8 : Déformations longitudinale et transversale à différents temps de séchage dans les zones (a) *I-CD3-s110* et (b) *II-CD3-s110*. 309

Figure V.9 : Déformations principales locales dans la zone *I-CD3-s110* identifiée sur la figure V.6 à différents temps de séchage. 311

Figure V.10 : Déformations principales locales dans la zone *II-CD3-s110* identifiée sur la figure V.6 à différents temps de séchage. 312

Figure V.11 : Déformation longitudinale dans la zone *III-CD3-s110* à différents temps de séchage. 313

Figure V.12 : Déformations principales locales dans la zone *III-CD3-s110* à différents temps de séchage. 315

Figure V.13 : Déformation principale majeure ε_1 à la fin de séchage contrôlé à forte succion imposée (t=161h, essai CD2-s361). 316

Figure V.14 : Distributions des déformations locales sur les lignes horizontale A-A' et verticale B-B' traversant la zone *I-CD2-s361*..... 317

Figure V.15 : Déformations longitudinale et transversale dans la zone *I-CD2-s361* à différents temps de séchage. 318

Figure V.16 : Déformations principales locales dans la zone *I-CD2-s361* à différents temps de séchage. 320

Figure V.17 : Déformations longitudinale et transversale respectivement dans les deux zones (a) *III-CD2-s361* et (b) *II-CD2-s361* à différents temps de séchage. 321

Figure V.18 : Déformations principales locales calculées à la fin de séchage (t=161h) dans les deux zones (a) *II-CD2-s361* et (b) *III-CD2-s361*. 322

Figure V.19 : Déformation principale majeure ε_1 à la fin de séchage libre (t=165h, essai FD-pers). . 323

Figure V.20 : Déformations ε_{xx} et ε_{yy} respectivement dans les zones (a) *II-FD-pers* et (b) *I-FD-pers* à différents temps de séchage. 324

Figure V.21 : Déformations principales locales calculées à la fin de séchage (t=165h) dans les zones (a) *I-FD-pers* et (b) *II-FD-pers*. 325

Figure V.22 : Vitesse de séchage à forte, moyenne et faible succion imposée en fonction de la teneur en eau. 326

Figure V.23 : Distributions de ε_{xx} dans les zones au centre de l'échantillon (a) *I-CD2-s361*, (b) *I-CD3-s110* et *II-CD3-s110*, (c) *I-CD3-s38*. 327

Figure V.24 : Représentation schématique des points t_0, t_1 et t_{SL} dans le plan [ε_{xx} - temps]. 328

Figure V.25 : Fissuration aux bords de l'échantillon à différents niveaux de succion imposée. 329

Figure V.26 : Fissuration aux bords de l'échantillon à différents niveaux de succion imposée. 330

Figure V.27 : Cartographies Vic2D de ε_{xx} sur chemins de séchage libre : comparaison entre (a) cette étude, (b) résultats de Wei (2014) sur le même type de matériau. 331

Figure V.28 : Caractéristiques hydriques des deux chemins FD-pers et CD2-s361 dans les plans [w - t] et [HR - t]. 332

Figure V.29 : Localisation des temps de début des fissures sur les courbes [dw/dt - w] des deux chemins FD-pers et CD2-s361. 332

Figure V.30 : Fissuration sur chemins de séchage libre et contrôlé : (a) FD-pers, (b) CD2-s361. 333

Figure V.31 : Représentation schématique de la déformée d'une poutrelle d'argile sous traction indirecte par flexion. 334

Figure V.32 : Méthode de découpe des poutrelles suivant les plans horizontal et vertical. 335

Figure V.33 : Variations de la teneur en eau des poutrelles en fonction du temps sous succion..... 336

Figure V.34 : Comportement global : (a) représentation schématique de la poutrelle sous flexion (b) évolution de la contrainte de traction en fonction du déplacement pour les essais : Flex1-s361, Flex1-s110 et Flex1-s38. 337

Figure V.35 : Evolution de la contrainte de traction en fonction du déplacement : (a) faible succion, (b) moyenne succion, (c) forte succion, (d) tous les essais. 339

Figure V.36 : Contrainte de traction en fonction du déplacement dans les deux essais flex1-s38$_V$ et flex3-s38$_H$. 341

Figure V.37 : Cartographies Vic2D des déformations locales dans la poutrelle flex1-s38V à la position i du chargement. 342

Figure V.38 : Evolution de la fissure après la rupture suivant la déformation ε_{xx} (flex1-s38$_V$). 343

Figure V.39 : Initiation et propagation de la fissure suivant la déformation ε_{xx} (flex3-s38$_H$). 344

Figure V.40 : Contrainte de traction en fonction du déplacement dans les deux essais flex2-s110$_V$ et flex3-s110$_H$. 344

Figure V.41 : Initiation et propagation de la fissure suivant la déformation ε_{xx} (flex2-s110$_V$). 345

Figure V.42 : Initiation et propagation de la fissure suivant la déformation ε_{xx} (flex3-s110$_H$). 346

Figure V.43 : Contrainte de traction en fonction du déplacement dans les deux essais flex1-s361$_V$ et flex4-s361$_H$. 347

Figure V.44 : Initiation et propagation de la fissure suivant la déformation ε_{xx} (flex1-s361$_V$). 348

Figure V.45 : Initiation et propagation de la fissure suivant la déformation ε_{xx} (flex4-s361$_H$). 349

Figure V.46 : Contrainte de traction en fonction du déplacement dans l'essai Flex1-s361$_V$. 349

Figure V.47 : Déformations principales locales calculées à la position i dans l'essai Flex1-s361$_V$. ... 350

Figure V.48 : Déformations principales locales calculées à la position $i+1$ dans l'essai Flex1-s361$_V$. 352

Figure V.49 : Résistance à la traction en fonction de la teneur en eau. 353

Figure V.50 : Résistance à la traction en fonction de la succion initiale. 353

Figure V.51 : Schémas de fissuration obtenus à la fin des différents chemins de séchage libre et contrôlé. 355

Figure V.52 : Résultats sur chemins de séchage libre et contrôlé : (a) déformation critique estimée en fonction du temps, (b) courbes de vitesse de séchage en fonction du temps. 357

Figure V.53 : Cartographies Vic2D de la déformation longitudinale ε_{xx} dans la position i à différentes succions : (a) Flex1-s361, (b) Flex2-s110 et (c) Flex1-s38. 358

Figure V.54 : Résultats sous flexion : (a) déformation critique estimée en fonction du déplacement imposé, (b) courbes de contraintes - déplacement. 359

Figure V.55 : Variations de la déformation critique en fonction de la teneur en eau dans les essais de dessiccation et de flexion. 360

Figure V.56 : Cartographie de la loi de distribution de la succion locale s_{loc} à t=161h sur le chemin CD2-s361 361

Figure V.57 : Distributions de la succion locale dans les zones de fissuration *II-CD2-s361* et *III-CD2-s361* en fonction du temps. 361

Figure V.58 : Evolution de la succion locale durant la propagation des fissures sur différents chemin de séchage libre et contrôlé. 362

Table des tableaux

Tableau II.1 : Propriétés physiques du Kaolin K13 et de la kaolinite P300. 107
Tableau II.2 : Propriétés des essais oedométriques. 111
Tableau II.3 : Paramètres définissant les équations [II.4] et [II.5]. 116
Tableau II.4 : Nomenclature des échantillons découpés pour les mesures ultrasonores. 118
Tableau II.5 : Quelques caractéristiques mécaniques et minéralogiques des argilites de Bure (Gasc-Barbier, 2002). 119
Tableau II.6 : Composition du dispositif expérimental (Fig. II.14). 120
Tableau II.7 : Propriétés élastiques des Argilites de Bure. 126
Tableau II.8 : Paramètres mesurés et calculés dans un essai triaxial. 138
Tableau II.9 : Paramètres de l'analyse de surface des supports au microscope confocal. 144
Tableau II.10 : Programme des essais de dessiccation libre. 144
Tableau II.11 : Caractéristiques chimiques des solutions salines utilisées. 146
Tableau II.12 : Valeurs de température et d'humidité relative obtenues pour chaque essai. 147
Tableau II.13 : Mesures de déplacement et déformations locaux avec et sans vitre. 154
Tableau III.1 : Caractéristiques des essais σ'_3=constante normalement consolidés. 167
Tableau III.2 : Caractéristiques des essais σ'_3=constante surconsolidés. 170
Tableau III.3 : Caractéristiques des essais p'=constante normalement consolidés. 175
Tableau III.4 : Caractéristiques des essais p'=constante surconsolidés. 177
Tableau III.5 : Comparaison de l'état de contrainte sur différents chemins (phase de cisaillement). 204
Tableau IV.1 : Caractéristiques et nomenclature des essais de dessiccation contrôlée. 221
Tableau IV.2 : Caractéristiques et nomenclature des essais de séchage libre. 225
Tableau IV.3 : Valeurs du rapport d'anisotropie η obtenues dans la littérature. 231
Tableau IV.4 : Conditions des essais de dessiccation libre. 252
Tableau IV.5 : Comparaison des déplacements locaux à la limite de retrait w = w_{SL}. 256
Tableau IV.6 : Paramètres d'essai à l'échelle globale des chemins hydriques choisis. 265
Tableau IV.7 : Localisation des zones critiques à forte succion imposée (CD2-s361) identifiées à partir de la figure IV. 46. 274
Tableau IV.8 : Localisation des zones critiques à moyenne succion imposée (110 MPa) identifiées à partir de la figure IV. 48. 278
Tableau IV.9 : Localisation des zones critiques à faible succion imposée (38 MPa) identifiées à partir de la figure IV.49. 280
Tableau IV.10 : Localisation des zones critiques sur chemins de dessiccation libre. 290
Tableau V.1 : Caractéristiques hydriques des essais de dessiccation contrôlée choisis. 301
Tableau V.2 : Teneur en eau *w*, succion locale *s*, déformation de retrait ε_r et maximum et minimum de ε_{xx} et ε_{yy} dans la zone *I-CD3-s38* à différents temps de séchage. 304
Tableau V.3 : Teneur en eau *w*, succion locale *s*, déformation de retrait ε_r et maximum et minimum de ε_{xx} et ε_{yy} dans la zone *I-CD3-s110* et *II-CD3-s110* à différents temps de séchage. 310
Tableau V.4 : Teneur en eau *w*, succion locale *s* et maximum et minimum de ε_{xx} dans la zone *III-CD3-s110* à différents temps de séchage. 313

Tableau V.5 : Teneur en eau *w*, succion locale *s*, déformation de retrait ε_r et maximum et minimum de ε_{xx} et ε_{yy} dans la zone *I-CD2-s361* à différents temps de séchage. 319

Tableau V.6 : Teneur en eau *w*, succion locale *s* et maximum et minimum de ε_{xx} et ε_{yy} respectivement dans les deux zones *III-CD2-s361* et *II-CD2-s361* à différents temps de séchage. 321

Tableau V.7 : Température *T*, humidité relative *HR* et conditions de l'essai FD-pers. 323

Tableau V.8 : Teneur en eau *w*, succion locale *s* et maximum et minimum de ε_{xx} et ε_{yy} respectivement dans les deux zones *II-FD-pers* et *I-FD-pers* à différents temps de séchage..... 324

Tableau V.9 : Valeurs de ε_{xx} associées aux points t_0, t_1 et t_{SL} dans chaque zone. 327

Tableau V.10 : Discussion sur l'effet de la succion imposée. 328

Tableau V.11 : Valeurs d'extension dans les différentes zones entre l'amorçage de la fissure et la fin du séchage. 333

Tableau V.12 : Nomenclature et caractéristiques des essais de traction indirecte par flexion. 335

Tableau V.13 : Valeurs de la contrainte de traction maximale σ_{tmax} pour tous les essais. 338

Tableau V.14 : Valeurs de la déformation critique ε_{cr} dans les zones de fissuration. 356

Tableau V.15 : Valeurs de la déformation critique ε_{cr} dans les zones de fissuration (position i). 358

Tableau V.16 : Teneur en eau *w*, maximum et minimum de s_{loc} dans les deux zones *III-CD2-s361* et *II-CD2-s361* à différents temps de séchage. 361

Introduction générale

Introduction générale

Les enjeux environnementaux liés au dérèglement climatique préoccupent de plus en plus les nations. L'accord universel de Paris, résultat crucial de la COP21[1] présidée par la France fin de l'année 2015 dont l'objectif principal[2] (et ambitieux) était de limiter la température moyenne de la planète en-dessous de 2°C pour le siècle à venir, montre tout l'intérêt que porte les pays à ce problème.

Dans ce contexte, il devient indispensable de se donner les moyens pour évaluer les risques, qu'ils soient naturels ou provoqués, tel que les conséquences du réchauffement climatique. La sécheresse des sols, par exemple, modifie d'une manière importante les propriétés mécaniques des sols et peuvent provoquer la fissuration et/ou l'endommagement, en particulier lorsque le sol est argileux.

Afin de comprendre le comportement de matériaux aussi complexes que les argiles, il devient nécessaire d'améliorer les approches et les techniques expérimentales.

L'objectif principal de la thèse est de caractériser le phénomène d'amorçage et de développement de la fissuration d'une argile dû aussi bien à un chargement hydrique (séchage) que mécanique (à différents chemins de contrainte).

La recherche proposée dans cette optique vise à élaborer une approche originale d'investigation, basée sur différentes techniques de mesure et d'analyse.

Il s'agira de :

- caractériser les propriétés élastiques et leur évolution sur des chemins triaxiaux complexes, puis tenter d'identifier l'influence de l'endommagement sur ces propriétés.

- contribuer à la compréhension des mécanismes d'initiation et de propagation de la fissuration sous dessiccation libre et contrôlée d'un matériau argileux, en utilisant la technique de corrélation d'images numériques (CIN).

- tenter de caractériser une corrélation entre la rupture induite par une sollicitation mécanique en traction et celle due à une sollicitation de séchage induisant une fissure en mode I (mode d'ouverture).

Certaines techniques et méthodes expérimentales ont été conçues et développées au laboratoire.

[1] 21e Conférence des parties à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (COP21/CMP11), du 30 novembre au 12 décembre 2015.
[2] Site web de la COP21 : *www.cop21.gouv.fr*

Ce mémoire est structuré en 5 chapitres :

Le ***premier chapitre*** représente une synthèse bibliographique liée aux mécanismes de l'endommagement de l'argile (saturée et non-saturée) sous différents types de sollicitation. Cette étude de l'état de l'art a été élaborée suivant un plan composé de trois volets qui concernent; (1) l'argile et ses propriétés, (2) la caractérisation du comportement élastique des sols argileux sous chargement mécanique, (3) les phénomènes liés à l'amorçage et l'évolution de l'endommagement dans les argiles.

Le ***deuxième chapitre*** est consacré à la présentation des propriétés du matériau utilisé (propriétés minéralogiques et mécaniques, en particulier le comportement à l'oedomètre), ainsi qu'à la description des différents systèmes expérimentaux et des méthodes de mesure.

Le ***troisième chapitre*** est dédié à la caractérisation des propriétés élastiques de l'argile sous différents niveaux de contrainte, et sur différents chemins de contrainte, par la méthode des ultrasons. La première partie de ce chapitre concerne l'étude expérimentale du comportement de l'argile sur chemins triaxiaux. La deuxième partie est consacrée à l'identification des propriétés élastiques sur chemins triaxiaux.

Dans le ***quatrième chapitre***, nous présentons les résultats expérimentaux en quatre volets. L'objectif est de contribuer à la compréhension du comportement global d'une argile (échantillon de 190×130×4 mm^3), initialement saturée (w_0 = 1.2 w_L), sous dessiccation libre et contrôlée. Le premier volet consiste à établir la courbe de rétention d'eau caractéristique de l'argile sur chemin hydrique de séchage en se basant sur des études antérieures de la littérature. Le deuxième volet de ce chapitre concerne le phénomène de retrait induit par la dessiccation libre et contrôlée. Le troisième volet est une introduction au phénomène d'initiation de fissure. A travers un calcul local, nous avons proposé une méthode d'estimation de la succion et de ses variations spatiales en fonction du chemin hydrique imposé. Dans le quatrième volet, nous présentons une analyse focalisée sur l'évolution des déformations locales, obtenues via la corrélation d'images numériques (CIN), sous différents chemins de séchage libre et contrôlé.

L'objectif dans le ***cinquième chapitre*** est de tenter d'identifier les mécanismes de rupture de l'argile soumise à différentes sollicitations hydrique et mécanique. Le premier volet concerne la fissuration sur chemin de séchage. Le deuxième volet est dédié à l'identification de la fissuration sous traction indirecte par flexion de poutrelles d'argile sous différentes succions. Le troisième volet présente une discussion autour de la notion de déformation critique qui provoque l'amorçage de la fissuration.

Chapitre I

Etat de l'art - Etude bibliographique

Chapitre I. Etat de l'art - Etude bibliographique

Sommaire :

Introduction……34

I.1. Argile : propriétés physiques, microstructure et milieux non-saturés……36

I.1.1. Généralités sur les argiles……..36

I.1.2. Microstructure des argiles……..45

I.1.3. Comportement de l'argile comme milieu non-saturé, Evolution des paramètres hydriques……53

I.2. Comportement élastique des argiles et des sols - Caractérisation……..66

I.2.1. Comportement élastique : généralités……66

I.2.2. Caractérisation du comportement élastique……....69

I.3. Endommagement et fissuration des argiles et des roches : amorçage et évolution……75

I.3.1. Phénomène de l'endommagement et de fissuration mécanique..……...75

I.3.2. Endommagement élastique……82

I.3.3. Fissuration de l'argile sous sollicitation hydrique……88

I.3.4. Endommagement de l'argile sous sollicitation mécanique……93

Conclusion……101

Introduction

Ce chapitre représente une synthèse bibliographique des thématiques liées aux mécanismes de l'endommagement de l'argile (saturée et non-saturée) sous différentes sollicitations. Ainsi, nous avons mené cette étude de l'état de l'art suivant un plan composé principalement de trois volets :

Le **premier volet** de ce chapitre concerne l'argile suivant trois aspects permettant d'apprécier un lien direct entre les résultats des études antérieures avec notre problématique de départ.

- Il convient d'abord de définir l'argile et ses propriétés physico-chimiques mais aussi son organisation texturale et structurale.

- Ensuite, partant des définitions de la première partie, nous allons nous intéresser à l'analyse de la microstructure de l'argile et son évolution sur différents chemins de contrainte. Ces observations peuvent être pertinentes pour expliquer les variations induites dans les propriétés élastiques du matériau sous chargement triaxial.

- La dernière partie de ce volet est dédiée à l'étude du comportement de l'argile comme milieu non-saturé soumis à une sollicitation hydrique. Cette synthèse nous permet de montrer la loi phénoménologique (courbe de rétention d'eau, l'évolution des paramètres hydriques, etc).

Le **second volet** est orienté vers la caractérisation du comportement élastique des sols argileux sous chargement mécanique.

- Dans un premier temps, nous présentons le comportement élastique des argiles et des sols sous chargement mécanique, ainsi que l'identification des paramètres pouvant avoir un effet sur les propriétés élastiques.

- Ensuite, nous allons définir le domaine élastique sur chemin triaxial, et exposer les méthodes expérimentales permettant la caractérisation des propriétés élastiques du matériau endommagé.

Enfin, nous exposons dans le **troisième volet** les phénomènes liés à l'amorçage et l'évolution de la fissuration dans les argiles.

- En premier, il nous convient de présenter les problématiques liées au phénomène de la fissuration engendré par le chargement auquel le sol est soumis. Un intérêt particulier sera porté sur l'analyse de la localisation des déformations et comprendre son effet sur le changement induit des propriétés élastiques.

- En second, nous allons aborder la thématique centrée autour de la fissuration des argiles soumises à une sollicitation hydrique de type "dessiccation". L'objectif est d'analyser les différents résultats antérieurs obtenus en termes de mécanismes d'apparition et de propagation de la fissuration et les techniques développées pour mieux expliquer ces phénomènes.

- Pour clôturer ce troisième volet, et en relation avec le second point, nous explorerons la fissuration provoquée par une sollicitation mécanique de flexion afin de tenter d'identifier une corrélation avec la fissuration par dessiccation.

Enfin, nous terminons ce chapitre par une conclusion générale permettant de résumer l'apport des résultats de la littérature et discuter des points liés à notre problématique.

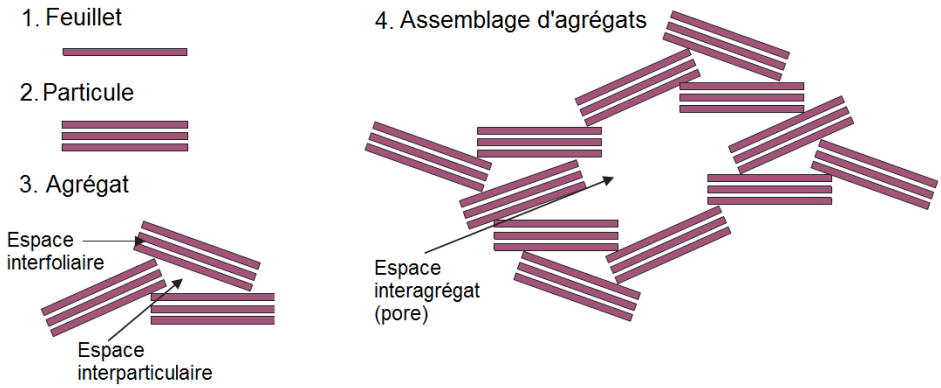
I.1. Argile : propriétés physiques, microstructure et milieux non-saturés

I.1.1. Généralités sur les argiles

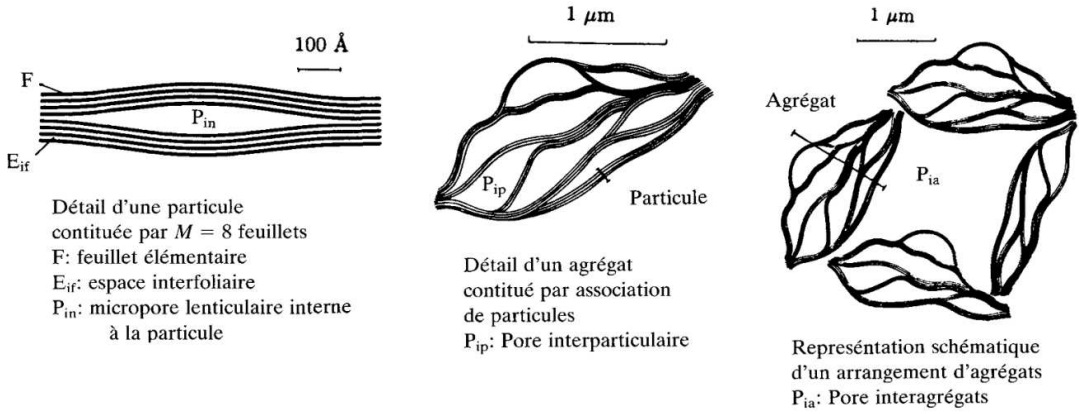
Avant de définir les argiles et leurs propriétés physiques, il est nécessaire de préciser la terminologie utilisée pour décrire la minéralogie associée en fonction de l'échelle d'étude.

I.1.1.1 Terminologie

L'organisation texturale des minéraux argileux (phyllosilicates) compte différents niveaux permettant de définir la structure des argiles. Trois unités structurales composent le minéral argileux : le feuillet, la particule et l'agrégat. Deux exemples d'organisation sont présentés sur la figure I.1 et concernent respectivement la kaolinite et la smectite.



(a) organisation structurale de la kaolinite



(b) organisation structurale de la smectite

Figure I.1 : Unités texturales d'après (a) Bergaya and Lagaly (2006) et (b) Touret et al. (1990).

a- Le feuillet :

La cellule cristalline de base des minéraux argileux, appelée cristallite, est constituée d'un feuillet et de l'espace interfoliaire.

- Les feuillets résultent de l'agencement des couches tétraédriques et octaédriques permettant de déterminer la classe du minéral argileux. Les tétraèdres sont formés d'un atome Si au centre et d'atomes O au niveau des quatre sommets (Fig. I.2 a). Les couches tétraédriques sont constituées à partir de ces groupements SiO^{4+}. Par ailleurs, les octaèdres sont constitués d'un ion métallique au centre (généralement l'aluminium Al^{3+}) entouré par d'ions OH- (Fig. I.2 b).

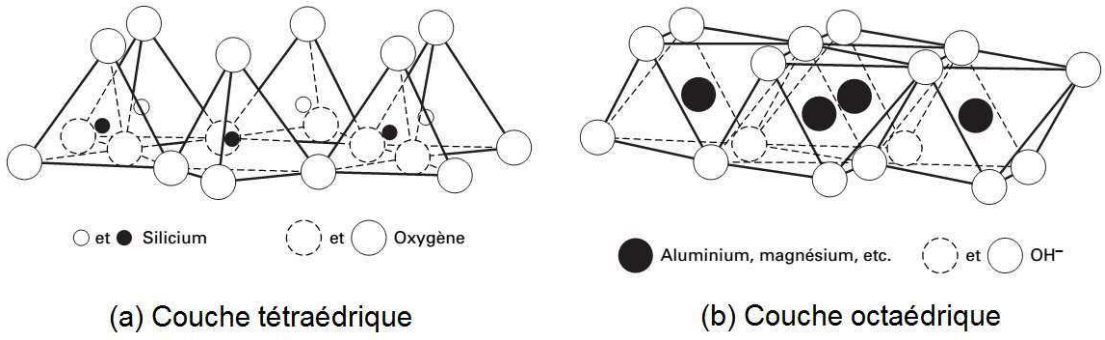


Figure I.2 : Représentation de la structure cristallographique des minéraux argileux (d'après Mitchell, 1993; cité par Delage et Cui, 2000).

La figure I.3 montre une représentation schématique de la structure des feuillets de la kaolinite. Le feuillet de kaolinite, d'une épaisseur de 0.7 nm, est constitué d'un empilement de deux niveaux tétraédrique et octaédrique (Fig. 1.3 a) permis par une substitution d'atomes d'oxygène de la couche tétraédrique par des ions OH^- de la couche octaédrique (Delage et Cui, 2000). Des cristallites de kaolinite sont schématisées sur la figure I.3 (b).

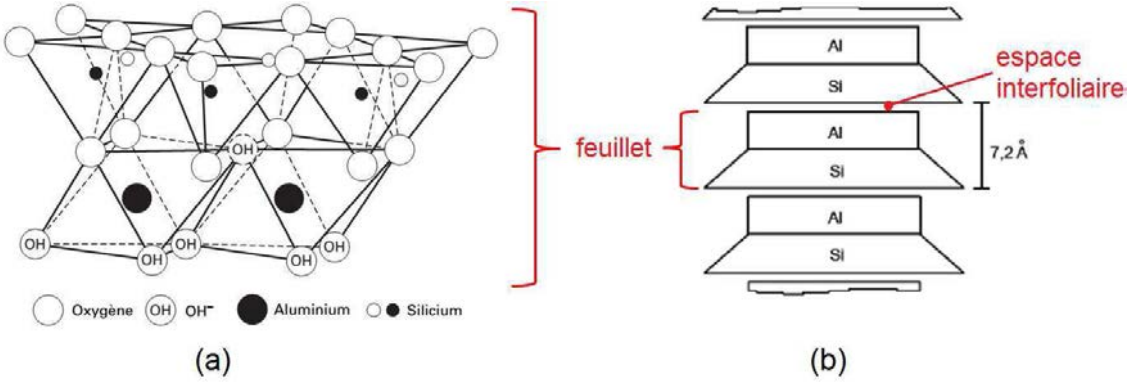


Figure I.3 : Représentation schématique : (a) feuillet de la kaolinite (Delage et Cui, 2000), (b) ensemble de cristallites de kaolinite (Bouziri, 2007).

Le feuillet et son cation compensateur constituent l'unité structurale élémentaire de base. La nature argileuse peut être déterminée à partir de la différence de morphologie et du taux d'occupation au sein du feuillet (Souli et al., 2007).

- Notion de la "**double couche électrique**" :

Des substitutions ioniques, dites isomorphes, provoquent un déficit de charges électriques engendrant l'attraction exercée par les argiles sur l'eau. Dans les couches tétraédriques, les charges proviennent de la substitution des atomes SiO^{4+} par Al^{3+} et dans les couches octaédriques, de la substitution des atomes Al^{3+} par ceux d'un autre métal Mg^{2+} ou Fe^{2+}.

Les cations dissous dans l'eau interstitielle sont attirés par le champ électrique négatif induit à la surface des plaquettes d'argile constituant la "double couche diffuse". Cette attraction engendre la formation d'une structure organisée de molécules d'eau, entourant les agrégats de particules argileuses, appelée eau adsorbée interparticulaire.

La distribution de charges et le potentiel de l'interface solide/liquide ont été étudiés par Gouy (1910) et Chapman (1913). La théorie Gouy-Chapman est mise en équation à partir du potentiel électrique Ψ exprimé en fonction de la distance x, par rapport à la surface des particules, et de l'épaisseur de la double couche κ^{-1} (dans Benchabane, 2006):

$$\psi = \psi_0 \exp(-\kappa x) \qquad [I.1]$$

Où Ψ_0 représente le potentiel à la surface des particules (x=0). L'expression de l'épaisseur de la double couche est donnée par l'équation I.2 (dans Dizier, 2011) :

$$\kappa^{-1} = \sqrt{\frac{DkT}{8\pi n_0 \varepsilon^2 \nu^2}} \qquad [I.2]$$

Avec : - D est la constante diélectrique du milieu,

- k est la constante de Boltzman (k =1.38×10^{-23} J/K),

- ε est la charge de l'électron (ε = -1.6×10^{-19} C),

- ν représente la valence des cations.

- T et n_0 sont respectivement la température et la concentration de l'électrolyte.

La figure I.4 (Luckham et Rossi, 1999) représente les variations du potentiel électrique en fonction de la distance à partir de la surface des particules à faible et forte force ionique. Les résultats montrent une diminution exponentielle du potentiel et plus la force ionique est élevée, plus la double couche est comprimée.

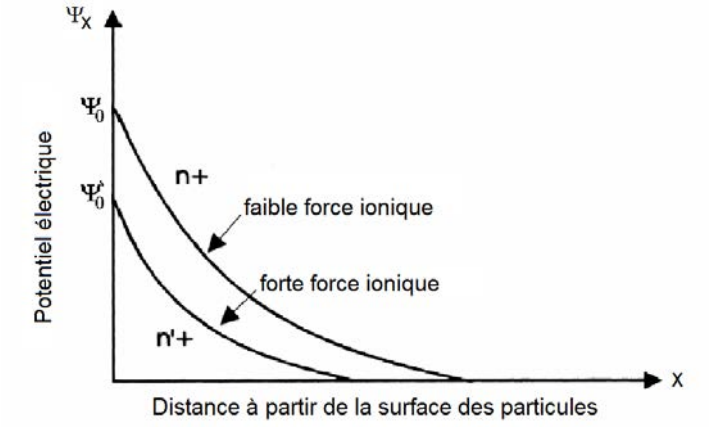


Figure I.4 : Représentation schématique de la décroissance du potentiel Ψ_x et de la concentration de la double couche électrique dues à une augmentation de la force ionique (Luckham et Rossi, 1999).

Afin de mieux comprendre le phénomène, Benchabane (2006) a proposé une représentation synthétique (Fig. I.5) de la double couche électrique décrite en termes de plans de molécules d'eau et de contre-ions.

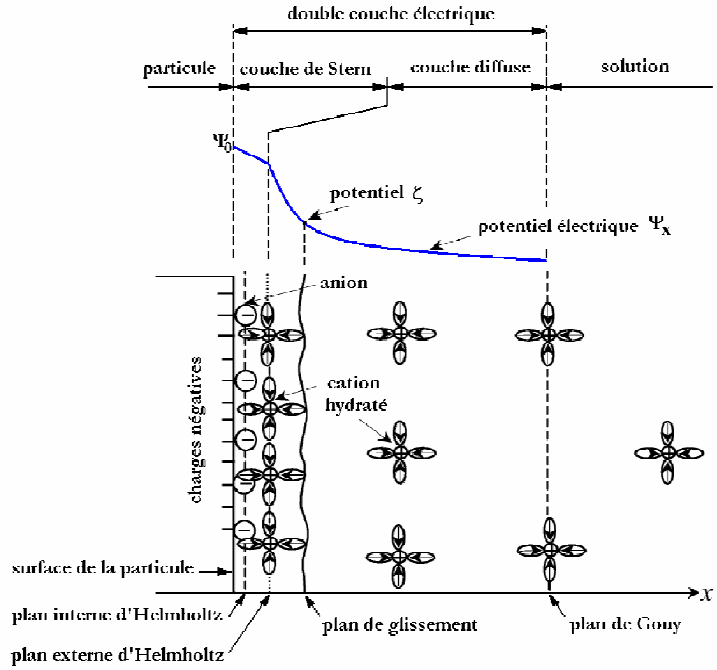


Figure I.5 : Notion de la double couche électrique et l'évolution du potentiel Ψ en fonction de la distance à la particule (d'après Güven and Pollastro, 1992 et Li et al., 2003 dans Benchabane, 2006).

Benchabane (2006) a reproduit le diagramme proposé par Li et al. (2003) avec une modification qui tient compte de la description donnée par Güven and Pollastro (1992).

La figure I.5 montre une influence des charges négatives localisées à la surface des particules sur la distribution ionique dans la région à proximité entre la particule et l'eau. Ainsi, la concentration en contre-ions augmente près de la surface et la double couche électrique apparait autour de la particule.

→ **Forces attractives de Van Der Vaals** :

La théorie de la double couche, dont la validation a été faite essentiellement dans le cas des suspensions colloïdales (Olphen, 1977), permet de décrire les forces inter-particulaires d'attraction et de répulsion afin d'expliquer, respectivement, les phénomènes de floculation et de dispersion. Ces forces résultent de plusieurs liaisons, notamment la liaison hydrogène entre les atomes d'oxygène et les groupes hydroxyles formés à partir de la dissociation des molécules d'eau.

L'attraction entre deux plaquettes est due aux forces de Van Der Waals. L'énergie attractive entre deux plaquettes semi-infinies est donnée par l'expression suivante :

$$V_A = -\frac{A}{12\pi}\left(\frac{1}{H^2}+\frac{1}{(H+2t)^2}-\frac{1}{(H+t)^2}\right) \qquad [I.3]$$

Où "A" représente la constante de Hamaker (1937), "H" la distance entre les surfaces des plaquettes et "t" l'épaisseur de la plaquette.

Dans le cas où le milieu de dispersion est occupé par un liquide, au lieu du vide, la constante de Hamaker à prendre en compte est la constante effective calculée par la formule suivante :

$$A' = \left(\sqrt{A_2} - \sqrt{A_1}\right)^2 \qquad [I.4]$$

Où les constantes A_1 et A_2 référent respectivement au milieu et aux particules.

En effet, les doubles couches ont tendance à se repousser à cause de leur charge positive (Fig. I.4). Lorsque l'épaisseur de la double couche κ^{-1} est faible (faible température et forte concentration), les plaquettes s'attirent et provoquent le phénomène de "floculation". En revanche, dans le cas contraire, c'est le phénomène de "dispersion" qui se produit par la répulsion des plaquettes. L'intensité de ces forces dépend de la chimie de l'eau et du potentiel électrique Ψ.

b- La particule :

La particule est définie par un ensemble de "M" feuillets face-à-face séparés par un nombre de couche d'eau variant entre 0 et 3 (Fig. I.6). L'observation de la structure de la particule suivant le plan perpendiculaire au plan des feuillets permet de distinguer deux situations : une structure ordonnée quand la distance séparant les feuillets est constante, et une structure désordonnée quand les distances interfoliaires sont variables (Pons, 1980; Ben Rhaïem et al., 1986).

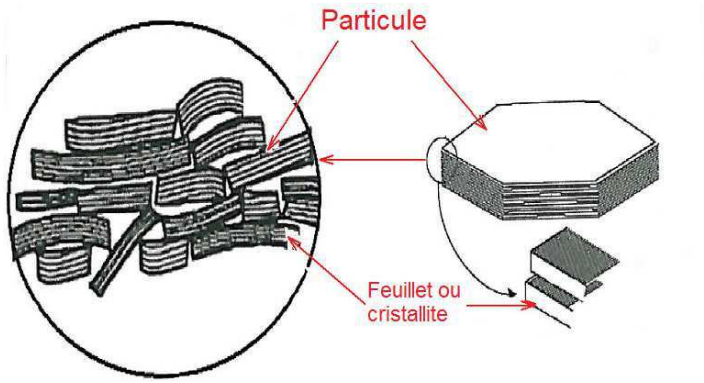


Figure I.6 : Schéma de la particule de kaolinite (Tessier, 1984).

Par ailleurs, l'empilement des feuillets se fait sous forme de châteaux de cartes dont l'assemblage est plus au moins serré et dépendant du niveau de consolidation.

c- Les agrégats :

L'agrégat est formé par un assemblage de particules où l'arrangement est géré par le type de force inter-particulaires, d'attraction ou de répulsion, dominant. L'association de plusieurs agrégats forme un assemblage appelé super-agrégat (cluster).

d- La texture :

La texture dite "fabric" (Morgenstern and Tchalenko, 1967), correspond à l'arrangement des particules, des groupes de particules et l'espace poral dans le sol. L'étude des régimes d'imbibition et les observations microscopiques réalisées par Turki (1987) et Touret (1988) (cités dans Touret et al., 1990) permettent de donner une description qualitative de la structure et de la texture des matériaux à saturation. Ainsi, à partir de ces résultats, la présence d'agrégats de petite taille est mise en évidence en délimitant entre eux des pores de dimension relativement importante (>1µm).

Afin de décrire les modifications de la structure intervenant au cours des changements d'état hydrique et mécanique, Tessier (1984) a souligné l'importance de définir un niveau d'association des particules élémentaires à l'échelle microscopique.

Tessier (1984) a proposé le terme "unité morphologique" ou "particule primaire" pour définir cette structure élémentaire dont la forme varie selon la famille minérale considérée (Fig. I.7) :

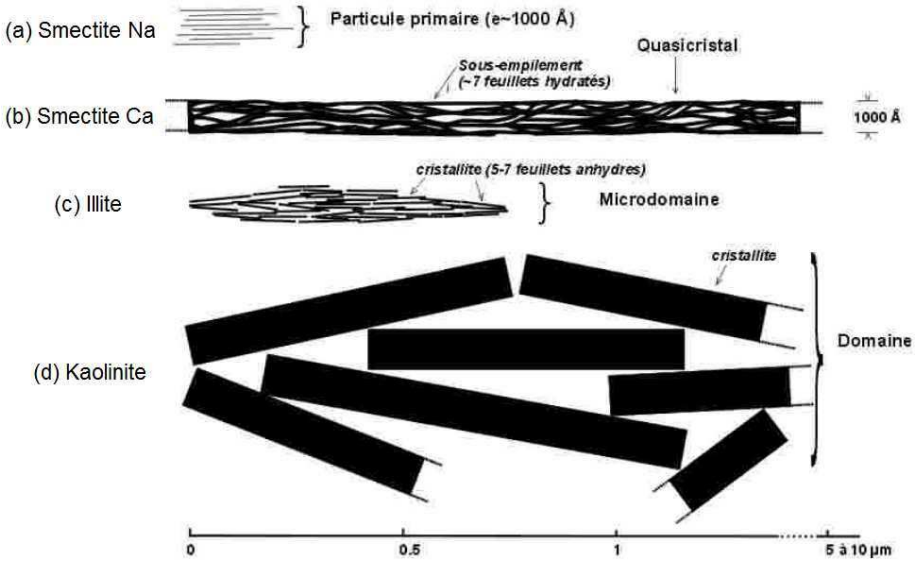


Figure I.7 : Représentation schématique des particules primaires des principales familles de minéraux argileux (d'après Tessier, 1984).

Dans le cas de la smectite sodique, la figure I.7 (a) montre un regroupement du même type mais avec seulement une dizaine de feuillets au sein de la particule primaire, appelée "tactoïde".

Dans le cas de la smectite calcique (Fig. I.7 b), les feuillets se regroupent en association face-face sous forme de "quasi-cristaux" au sein desquels il est difficile de distinguer les particules élémentaires au MEB.

Dans le cas des illites (Fig. I.7 c), la particule primaire est constituée à partir d'un regroupement de "micro-domaines".

Enfin, dans le cas de la kaolinite (Fig. I.7 d), la particule primaire est le plus petit agrégat de cristallites, appelé "domaine", de dimension supérieure aux micro-domaines de l'illite.

I.1.1.2 Classification des minéraux argileux

Le mode d'agencement des tétraèdres et octaèdres est considéré comme le critère le plus utilisé pour classer les minéraux argileux. Ceci permet de distinguer trois types de minéraux représentés sur la figure I.8 :

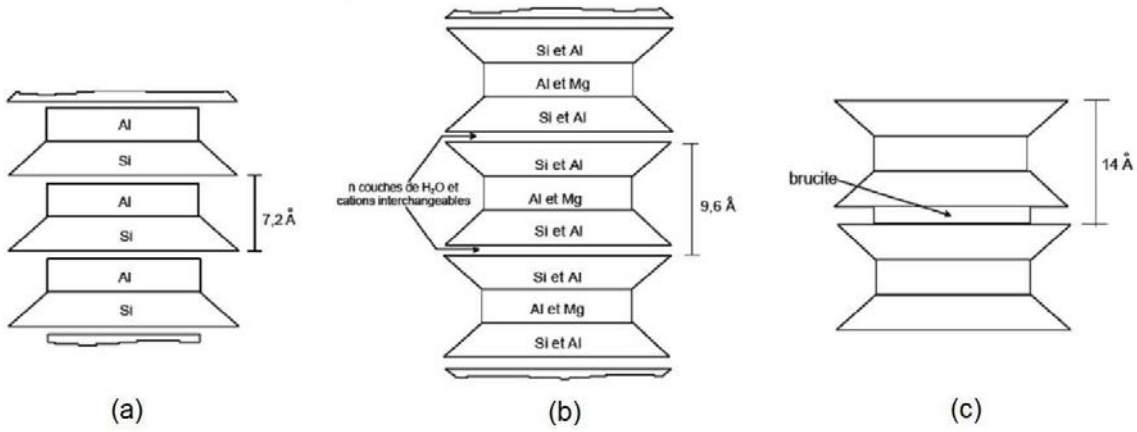


Figure I.8 : Schéma des particules de (a) kaolinite, (b) smectite et (c) chlorite (Truche, 2010).

- Type 1:1 ou "TO" composé d'une couche octaédrique et une couche tétraédrique avec une distance basale proche de 7 Å, il s'agit par exemple de la kaolinite :

La kaolinite (Fig. I.8 a) appartient à la famille des phyllosilicates de type 1:1 (TO) dont la formule structurale est $Al_2Si_2O_5(OH)_4$. La superposition de feuillets de kaolinite conduit au développement d'une liaison dite "hydrogène" O-H entre les O^- se trouvant sur la surface supérieure et les H^+ de la surface inférieure. La particule de kaolinite est formée sous certaines conditions : une faible teneur en électrolyte, un faible pH et l'enlèvement des ions pouvant se floculer avec la silice par lessivage. La kaolinite se trouve en abondance dans les régions intertropicales de forte précipitation, comprise dans la fraction argileuse des sols fortement érodés sur des surfaces terrestres anciennes.

- Type 2:1 ou "TOT" composé d'une couche octaédriques et deux couches tétraédriques avec une distance basale variable entre 9 et 15 Å (cas de la montmorillonite, smectite, illite, …etc);

La smectite (Fig. I.8 b) résulte d'un empilement d'une couche octaédrique encadrée par deux couches tétraédriques et appartient à la famille des phyllosilicates de type 2:1 (TOT). Les atomes de silicium composent majoritairement les tétraèdres où des substitutions avec les cations "Al" et "Fe" sont possibles. Ceci confère à la particule le potentiel de gonflement. Les conditions favorables à la formation de la smectite sont : une forte teneur en électrolyte, un fort pH et une présence dominante de Mg^{2+} et Ca^{2+}. La smectite se trouve dans les zones tempérées d'origine glaciaire ou périglaciaire sous un climat aride à semi aride où les précipitations sont très peu abondantes ou tombent uniquement sous forme de neige.

- Type 2:1:1 ou "TOTO" similaire au type 2:1 sauf que l'espace interfoliaire est occupé par une couche d'octaèdres et la distance basale est de 14 Å (cas des chlorites) :

Les chlorites (Fig. I.8 c) appartiennent à la famille des phyllosilicates de type 2:1:1 (TOTO). Leur structure est plus complexe et se composent d'un feuillet de type 2:1 entre lequel s'introduit un feuillet de brucite.

I.1.1.3 Surface spécifique des particules argileuses

Les particules argileuses se trouvent généralement sous trois formes structurales possibles présentées sur la figure I.9 (Velde, 1995) :

- Sous forme de "flocons" (flake en anglais), définis par une dimension similaire suivant deux directions et une épaisseur égale à 1/20ème de la longueur.

- Sous forme de "lattes" (lath en anglais), caractérisées par une épaisseur égale à 1/20ème de la longueur et une dimension privilégiée plus longue que l'autre.

- Sous forme d'"aiguilles" (needle en anglais), très élancées avec une dimension plus grande que les deux autres.

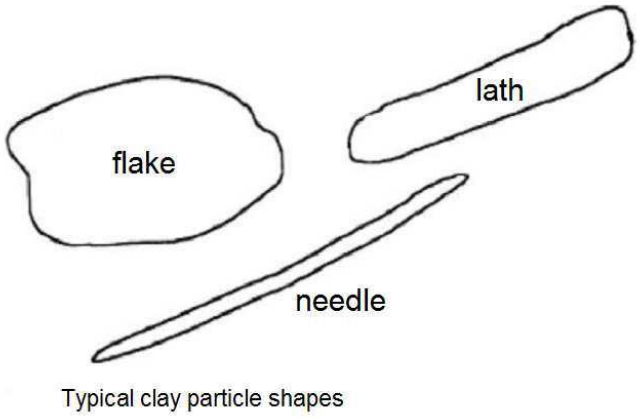


Figure I.9 : Différentes formes de particules argileuses d'après Velde (1995).

La surface spécifique S_s des minéraux argileux est déterminée à partir du rapport de la surface totale A_s par unité de masse M selon la relation suivante exprimée en (m²/g) (Valencia, 2008) :

$$S_s = \frac{A_s}{M} \qquad [I.5]$$

Parmi les facteurs influençant la valeur de la surface spécifique, Valencia (2008) cite la taille et la forme des particules argileuses, la composition minéralogique ainsi que l'état de surface dû aux pores et d'autres imperfections.

La surface spécifique totale est définie par la somme de deux surfaces : une surface externe comprise entre les particules et une surface interne correspondant à l'espace interfoliaire (Fig. I.10).

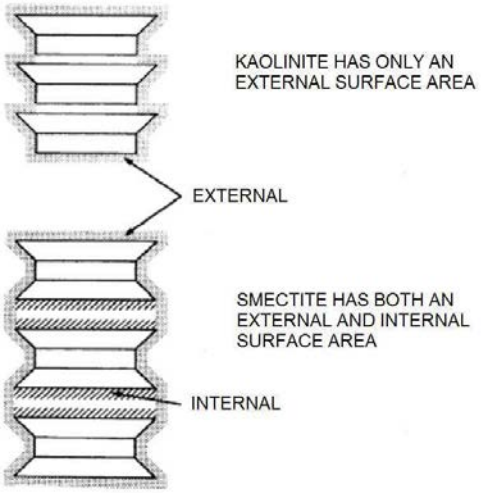


Figure I.10 : Surface spécifique des particules argileuses d'après Eslinger and Peaver (1988).

Eslinger and Peaver (1988) donnent la surface spécifique de quelques argiles. Certaines d'entre elles n'ont pas de surface interne, par exemple, la kaolinite avec une surface totale (externe) de l'ordre de 15 m^2/g. La smectite possède la surface totale maximale égale à 800 m^2/g.

Yukselen and Kaya (2006) (cité dans Valencia, 2008) ont regroupé les méthodes de mesure de la surface spécifique dans deux catégories principales :

- **L'adsorption de gaz** qui mesure la surface spécifique externe par l'adsorption des molécules simples telles que l'azote (N_2) à basses températures ou la vapeur d'eau.

- **L'adsorption des molécules** qui mesure la surface spécifique totale des particules par l'adsorption des liquide polaires tels que l'éthylène glycol, le bleu de méthylène et d'autres.

I.1.2. Microstructure des argiles

L'analyse des argiles à l'échelle microscopique contribue à la compréhension des phénomènes observés macroscopiquement et obtenus sur un chargement mécanique. Cette approche adoptée par différents chercheurs comme (Delage et Lefebvre, 1984; Hicher et al., 2000; Sivakumar et al.,2002) permet de lier les mécanismes locaux au comportement mécanique et/ou hydriques à l'échelle macroscopique.

Du point de vue de l'investigation expérimentale, différentes techniques complémentaires permettent d'analyser l'état de la microstructure des argiles. La porosimétrie au Mercure (PAM) couplée à l'observation au microscope électronique à balayage (MEB) sont les techniques les plus souvent utilisées.

En ce basant sur l'hypothèse d'une forme ellipsoïdale de la particule ou de l'agrégat, Hicher et al. (2000) ont proposé trois paramètres pour analyser les photographies prises au MEB permettant le suivi de l'organisation des particules argileuses de kaolinite et de bentonite :

- L'indice de forme, qui représente le rapport entre la longueur et la largeur des particules individuelles ou des agrégats,

- La surface moyenne, qui correspond à celle de l'ellipsoïde,

- La concentration des particules, définie par le nombre de particules par unité de surface.

Dans ce cas, l'orientation des particules peut être considérée comme celle de l'axe principal de l'ellipsoïde par rapport à l'horizontale (Lou et al., 1992; Grunberger et al., 1994; Hicher et al., 2000).

Nous présentons les principaux travaux menés sur l'étude de l'évolution de la microstructure et l'orientation des particules sur différents chemins de contrainte et l'analyse de leur influence sur le comportement des argiles.

I.1.2.1 Microstructure et chemin oedométrique

Vasseur et al., (1995) ont réalisé des observations microscopiques au MEB de l'orientation des particules de kaolinite de St Austell (Cornwall, UK) au cours du chargement oedométrique avec une contrainte verticale effective σ'_v comprise entre 0.1 et 50 MPa.

La figure I.11 représente la distribution angulaire de l'orientation des particules argileuses à différents niveaux de chargement.

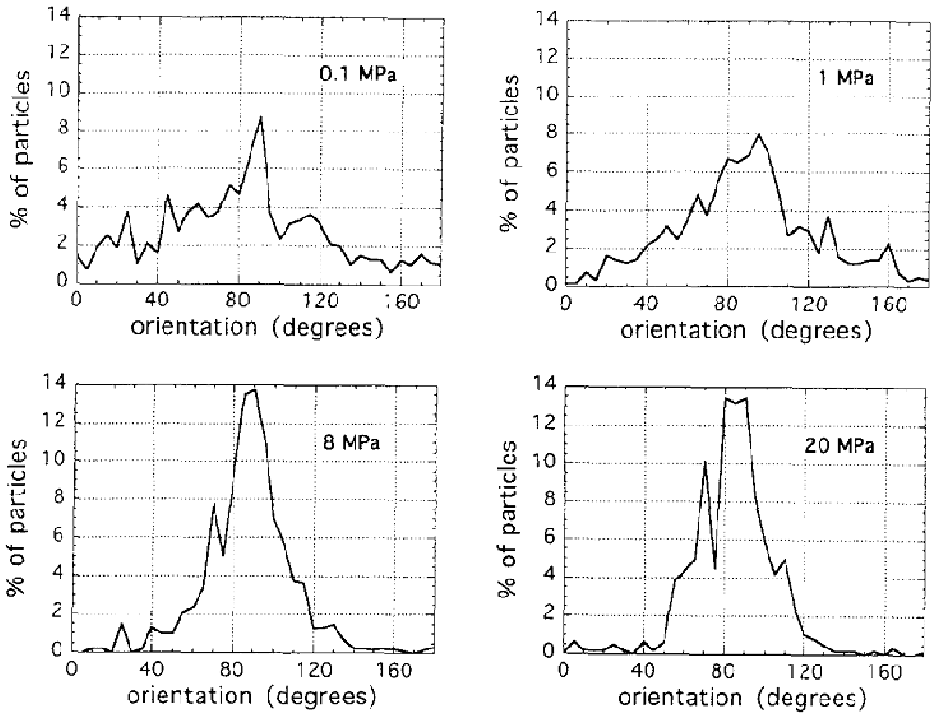


Figure I.11 : Orientations des particules de kaolinite sur chemins oedométriques (Vasseur et al., 1995).

Les résultats montrent une distribution maximale suivant la direction perpendiculaire au sens du chargement. A mesure que la contrainte verticale effective augmente, les particules en ont tendance à devenir parallèles en elles. Ceci a pour conséquence de faire apparaître un pic sur la courbe de pourcentage de particules en fonction de l'orientation. Les particules chargées à σ'_v = 20 MPa mettent en évidence une distribution tri-modale avec l'apparition de deux pics décalés de 20° du pic initial. L'apparition de plans de cisaillement autour de l'orientation principale explique cette apparition de deux pics décalés (Grunberger et al., 1994). Le chargement peut induire une anisotropie (Delage et Lefebvre, 1984). En général, les contraintes de consolidation tendent à orienter et aligner les plaquettes et les agrégats perpendiculairement à l'axe du chargement vertical (Mitchell, 1976; Grunberger et al., 1994; Hicher et al., 2000).

L'étude menée par Hammad (2010) sur la kaolinite, après deux paliers de chargement oedométriques (200 et 1000 kPa), a permis d'obtenir les orientations de particules présentées sur la figure I.12. Il s'agit de traitement de photographies au MEB sous forme de rosaces représentant le pourcentage des particules en fonction de leur orientation.

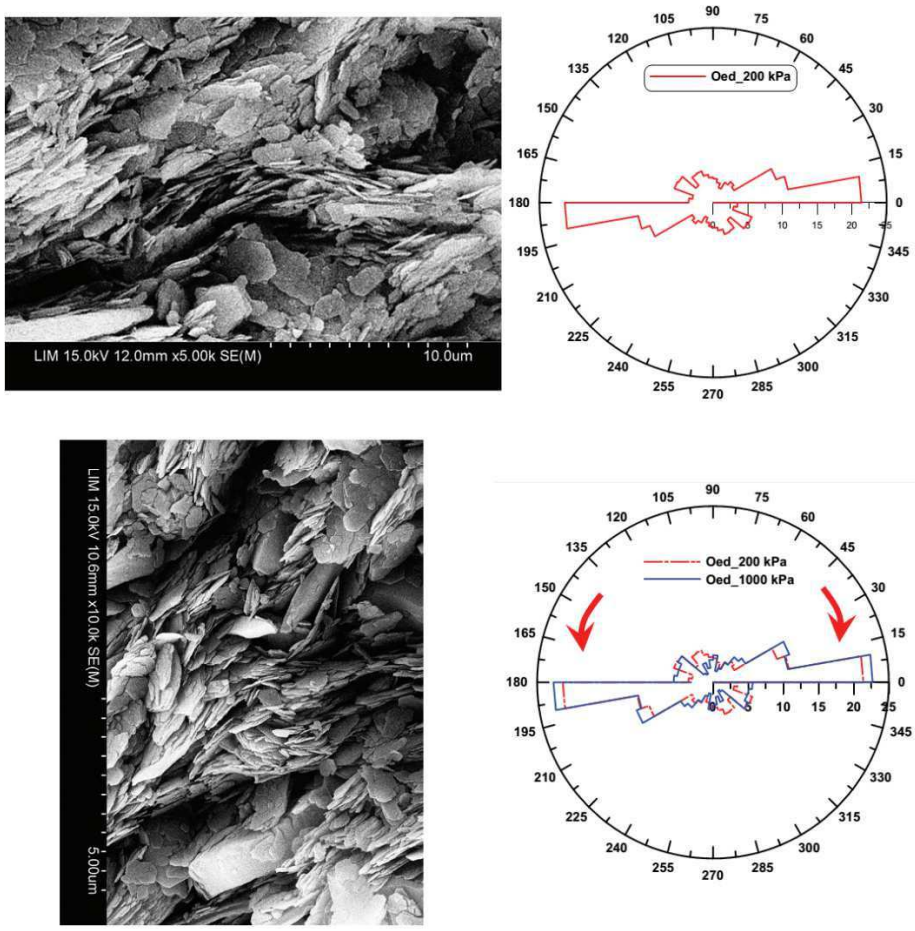


Figure I.12 : Organisation des particules de kaolinite sur chemin oedométrique (Hammad, 2010).

L'analyse de Hammad (2010) montre que les particules de kaolinite s'orientent d'une manière privilégiée dans la direction perpendiculaire à l'axe de chargement à mesure que la contrainte verticale augmente jusqu'à 1000 kPa.

I.1.2.2 Microstructure et chemin isotrope

Le chargement isotrope est appliqué sur l'échantillon d'argile, reconstituée et remaniée, soumis préalablement à la consolidation unidimensionnelle dans un consolidomètre. Cette technique de consolidation induit une anisotropie dans le matériau et les particules sont fortement orientées.

Sivakumar et al. (2002) ont réalisé deux types d'essais de chargement isotrope sur la kaolinite préparée de manières différentes.

- Dans le premier type, l'argile sous forme de boue ($w = 1.5\ w_L$) est consolidée dans une cellule triaxiale, d'une part jusqu'à une contrainte isotrope effective de 500 kPa avec un seul incrément. D'autre part, avec plusieurs incréments jusqu'à la même contrainte isotrope de 500 kPa.

- Dans le deuxième type, l'échantillon de boue est consolidé jusqu'à une contrainte isotrope de 50 kPa. Puis, il est déchargé d'une manière isotrope jusqu'à zéro avant d'être

malaxé à la main sur place après avoir démonté la cellule. A partir de cet état, d'une part l'échantillon est reconsolidé jusqu'à une contrainte isotrope de 500 kPa en un seul incrément. D'autre part, l'échantillon est reconsolidé avec de petits incréments jusqu'à une contrainte isotrope de 500 kPa.

Les observations au MEB réalisées sur chaque série, suivant les deux plans horizontal et vertical, sont présentées sur la figure I.13.

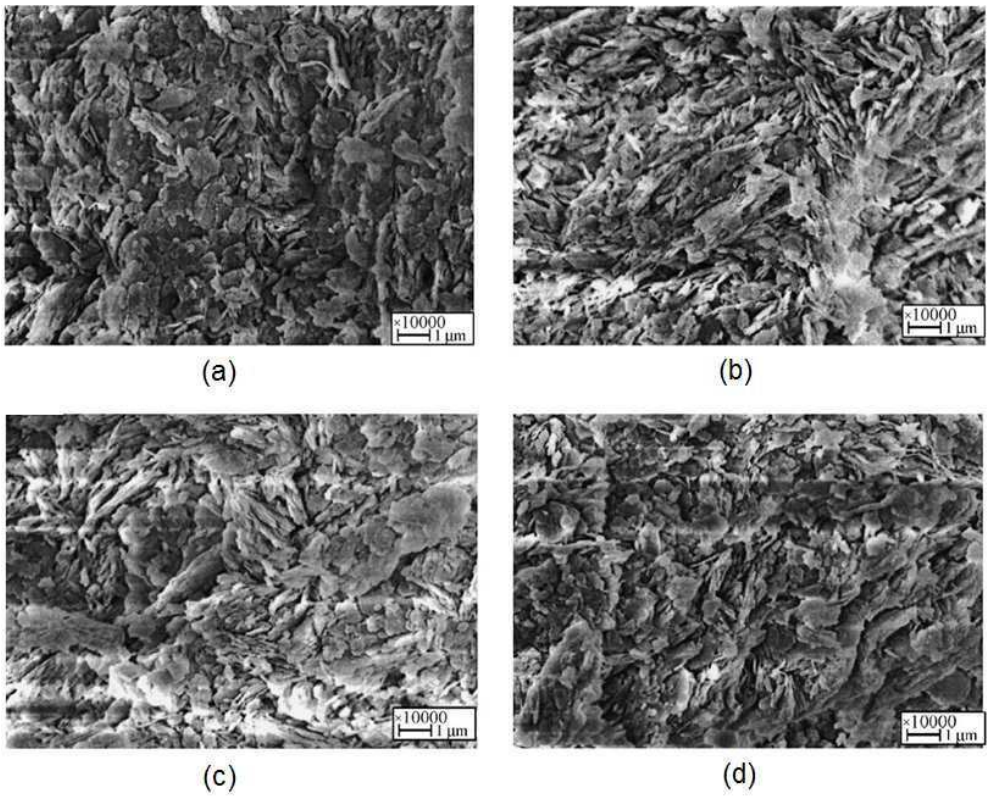


Figure I.13 : Photographies au MEB : (a) plan horizontal - essai premier type, (b) plan vertical - essai premier type, (c) plan horizontal - essai deuxième type, (d) plan vertical - essai deuxième type (Sivakumar et al., 2002).

Les photographies au MEB montrent que les particules sont orientées d'une façon horizontale dans le cas des essais du premier type (Fig. I.13 a et b) malgré les conditions de consolidation isotrope.

Sivakumar et al. (2002) attribuent cette anisotropie observée au mode de drainage unidimensionnel d'une part, et à la forme des particules argileuse ainsi qu'au mode d'application de la contrainte isotrope (un seul incrément) d'une autre part. Dans ce dernier cas, l'équilibre des particules est conditionné par les forces d'attraction-répulsion qui s'exercent au sein de la suspension. Par ailleurs, les conditions de dépôt conduisent à une structure face-face que la contrainte appliquée a du mal à modifier, expliquent les auteurs.

Dans le cas des essais du deuxième type (Fig. I.13 c et d), les photographies au MEB montrent que les particules sont orientées d'une manière plus isotrope. Le processus de malaxage de l'échantillon après le déchargement a détruit les orientations préférentielles.

Jusqu'à présent, les résultats de Sivakumar et al. (2002) mettent en évidence une anisotropie structurale dépendante des conditions initiales de préparation de l'argile. Afin d'analyser l'influence du niveau de contrainte isotrope appliquée sur cette anisotropie, nous présentons les observations au MEB réalisées par Hicher et al. (2000) et Bouziri (2007) pour des contraintes isotropes respectives p'_{ic}= 300 et 1400 kPa.

Les observations au MEB de Hicher et al. (2000) (Fig. I.14) montrent que la consolidation isotrope à p'_{ic} = 300 kPa conduit à une structure isotrope.

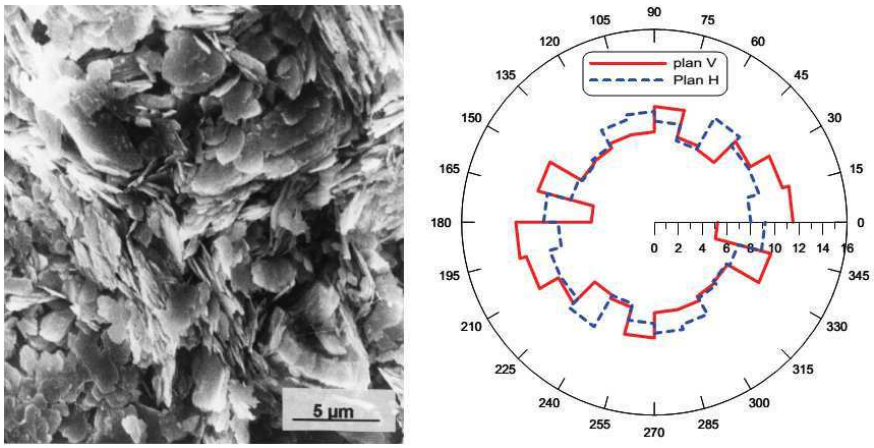


Figure I.14 : Observation sur la kaolinite consolidée isotropiquement à 300 kPa (Hicher et al., 2000).

Bouziri (2007) a appliqué une contrainte isotrope de p'_{ic} = 1400 kPa sur la même kaolinite et ont obtenu, par l'analyse au MEB, les résultats de microstructure présentés sur la figure I.15. Ces études montrent également une tendance vers l'isotropie structurale.

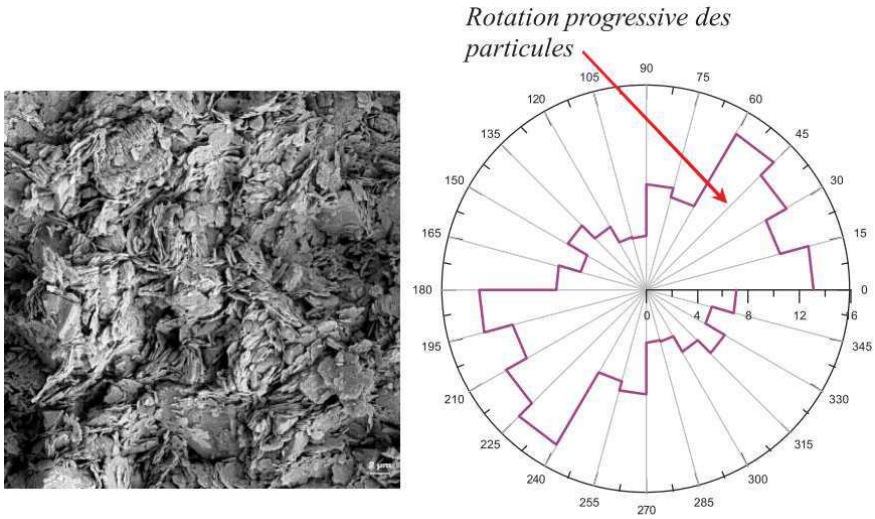


Figure I.15 : Observation sur la kaolinite consolidée isotropiquement à 1400 kPa (Bouziri, 2007).

Ces résultats mettent en évidence l'effet de la contrainte isotrope p'_{ic} sur la microstructure. En effet, à mesure que la contrainte augmente, la structure de l'argile tend vers une isotropie structurale induite par le désordre des orientations des particules dû au chargement appliqué. Cependant, Bouziri (2007) constate que par endroit l'orientation des particules argileuses suivant le plan horizontal reste présente.

I.1.2.3 Microstructure et chemin triaxial

Bouziri (2007) a analysé, par la PAM (porosimétrie au Mercure) et au MEB (microscope électronique à balayage), le couplage entre le comportement macroscopique et les mécanismes d'orientation des particules argileuses.

L'échantillon de boue (w= 1.5w_L) est découpé sous forme d'éprouvette cylindrique avec un élancement égale à 1 (h_0= d_0= 35mm). L'essai triaxial est surconsolidé avec un degré de surconsolidation OCR =1.4 et le chemin de contrainte appliqué à l'échantillon est décrit sur la figure I.16 (a). Les observations au MEB ont été réalisées à différents niveaux de déformation axiale ε_1 en trois points (Fig. I.16 b) sur le chemin à σ'_3=constante avec OCR=1.4.

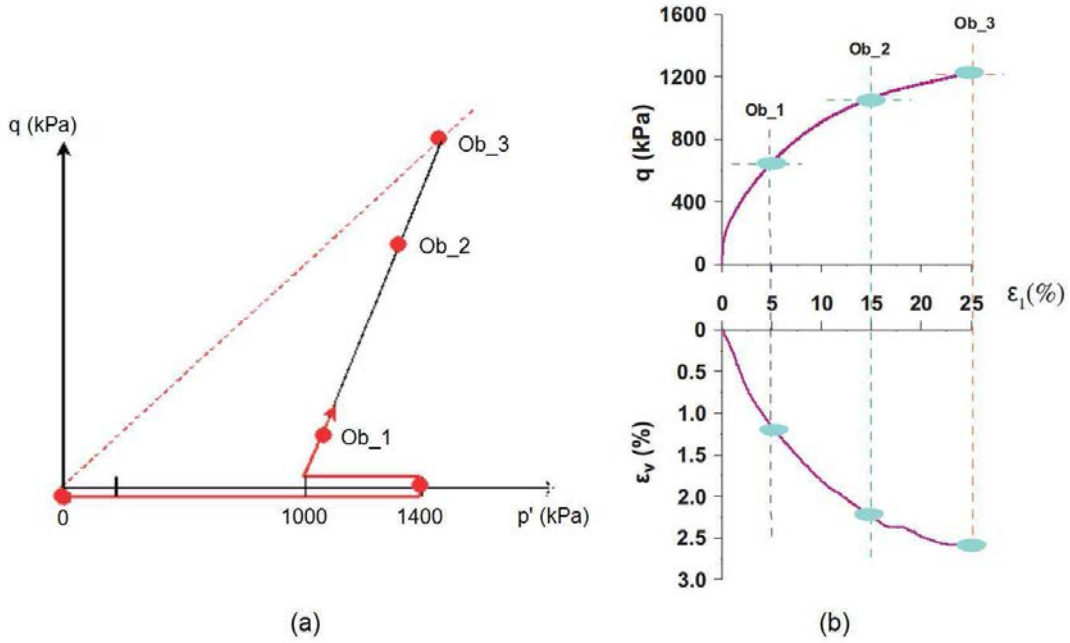


Figure I.16 : Chargement triaxial surconsolidé à σ'_3=1000 kPa : (a) chemin de contrainte, (b) points d'observation au MEB à ε_1=5, 15 et 25 % (Bouziri, 2007).

L'observation Ob_1 est effectuée au début du chargement triaxial après 5% de déformation axiale. L'analyse des photographies au MEB montre que l'isotropie structurale, observée à l'état isotrope, tend à se maintenir, et se caractérise par le désordre dans l'orientation des particules. Après 15% de déformation axiale (Ob_2), une réorientation des particules est mise en évidence suivant une orientation privilégiée entre 165° et 150°.

Au point d'observation Ob_3 (ε_1=25%), les particules sont majoritairement orientées entre 30° et 45° dans le plan vertical (Fig. I.17).

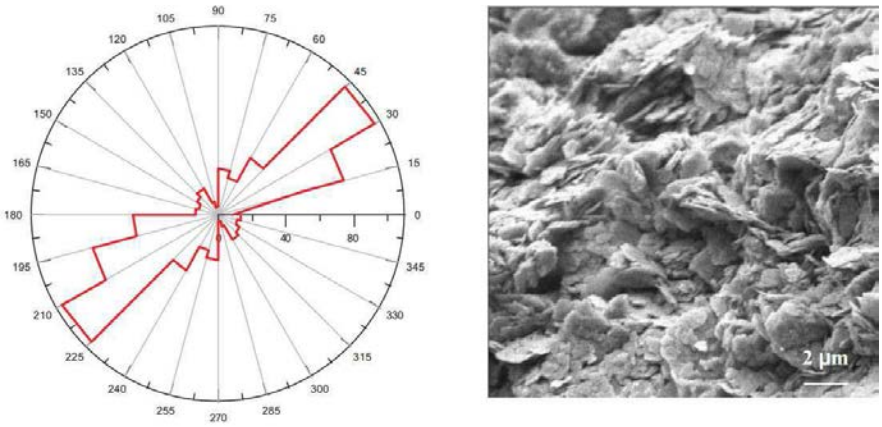


Figure I.17 : Orientation des particules au point d'observation Ob_3 dans le plan vertical (Bouziri, 2007).

Dans le plan horizontal, au niveau du point Ob_3, des micro-fissures apparaissent clairement et peuvent être observées sur la photographie au MEB illustrée dans la figure I.18 par la zone encadrée en rouge.

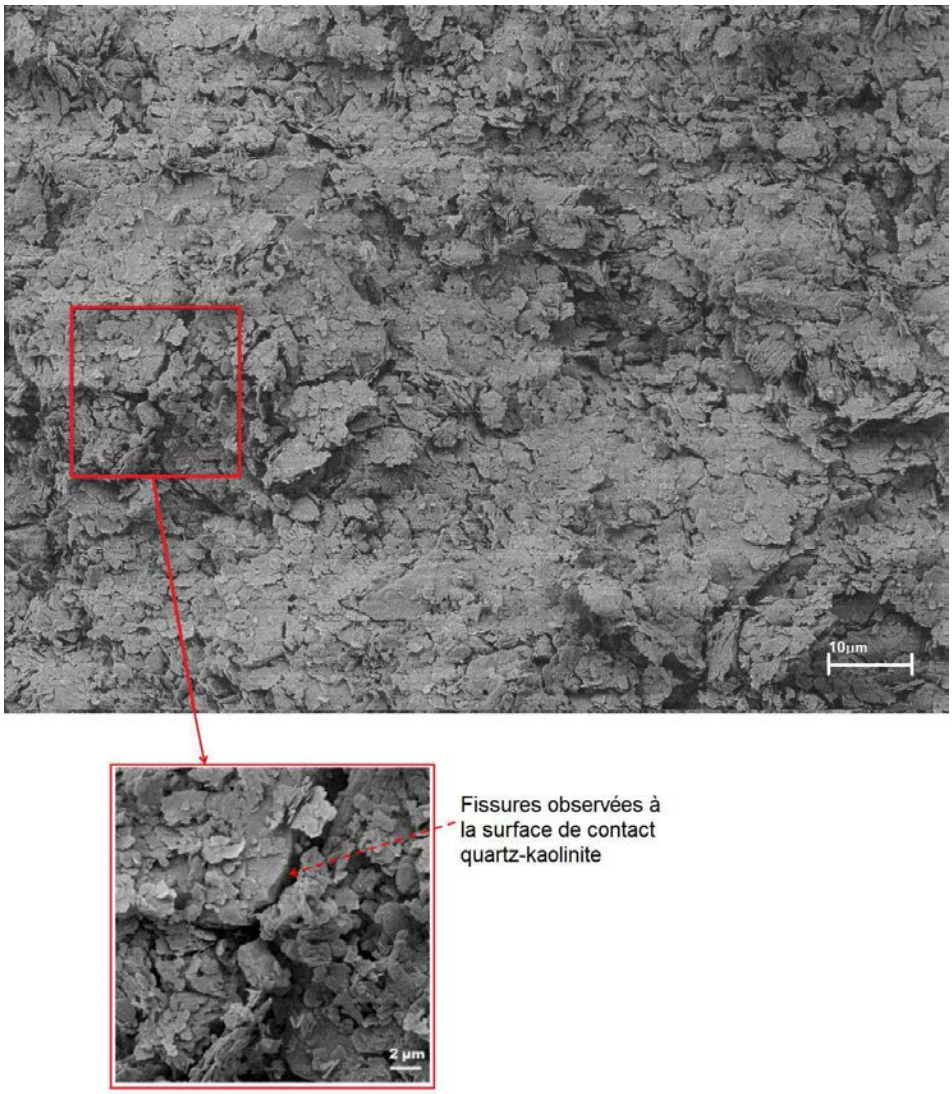


Figure I.18 : Photographie au MEB prise au point OB_3 dans le plan horizontal (Bouziri, 2007).

Aux points Ob_2 et Ob_3, Bouziri (2007) a constaté que les observations faites dans le plan vertical permettent de mettre en évidence un mécanisme de microfissuration caractérisé par l'association de particules en groupe face contre face. D'autre part, dans le plan horizontal, les auteurs ont identifié un autre mécanisme de microfissuration qui se développe entre des grains de quartz et la matrice argileuse.

Hicher et al. (2000) ont réalisé des observations au MEB sur le même type d'argile (Kaolinite P300) sur chemin triaxial drainé à σ'_3=constante= 300 kPa. Les photographies au MEB ont été prises à différents niveaux de déformation axiale ε_1= 0; 9.1 et 19.5 %. Les résultats sont concordants avec ceux de Bouziri (2007) et montrent (à ε_1= 19.5%) une réorientation des particules dans le plan vertical conduisant à une anisotropie structurale.

Une bande de cisaillement est mise en évidence (Fig. I.19) avec des particules voisines, avec une taille plus petite, orientées suivant ce plan de cisaillement.

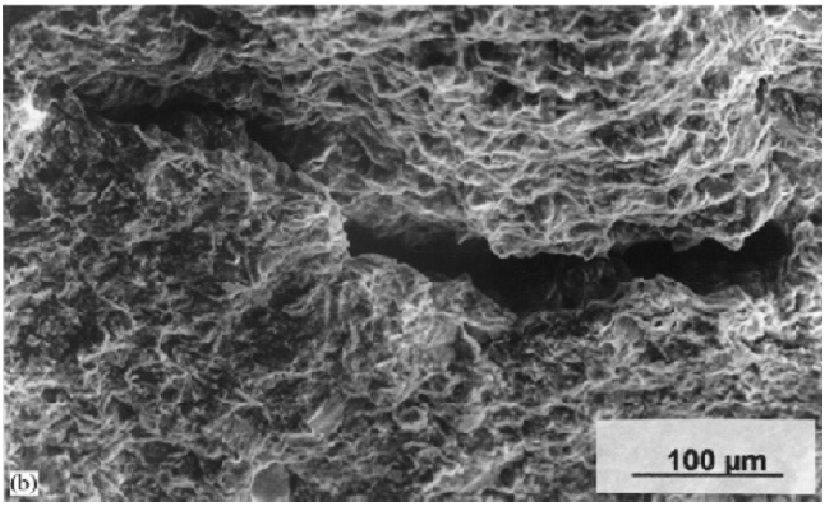


Figure I.19 : Orientation des particules en chargement triaxial classique (σ'_3=300 kPa) à ε_1=19.5% dans le plan vertical (Hicher et al., 2000).

Ces études nous permettent de voir que la réorientation des particules sur chemin triaxial classique est visible dans le domaine des grandes déformations. Cette réorientation est observable dans le plan vertical avec des particules organisées face contre face et inclinées sous un angle proche de la bande de cisaillement (Hicher et al., 2000; Bouziri, 2007).

I.1.3. Comportement de l'argile comme milieu non saturé - Evolution des paramètres hydriques

L'étude du comportement des sols non-saturés nécessite une bonne connaissance des mouvements de l'eau et de l'influence de la pression interstitielle et la pression de l'air sur le comportement mécanique (relation contrainte-déformation) du sol lorsqu'il est non-saturé.

Wheeler et al. (2003) donnent une représentation idéalisée d'un sol non-saturé (Fig. I.20). L'eau est présente sous différents états :

- L'eau libre contenue dans la cavité (pore),

- Les ménisques localisés au niveau des plus petits pores (eau interparticulaire).

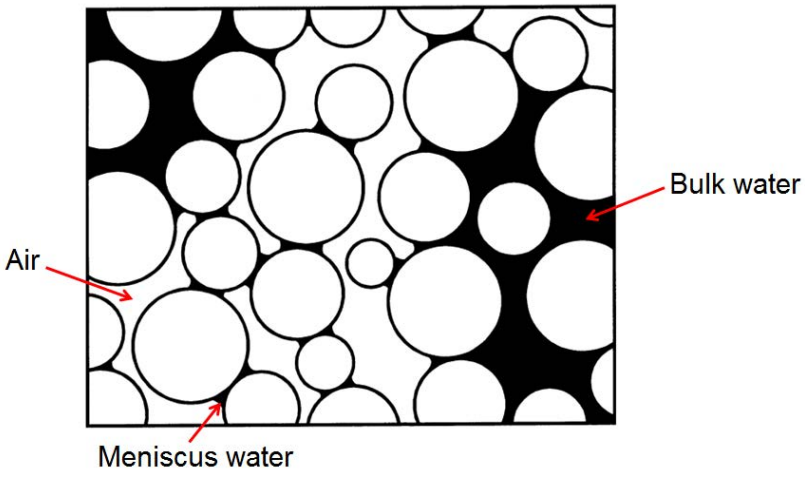


Figure I.20 : Représentation schématique d'un sol non-saturé (par Wheeler et al., 2003).

En effet, la taille des ménisques d'eau diminue à mesure que le sol est désaturé. Par ailleurs, l'intensité de la succion dans un milieu non-saturé est inversement proportionnelle au rayon de courbure des ménisques. Cela se traduit donc par une forte augmentation de la succion lorsque l'on tend vers un état sec (Fig. I.21).

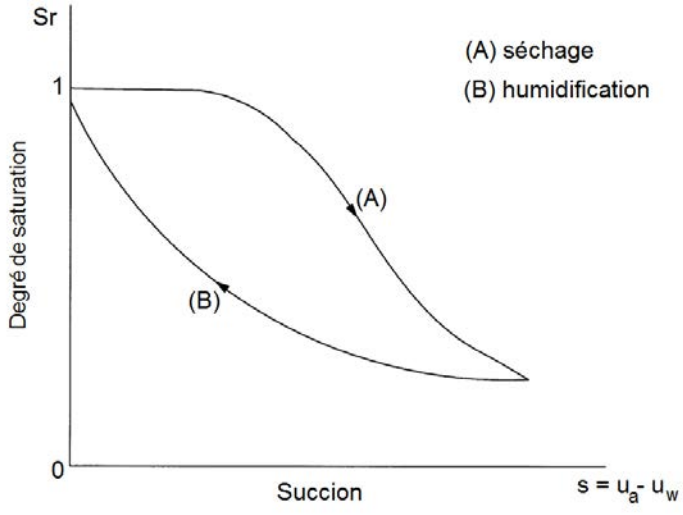


Figure I.21 : Hystérésis hydraulique dans la courbe de rétention d'eau (par Wheeler et al., 2003).

Un échantillon de sol non-saturé ayant un degré de saturation élevé possède un plus grand nombre de cavités remplies d'eau libre et moins de ménisques que dans le cas d'un échantillon équivalent ayant un faible degré de saturation. Par conséquent, même si les valeurs des contraintes totales, de la succion et du volume spécifique sont les mêmes pour les deux échantillons, ils devraient montrer un comportement mécanique différent (Wheeler et al., 2003). Cela est dû à la différence, dans les deux cas, des forces de contact inter-particulaires transmises à travers le squelette du sol.

D'autre part, la succion au sein des ménisques influence seulement les forces normales de contact inter-particulaires (Fisher, 1926). En revanche, les variations des contraintes totales ou de la succion dans l'eau libre affectent les deux composantes normale et tangentielle des forces de contact. Cela veut dire que le degré de saturation aura une influence directe sur le comportement contrainte-déformation du sol non-saturé en plus celle de la succion.

I.1.3.1 Variables représentant l'état de contrainte

De nombreux auteurs ont proposé des équations dites de "contrainte effective" pour les sols non-saturés (Bishop, 1959; Croney et al., 1958; Richards, 1966).

La description de l'état de contrainte dépend de plusieurs variables de contrainte indépendantes dont le nombre est lié au nombre de phases du matériau. Généralement, l'état de contrainte d'un sol non-saturé est décrit en utilisant deux tenseurs de contrainte indépendants (Eq. I.6) avec deux variables de contrainte normale indépendantes (Fredlund and Morgenstern, 1977).

$$\begin{bmatrix} (\sigma_x - u_a) & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & (\sigma_y - u_a) & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & (\sigma_z - u_a) \end{bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} (u_a - u_w) & 0 & 0 \\ 0 & (u_a - u_w) & 0 \\ 0 & 0 & (u_a - u_w) \end{bmatrix} \qquad [I.6]$$

Où σ est la contrainte totale, les termes (σ - u_a) et (u_a - u_w) sont appelés respectivement contrainte normale et matrice de succion.

L'état de contrainte dans un point quelconque du sol non-saturé est représenté sur la figure I.22 (Fredlund, 1979).

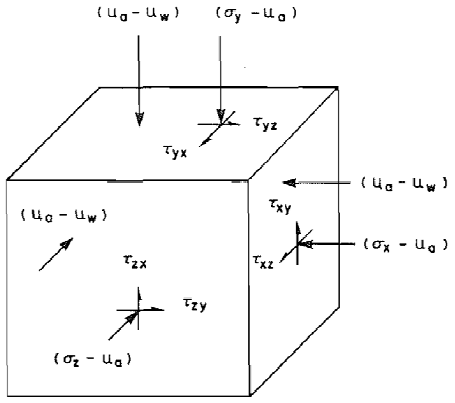


Figure I.22 : Variables de l'état de contrainte dans un sol non-saturé (dans Fredlund, 1979).

Fredlund (1979) explique que sur un chemin d'humidification (Fig. I.21), lorsque l'on tend vers un degré de saturation S_r = 100%, la matrice de succion (u_a - u_w) dans l'équation I.6 tend vers zéro. Cependant, le terme de contrainte normale dans le premier tenseur de l'équation I.6 devient (σ - u_w).

Par ailleurs, Fredlund (1979) donne également une représentation de l'état de contrainte sur le diagramme de Mohr étendu (Fig. I.23) où le troisième axe orthogonal a été ajouté afin de représenter la matrice de succion (u_a - u_w).

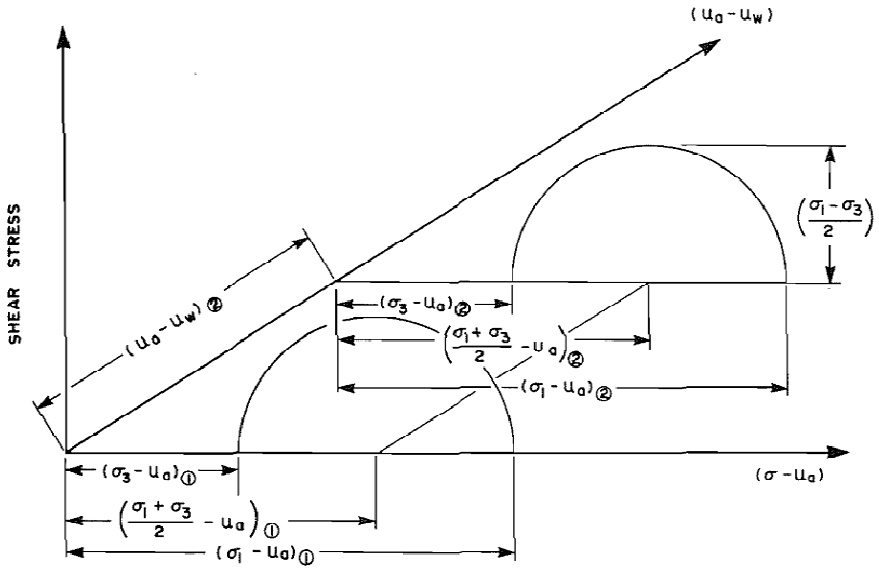


Figure I.23 : Diagramme de Mohr étendu pour un sol non-saturé (par Fredlund, 1979).

Les contraintes principales sont représentées sur la figure I.23. σ_1 est la contrainte principale majeure, σ_2 la contrainte principale intermédiaire et σ_3 la contrainte principale mineure.

I.1.3.2 Classification des sols non saturés

Taibi (1994) a établi une classification des sols non saturés en considérant quatre classes (Fig. I.24) où k_w et k_a représentent respectivement les perméabilités à l'eau et à l'air dans un sol non saturé.

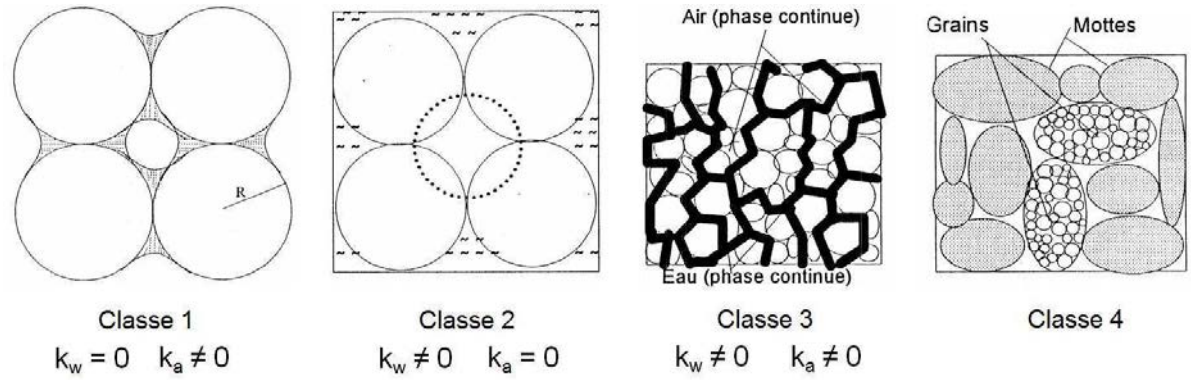


Figure I.24 : Classification des sols en fonction de leur degré d'humidité et leur granulométrie (par Taibi, 1994).

- La **classe 1** représente une phase d'eau discontinue (k_w=0) et une phase d'air continue (k_a≠0) en formant des ménisques au point de contact entre les particules. Les ménisques, où la pression est négative (u_w< u_a), exercent sur les particules des forces d'attraction normales aux plans tangents (Fig. I.25). Ces forces contribuent à la résistance du milieu mais ne provoquent pas de réarrangement des grains ou de changement de volume. Ces conditions peuvent être observées expérimentalement dans le cas où la teneur en eau (w) est inférieure à la limite du retrait (w_{SL}).

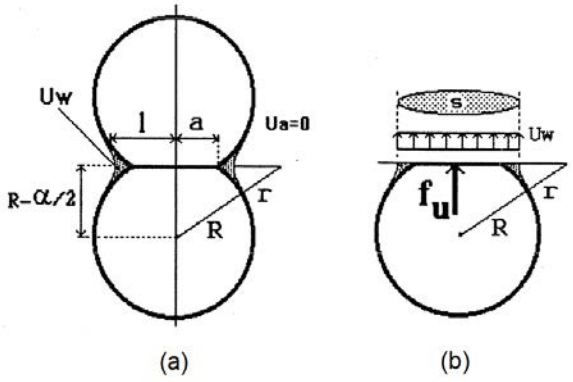


Figure I.25 : Phase d'eau discontinue (par Taibi, 1994).

La figure I.25 (a) représente deux billes en contact, ayant le même diamètre (D = 2R), où l'on peut observer la formation d'un ménisque. Taibi (1994) donne l'expression de la force capillaire (f_u) due à ce ménisque comme étant le produit de la pression négative (- u_w) et de la section du ménisque dans le plan tangent (S) :

$$f_u = (u_a - u_w).S = -u_w.S \qquad [I.7]$$

- La **classe 2** est caractérisée par une phase d'air discontinue (k_a=0) et une présence de bulles d'air isolées dans l'eau, ce qui la rend plus compressible. Ainsi, Taibi (1994) admet alors que la notion de la contrainte effective de Terzaghi est valable. Par ailleurs, Biarez (1962) a montré que généralement, pour un arrangement irrégulier de grains sphériques, la résultante des forces externes n'était pas perpendiculaire aux plans tangents. Cela pourrait donc induire des déformations volumiques du milieu.

- La **classe 3** est observée expérimentalement dans les sols réels dans un domaine du degré de saturation où les perméabilités à l'air et l'eau ne sont pas nulles (k_a≠0 et k_w≠0). En effet, une fois la pression de désaturation est atteinte, une baisse significative du degré de saturation est observée. Ainsi, les pores remplis d'air communiquent entre eux au moment où la phase d'eau reste continue.

- La **classe 4** concerne le cas des sols structurés en agrégats (mottes).

I.1.3.3 Méthodes expérimentales d'imposition et de contrôle de la succion

L'étude du comportement hydromécanique des sols non-saturés est complexe et nécessite des techniques expérimentales fiables. Ces méthodes, basées sur le contrôle de la succion, permettent également de déterminer la courbe de rétention du sol et de suivre l'évolution de ses différents paramètres hydriques.

De nombreuses techniques ont été proposées en fonction de la succion à appliquer (par exemple dans Fleureau et al., 1993) et dont la gamme rencontrée dans les sols est très large (de 0 à 1000 MPa) :

a - Plaque tensiométrique :

La plaque tensiométrique est une méthode adaptée aux faibles valeurs de la succion comprises entre (0,1 < s < 10 kPa). Le principe de cette méthode consiste à placer un échantillon de sol en contact avec une colonne d'eau par le biais d'une plaque de verre fritté semi-perméable (autorise le passage de l'eau mais pas celui de l'air).

Le dispositif expérimental permettant d'appliquer cette technique est représenté sur la figure I.26. Une pression capillaire "s" est imposée en fixant la hauteur "h" (Fig. I.26) comprise entre l'échantillon (point A) et le point de référence B.

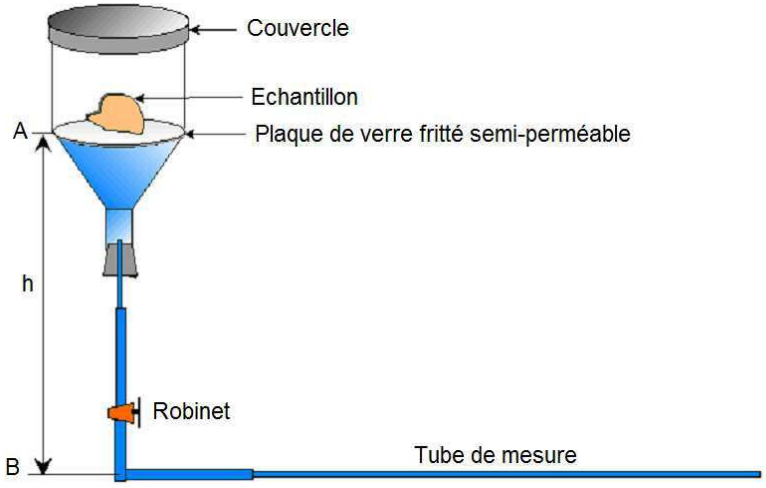


Figure I.26 : Dispositif expérimental de la plaque tensiométrique (cité dans Wei, 2014).

Wei (2014) a utilisé cette technique pour imposer une succion de 1 kPa sur des échantillons de mélanges argileux (kaolinite P300/Montmorillonite), initialement sous forme de boue ($w = w_L$).

b - Translation d'axe :

Lorsque la valeur de la succion à imposer peut atteindre 1500 kPa, la méthode utilisée est celle de la translation d'axe appelée également technique de "suppression d'air". Elle a été développée par Richards (1941) dont le schéma de principe est présenté sur la figure I.27.

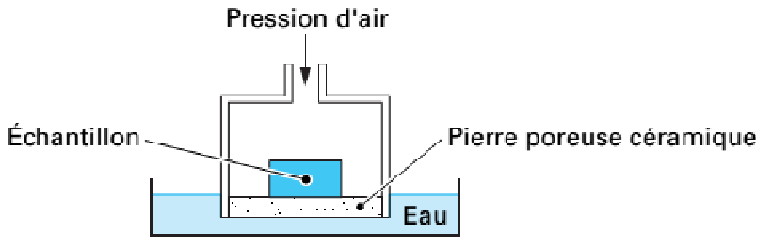


Figure I.27 : Contrôle de la succion par translation d'axe d'après Richards (1941) dans Delage et Cui (2000).

Cette technique consiste à appliquer une surpression d'air sur un échantillon de sol placé dans une cellule étanche à l'air. La pression de l'eau est maintenue constante et prise égale généralement à la pression atmosphérique. L'échantillon est posé sur une pierre poreuse en céramique d'une porosité fine et permet de distinguer le contrôle des deux pressions de l'air et de l'eau. Le principe de cette méthode a été adapté sur les appareils de mécanique des sols notamment sur une cellule triaxiale à succion contrôlée développée par Bishop and Donald (1961).

c - Méthode osmotique :

Une autre méthode de contrôle de la succion est appliquée pour imposer des valeurs comprises entre 150 et 1500 kPa. Il s'agit de la méthode osmotique. Elle a été développée par les biologistes (Lagerwerff et al., 1961) et adoptée en Science du sol (Zur, 1966), puis adaptée aux essais géotechniques par Kassif and Ben Shalom (1971) sur un oedomètre.

Récemment, Delage et al. (1998) ont étendu la méthode osmotique pour appliquer des succions pouvant atteindre jusqu'à 10 MPa.

Wei (2014) a appliqué cette méthode sur des mélanges argileux pour obtenir une succion de 1500 kPa (Fig. I.28).

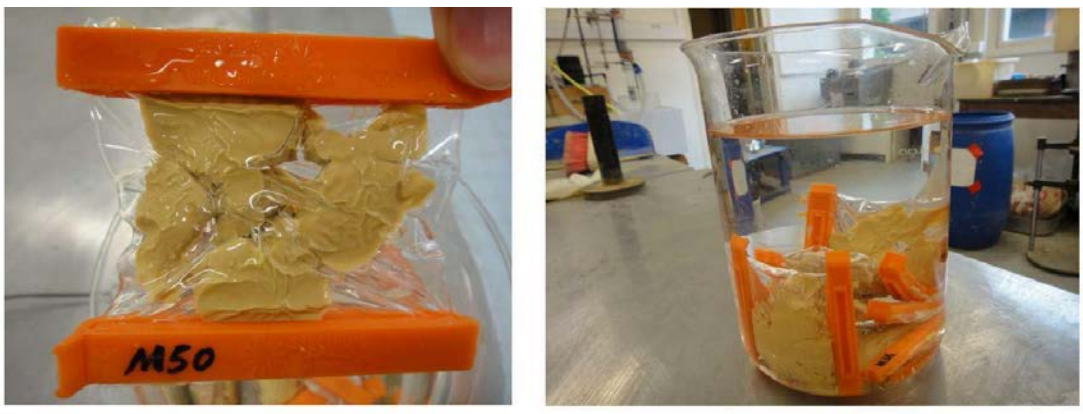


Figure I.28 : Application de la méthode osmotique par Wei (2014).

Cette technique consiste à placer les échantillons de sols à l'intérieur d'une membrane de dialyse (Fig. I.28 a), puis émerger l'ensemble (membrane + échantillons) dans une solution de polyéthylène glycol (PEG) de poids moléculaire 20000 (Fig. I.28 b). A l'équilibre, une

équivalence peut être établie entre la concentration en PEG de la solution osmotique et la succion.

d- Technique d'équilibre de vapeur (VET) :

La méthode de contrôle de la succion est la technique d'équilibre de vapeur où les transferts d'eau s'effectuent par phase vapeur jusqu'à l'équilibre. La VET est utilisée pour imposer des valeurs très fortes de la succion comprises entre 3 et 1000 MPa. Cette méthode a été entre autres utilisée par Tang and Cui (2005) sur l'argile MX80 pour analyser la courbe de rétention d'eau et ses propriétés.

La technique d'équilibre de vapeur est généralement basée sur l'utilisation des solutions salines saturées. L'avantage est que la fraction molaire de l'eau dans la solution saline ne change pas avec les échanges d'humidité entre la phase liquide et la phase gazeuse (Tang and Cui, 2005). L'inconvénient de la VET est la lenteur de l'essai qui peut durer jusqu'à une dizaine de jours, voire plus selon la taille de l'échantillon et le sel utilisé (Delage et Cui, 2000).

Le principe de la méthode consiste à placer un échantillon de sol, initialement saturé, dans une atmosphère confinée où l'on peut contrôler l'humidité relative au moyen de la solution saline saturée (exemple de Delage et Cui, 2000 sur Fig. I.29). Ainsi, les transferts d'eau entre l'échantillon de sol et la solution saline s'effectuent sous phase vapeur jusqu'à l'équilibre.

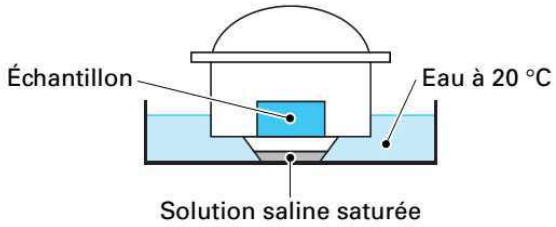


Figure I.29 : Schéma de principe de la technique d'équilibre de vapeur par Delage et Cui (2000).

Par ailleurs, afin d'accélérer le processus de la VET, plusieurs auteurs (Bernier et al., 1997; Cui et al., 2002; Lloret et al., 2003; Marcial, 2003) ont modifié leur système expérimental, en y introduisant une circulation de l'air humide. Cette modification a permis à Marcial et al. (2002) de réduire considérablement la durée de leur essai de plusieurs mois à 2-4 semaines.

I.1.3.4 Courbe de rétention d'eau - Evolution des paramètres hydriques

Au moyen de techniques expérimentales décrites précédemment, il est possible d'analyser l'évolution des paramètres hydriques sur un cycle de séchage-humidification illustré sur la figure I.30 (exemple de Zerhouni, 1991 cité dans Taibi, 1994).

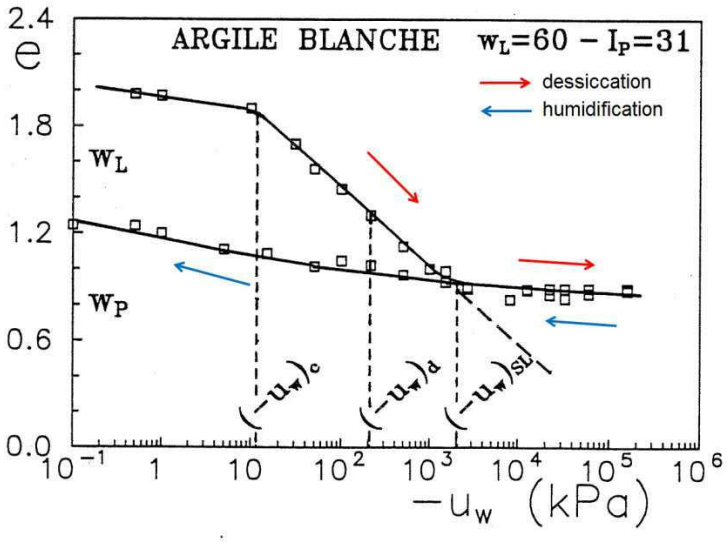


Figure I.30 : Premier cycle de dessiccation-humidification sur l'argile blanche préparée sous forme de boue ($w=1,5w_L$) par Zerhouni (1991) dans Taibi (1994).

La démarche consiste à mettre en évidence la correspondance entre les paramètres hydriques (indice des vides, degré de saturation et teneur en eau) en fonction de la succion. Afin de mieux analyser cette correspondance, il existe une disposition (Fig. I.31) souvent adoptée et donnée, comme exemple, par Indarto (1991) dans le cas de l'argile jaune (kaolinite pure). Il s'agit d'une représentation globale de l'état du matériau et de ses paramètres hydriques durant le premier cycle de séchage-humidification.

- La figure I.31 (a) représente la courbe de retrait [indice des vides e - teneur en eau w]. Sur le chemin de séchage, le sol suit une droite d'équation ($e = G_s.w$) appelée ligne de saturation. L'indice des vides suit alors cette droite jusqu'à une valeur caractéristique de la teneur eau, appelée limite de retrait (w_{SL}), puis tend vers une valeur constante (e_{SL}).

- La figure I.31 (b) représente la courbe de compressibilité [indice des vides e - pression négative pF]. L'alignement horizontal des deux courbes (a) et (b) permet d'identifier une pression négative de retrait ($-u_{wSL}$) correspondant à l'indice des vides de retrait (e_{SL}).

- La figure I.31 (c) représente les variations du degré de saturation en fonction de la teneur en eau [S_r - w]. Au début du séchage, le sol reste saturé ($S_r = 1$) puis le degré de saturation chute très rapidement à partir d'une teneur en eau appelée point d'entrée d'air (AE).

- La figure I.31 (d) représente les variations du degré de saturation en fonction de la pression négative [S_r - pF]. Dans ce plan, un paramètre caractéristique du sol peut être identifié, il s'agit de la pression négative de désaturation ($-u_{wd}$). C'est le pF à partir duquel le degré de saturation décroit très rapidement.

La figure I.31 (e) montre la courbe de la teneur en eau en fonction de la pression négative [w - pF]. Elle et placée sur le même alignement vertical que les deux courbes [e - pF] et [S_r - pF] afin de mettre en évidence les correspondances entre les paramètres hydriques et le pF.

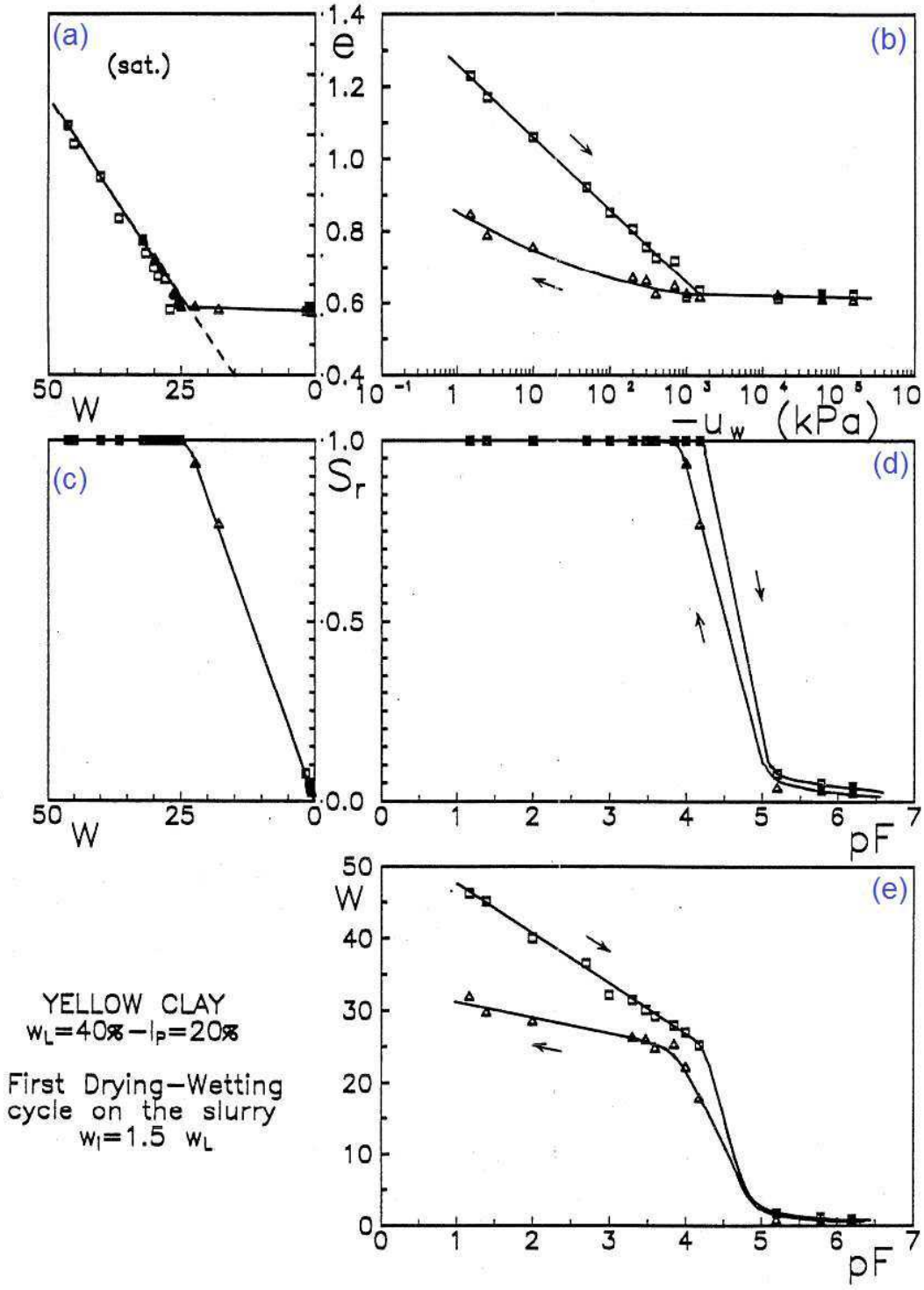


Figure I.31 : Courbe de rétention d'eau - premier cycle de dessiccation-humidification sur l'argile jaune initialement sous forme de boue ($w=1,5w_L$) par Indarto (1991) dans Taibi (1994).

Wei et al. (2013) ont réalisé une étude expérimentale micro-macro de deux matériaux argileux ($w=w_L$), la kaolinite P300 et un mélange de 35% kaolinite et 65% de montmorillonite (M65), sur un chemin de séchage. L'étude consiste à suivre l'évolution de la microstructure du matériau (échelle microscopique) en fonction de son état hydrique sur un chemin de dessiccation (échelle macroscopique).

Les auteurs ont adopté la disposition donnée par Indarto (1991) (Fig. I.31) exposée sur la figure I.32 [w-e, s-e, s-w et s-S_r] et représentative de l'état hydrique du matériau.

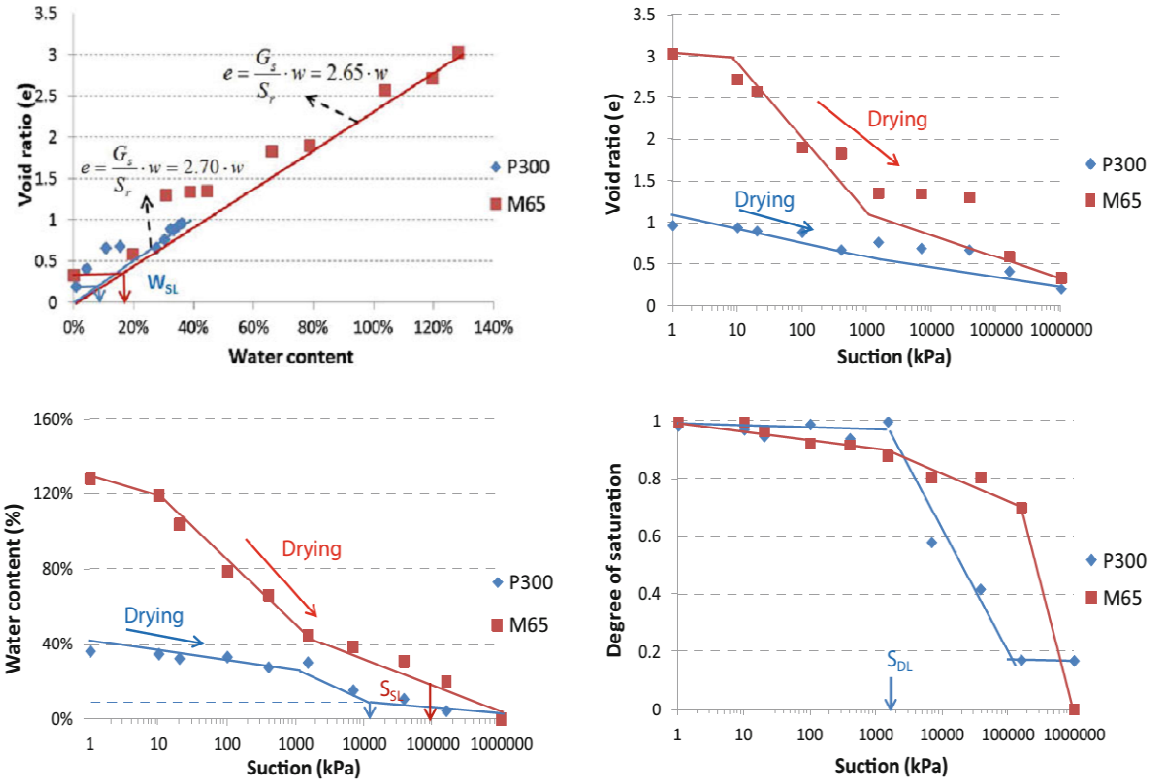


Figure I.32 : Evolution des paramètres hydriques sur chemin de séchage pour le kaolin P300 et M65 (Wei et al., 2013).

En comparant les résultats de Wei et al. (2013) avec ceux obtenus par Indarto (1991), nous pouvons constater que les évolutions des différents paramètres hydriques de la kaolinite sont globalement très proches sur le chemin de séchage. Parmi les paramètres caractéristiques identifiés dans les deux études, la limite de retrait w_{SL} sont respectivement 23% pour Wei et al. (2013) et 24% pour Indarto (1991). En revanche, le rapport de la succion de limite de retrait s_{SL} entre les deux études est 10 fois pour Indarto (1991). Il pourrait être attribué à la différence de l'état initial de la boue d'argile.

Par ailleurs, les résultats montrent de larges valeurs d'indice des vides dans le cas du mélange M65 par rapport à la kaolinite P300 (Fig. I.32). La déformation volumique totale atteint 35% pour la kaolinite P300 contre 65% pour le mélange M65 quand la succion est comprise entre 1 kPa et 158 MPa.

I.1.3.5 Chemin de dessiccation et chemin normalement consolidé NC

Le processus de retrait du sol dû à un séchage progressif a été analysé pour la première fois par Tempany (1917) (dans Tang et al., 2011). En effet, Stirk (1954) cité par Tang et al. (2011) souligne que le retrait d'un sol naturel peut être décomposé en quatre étapes représentées sur le plan [teneur en eau w - indice des vides e] (Fig. I.33) : retrait structural (structural shrinkage), retrait normal (normal shrinkage), retrait résiduel (residual shrinkage) et retrait zéro (zero shrinkage).

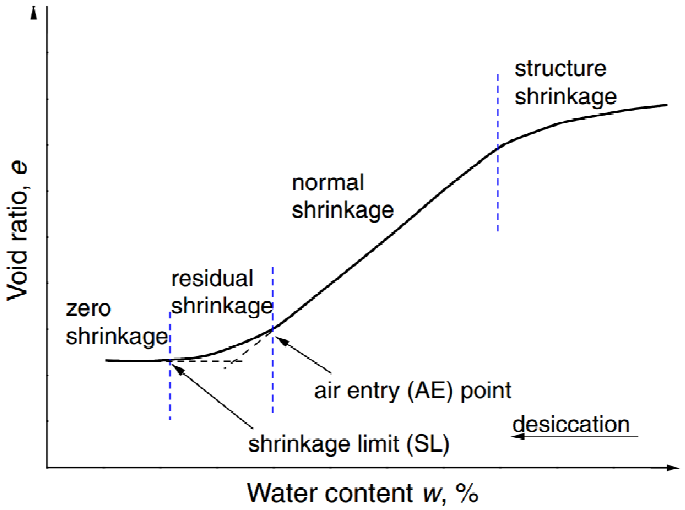


Figure I.33 : Caractéristiques de la courbe de retrait d'un sol naturel d'après Stirk (1954) dans Tang et al. (2011).

Tang et al. (2011) expliquent que l'étape de retrait structural peut être observée uniquement sur la surface des sols avec des agrégats stables. Ainsi, au cours de cette étape, quelques pores larges et stables sont vidés et la diminution du volume du sol est inférieure à celle du volume d'eau perdue.

Les auteurs ont étudié l'argile de Romainville (w_L = 77%) avec un état initial sous forme de boue. En l'occurrence, aucun agrégat n'était attendu, expliquent les auteurs, et la force de liaison entre les particules était relativement faible pour constituer des pores stables à l'état initial. Par conséquent, les auteurs n'ont pas observé un retrait structural dans la courbe de retrait obtenue et représentée sur la figure I.34.

Deux points de transition ont été mis en évidence (Fig. I.34) :

- le point d'entrée d'aire (AE = 17%), qui marque le début de la désaturation de l'échantillon et l'initiation du retrait résiduel,

- la limite de retrait (SL = 11%), qui indique la fin du processus de retrait.

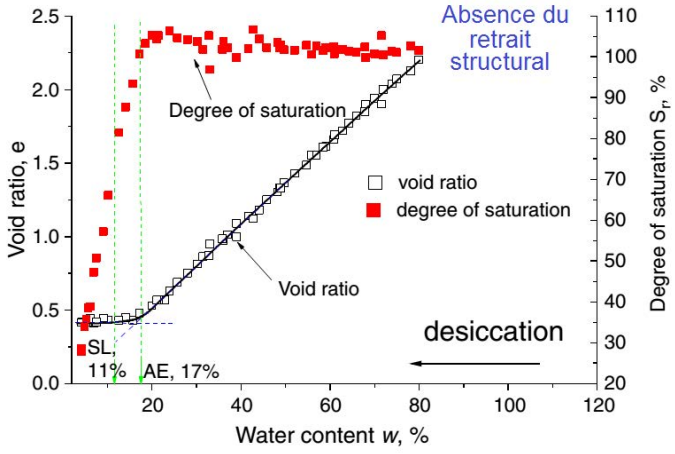


Figure I.34 : Courbe de retrait obtenue par Tang et al. (2011) sur l'argile de Romainville.

Après avoir défini ci-dessus les caractéristiques de la courbe de retrait sur un chemin de dessiccation, nous allons nous intéresser à la comparaison établie avec un chemin normalement consolidé isotrope ou oedométrique.

Taibi (1994) a obtenu un chemin normalement consolidé (NC) à partir d'un état initial sous forme de pâte très liquide suivant un chemin de séchage. L'auteur a réalisé une comparaison, pour l'ensemble des sols étudiés, entre les chemins NC de séchage et les chemins oedométriques ou isotropes NC. Les résultats de cette comparaison dans le cas de l'argile jaune (Kaolin P300) sont représentés sur la figure I.35.

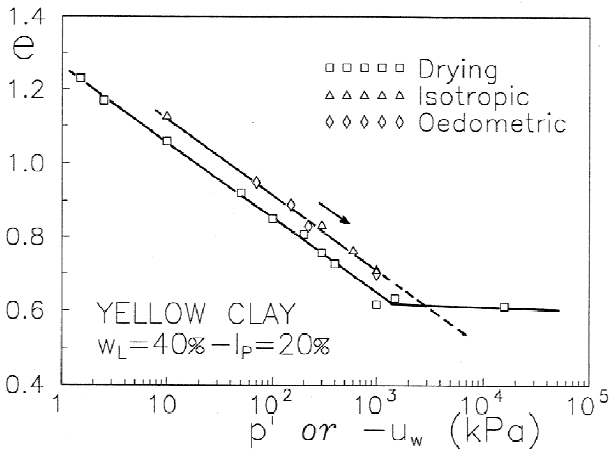


Figure I.35 : Comparaison du chemin de séchage NC et des chemins oedométriques et isotropes NC dans le domaine saturé pour l'argile jaune (Kaolin P300) par Taibi (1994).

L'indice des vides (e) est tracé en fonction : de la pression négative ($-u_w$) pour les chemins de séchage et de la contrainte effective moyenne ($p' = p - u_w$) pour les chemins oedométriques ou isotropes.

Taibi (1994) explique que dans le domaine saturé, les trois chemins (dessiccation, isotrope et oedométrique) sont représentés par des droites parallèles. Lorsque le sol est saturé, théoriquement, le champ de contraintes appliqué à une particule par l'eau qui l'entoure devrait être isotrope. Par conséquent, la pente de la droite de dessiccation dans le plan [$-u_w$, e] est égale au coefficient de compressibilité C_c tant que le sol reste saturé.

Cependant, l'auteur mentionne que le coefficient C_c peut être déduit à partir des corrélations avec la limite de liquidité. Dans ce cas, Zervoyannis (1982) cité par Taibi (1994), a montré qu'à partir de plusieurs résultats de la littérature pour les sols argileux, la droite isotrope peut être définie sur un chemin de compression isotrope par les deux points suivants :

- la contrainte p' = 7 kPa pour $w = w_L$,

- la contrainte p' = 1000 kPa pour $w = w_P$.

Les corrélations ont été reportées sur le même plan [$-u_w$, e] (Fig. I.36) avec les résultats des différents essais de dessiccation.

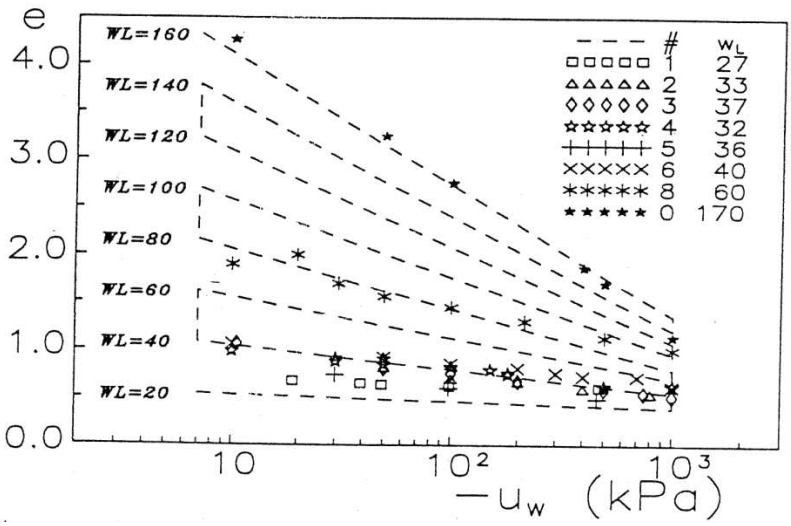


Figure I.36 : Chemins expérimentaux des essais de drainage dans le domaine saturé reportés sur les corrélations isotropes de Zervoyannis (1982) dans Taibi (1994).

Les résultats montrent que les corrélations de Zervoyannis apparaissent assez bien vérifiées et concordantes avec les chemins de dessiccations des différents sols argileux. Ainsi, une corrélation est mise en évidence entre les chemins NC de dessiccation avec les chemins isotropes ou oedométriques uniquement dans le cas où le sol reste saturé.

I.2. Comportement élastique des argiles et des sols- Caractérisation

I.2.1. Comportement élastique : généralités

Les propriétés mécaniques de l'ensemble des matériaux granulaires dépendent de leur structure et des interactions sur la surface de contact entre les particules (Yimsiri and Soga, 2000).

A partir de la formule fondamentale décrivant l'écrasement de deux sphères sous une force normale (loi de Hertz), Dufour-Laridan (2001) a pu calculer l'expression du comportement d'un arrangement régulier de sphères élastiques linéaires (parmi les 4 arrangements étudiés dans Taibi, 1994; Biarez et Hicher, 1994) soumis à une contrainte isotrope p'.

Cela a permis à Dufour-Laridan (2001) de déduire la forme *a priori* de l'expression du module de Young E en petites déformations d'un matériau granulaire (Eq. I.8). Plusieurs auteurs se basent sur cette équation pour décrire le comportement élastique (El Hosri, 1984; Hicher, 1985; Homsi, 1986; Biarez et Hicher, 1994; Hicher, 1996; Yimsiri and Soga, 2000).

$$E = A.F(e).p'^{n} \qquad [I.8]$$

Dans cette expression, A est une constante propre au matériau et F(e) est une fonction de l'indice des vides. La puissance n est égale à 1/3 dans le cas analytique, donnée par la loi de Hertz, et n = 0.5 dans le cas expérimental trouvée pour les argiles remaniées normalement consolidées (Hicher, 1985). Cette différence peut être expliquée par la granulométrie des matériaux testés; avec un assemblage de billes identiques dans le premier cas (n=1/3) et des grains de taille et forme différentes dans le cas des matériaux argileux.

L'influence de certains paramètres sur le module de Young (Eq. I.8), tels que la contrainte moyenne effective et l'indice des vides, a été analysée dans la littérature (Hicher, 1985; Hicher, 1996; Dufour-Laridan, 2001).

I.2.1.1 Effet de la contrainte effective moyenne

La valeur du module de Young dépend de la contrainte effective moyenne par la loi puissance exprimée dans l'équation I.8 dans le domaine de petites déformations. Ce domaine est isotrope lorsqu'il s'agit d'un matériau isotrope comme les argiles remaniées (Hicher, 1985). Ceci peut être vérifié en réalisant des cycles de chargement en compression ou en compression-extension à partir d'un état de contrainte initial isotrope. Les résultats montrent des valeurs initiales de module de Young identiques.

Par ailleurs, lorsque l'état de contrainte est anisotrope, Hardin (1978) cité dans Dufour-Laridan (2001) a suggéré que le module de Young suivant une direction x ne dépendait que de la contrainte normale σ_x dans cette direction pour un sol sans cohésion. Ceci permet d'écrire l'équation I.8 sous la forme suivante :

$$E_x = A.F(e).\sigma_x'^{n} \qquad [I.9]$$

Yimsiri and Soga (2000) ont confirmé cette équation dans le cas d'un calcul numérique réalisé sur un modèle de contact entre des billes et une surface rugueuse.

Les résultats des essais triaxiaux réalisés par Hicher (1996) à différentes contrainte initiales isotropes montrent que le module de Young croît à mesure que la contrainte effective moyenne augmente. Par ailleurs, ces résultats donnent une valeur de 0.5 au paramètre de puissance n, défini dans l'équation I.8, dans le cas des argiles. Ces essais ont été effectués à différents degrés de surconsolidation (OCR) et à une valeur constante de l'indice des vides.

Par exemple, la figure I.37 (Hicher, 1996) représente la relation obtenue, sur une kaolinite, entre le module de Young E et la contrainte effective moyenne p' avec n ≈ 0.5. Ce résultat a été déterminé pour la même valeur d'indice des vides représentée sur la courbe de compressibilité [e - log p'] par la ligne horizontale e ≈ 0.825.

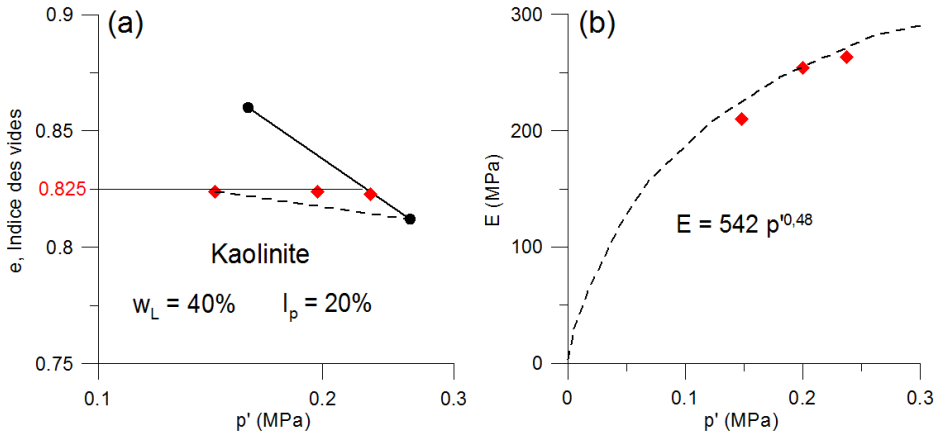


Figure I.37 : Relation entre le module de Young et la contrainte effective moyenne dans les argiles à une valeur constante de l'indice des vides Hicher (1996).

Le paramètre de puissance n peut avoir des valeurs supérieures à 0.5. Il dépend de la limite de liquidité w_L dans le cas des argiles normalement consolidées (Marcuson and Wahls, 1972; El Hosri, 1984; Homsi, 1986; Rivera, 1988).

Hicher (1996) a regroupé plusieurs valeurs de puissance n de différents sols argileux de la littérature et les a reporté sur un plan (Fig. I.38) en fonction de leur limite de liquidité.

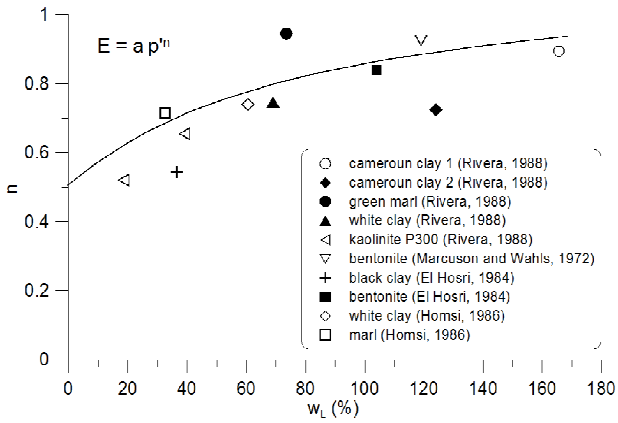


Figure I.38 : Influence de la limite de liquidité sur le paramètre de puissance n (Hicher, 1996).

Les résultats présentés sur la figure I.38 montrent que les valeurs de n varient entre 0.7 et 1 en fonction de la limite de liquidité. Ceci est attribué, d'après Hicher (1996), à la diminution de l'indice des vides à mesure que la pression de consolidation augmente d'une manière importante dans le cas des argiles ayant une limite de liquidité élevée.

I.2.1.2 Effet de l'indice des vides

La formulation du module de Young (Eq. I.8) dépend de l'indice des vides "e" à travers le paramètre F(e). La première étude sur l'influence de l'indice des vides est basée sur les mesures de propagation d'ondes menées par Hardin and Richart (1963) (cité dans Hicher, 1996). Ceci a permis d'établir la formule suivante :

$$F(e) = \frac{(B-e)^2}{(1+e)} \qquad [I.10]$$

Avec B une constante liée à la nature du sol et comprise entre 1 et 4 d'après El Hosri (1984) (cité dans Hicher, 1996). La figure I.39 représente une simplification de la formulation du module de Young en fonction de l'indice des vides donnée par l'équation I.8 (Bard, 1993 cité dans Biarez et Hicher, 1994).

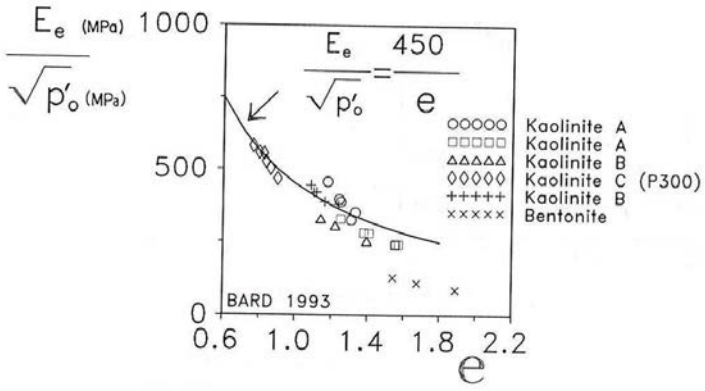


Figure I.39 : Relation entre le module de Young et l'indice des vides pour les argiles (Biarez et Hicher, 1994).

Une expression de la fonction F(e) a été proposée dans Biarez et Hicher (1994) et également donnée par Hicher (1996) pour différents sables et argiles ayant une limite de liquidité inférieure à 50% :

$$\frac{E}{p'^{0,5}} = \frac{450}{e} \qquad [I.11]$$

Dans cette formule, où E et p' sont exprimées en MPa, l'expression de la fonction F(e) est donnée sous la forme suivante avec x=1 :

$$F(e) = e^{-x} \qquad [I.12]$$

Par ailleurs, cette forme entièrement empirique a été proposée par Lo Presti et al. (1995) (cité dans Dufour-Laridan, 2001) avec une valeur de x=1.3.

I.2.2. Caractérisation du comportement élastique

Le domaine élastique étant défini précédemment à très faibles déformations, il est nécessaire de développer des techniques expérimentales afin d'explorer ce domaine. Il existe deux types de méthodes permettant la caractérisation des propriétés élastiques d'un sol (module de Young, coefficient de Poisson, … etc) :

- **Méthodes statiques** : par exemple le chargement triaxial qui permet de mesurer les déformations comprises entre 10^{-6} et 10^{-2} en adaptant la cellule triaxiale avec un système de capteurs de déplacement immergeables, utilisée entre autres dans plusieurs recherches (Scholey et al., 1995; Hicher, 1996; Coop et al., 1997; Atkinson, 2000).

- **Méthodes dynamiques** : elles peuvent être classées en deux catégories, la première est basée sur la propagation d'onde ultrasonore permettant de générer de très faibles déformations inférieures à 10^{-6} (Hicher, 1985).

La deuxième catégorie concerne la mise en résonnance des échantillons (colonne résonnante) à l'aide d'une excitation sinusoïdale. Cette technique a été développée par Wilson and Dietrich (1960). Elle permet d'atteindre, en fonction de l'appareil utilisé, des amplitudes de déformations comprises entre 10^{-7} et 10^{-1} environ (Cascante and Santamarina, 1997).

Par ailleurs, une autre technique, développée à la fin des années 70 (Shirley and Hampton, 1978), appelée "Bender éléments" est également utilisée pour déterminer les propriétés élastiques du sol. Elle est basée sur la propagation d'onde ultrasonore et permet d'induire des déformations très faibles ($<10^{-5}$) permettant ainsi de caractériser le domaine élastique.

I.2.2.1 Caractérisation du domaine élastique sous chargement triaxial

L'étude du comportement des matériaux en utilisant la cellule triaxiale classique ne permet pas d'atteindre les très faibles amplitudes de déformation $<10^{-2}$ (Biarez et Hicher, 1994). Afin de pouvoir explorer le domaine de petites déformations, la cellule triaxiale (Fig. I.40) a été adaptée et améliorée (Hicher, 1996).

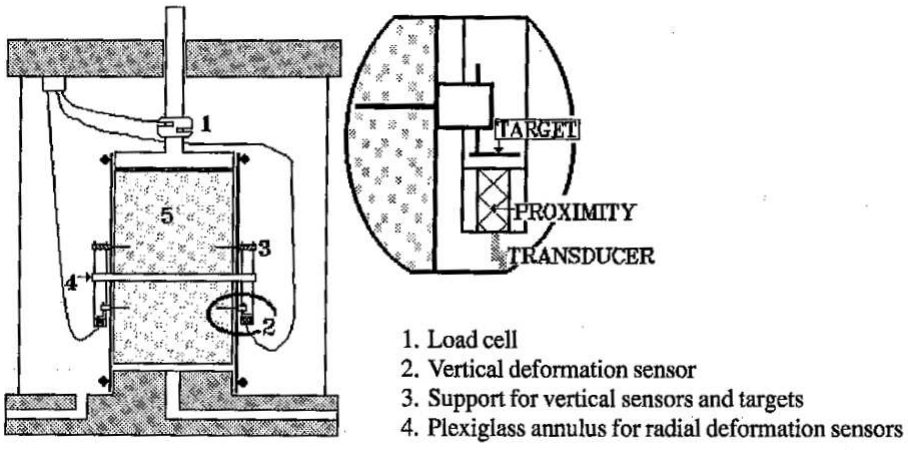


Figure I.40 : Cellule triaxiale pour les petites déformations par Hicher (1996).

Des transducteurs immergeables, horizontaux et verticaux, sont placés à l'intérieur de la cellule au contact avec l'échantillon. Cette méthode expérimentale permet de mesurer les petites déformations (entre 10^{-6} et 10^{-2}) à la mi-hauteur de l'échantillon pour éviter les perturbations liées au contact entre ses deux extrémités avec la base et la tête. Ceci peut induire des déformations localisées d'ajustement au début de l'écrasement de l'éprouvette et provoquer une inhomogénéité des déformations (Dufour-Laridan, 2001).

L'avantage de ce système est de permettre l'interprétation directe des résultats de mesures en termes de tenseurs de contraintes et déformations. Hicher (1996) a utilisé cette cellule sur différents matériaux (sable, gravier, argiles …) notamment sur une argile remaniée saturée à partir d'un état initial de boue ($w_0 = 2.w_L$). L'auteur a présenté une synthèse des résultats obtenus afin de discuter de l'existence d'un comportement élastique pour ces matériaux.

En effet, à l'intérieur du domaine élastique de petites déformation ($<10^{-5}$), le module d'Young égale au module sécant noté E_{max} et peut être considéré comme la limite élastique E_e (Biarez et Hicher, 1994). A mesure que l'amplitude de la déformation augmente, la valeur du module sécant ($E_{sec}= q/\varepsilon_1$) est sous estimée et la relation contrainte-déformation devient non linéaire. De nombreuses études ont tenté de modéliser l'évolution du module sécant en fonction de la déformation (Hardin and Drnevich, 1972; Seed and Idriss, 1970 cités dans Hicher, 1996).

La figure I.41 représente l'identification du module sécant dans le plan contrainte-déformation et son évolution en fonction de l'amplitude de la déformation au cours d'un chargement triaxial (Dano et Hicher, 2002).

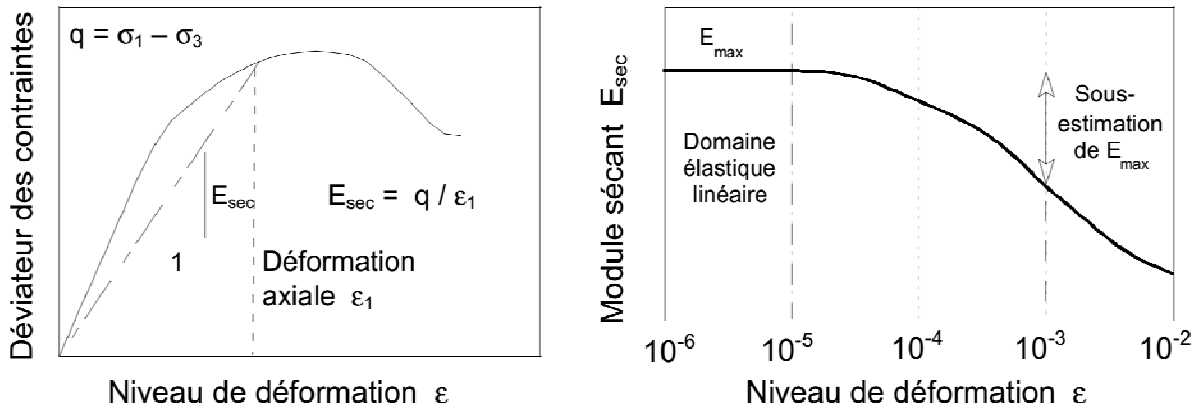


Figure I.41 : Evolution du module sécant au cours d'un essai triaxial sur un sol (sable, argile) (Dano et Hicher, 2002).

L'évolution du module sécant E_{sec} pour une kaolinite a été présentée sur différents chemins de contrainte, normalement consolidés NC, à σ'_3 = constante dans Biarez et Hicher (1994). Les résultats (El Hosri, 1984; Bard, 1993) sont reportés sur la figure I.42 en fonction, d'une part, de la déformation axiale ε_1 et, d'autre part, de la contrainte effective moyenne p'.

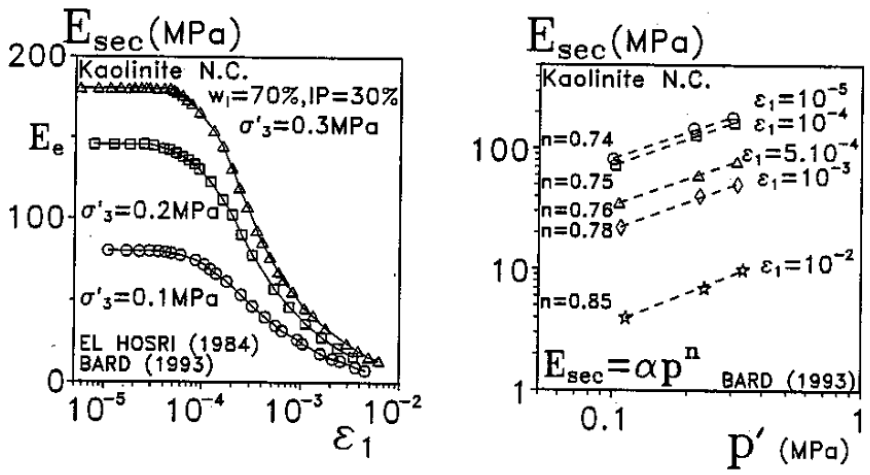


Figure I.42 : Evolution du module sécant en fonction de l'amplitude de la déformation dans la kaolinite normalement consolidée (Biarez et Hicher, 1994).

Dans le plan [E_{sec} - p'], le paramètre de puissance n varie de 0.74 à 0.9 lorsque la déformation axiale augmente de 10^{-5} à 10^{-2}. Ces valeurs sont supérieures à celle obtenue pour les sables et graviers (n=0,5). Ceci peut être expliqué par une large variation d'indice des vides dans le cas des argiles normalement consolidées NC à mesure que la pression de consolidation augmente (Biarez et Hicher, 1994). Dans ce cas, le paramètre de puissance peut atteindre la valeur n ≈ 1 dans le domaine de grandes déformations (Viggiani and Atkinson, 1995; Hicher, 1996; Jovičić and Coop, 1997).

Par ailleurs, la valeur de n = 1 montre que la relation contrainte-déformation, exprimée dans le plan [q/p' - ε_1], est indépendante de la contrainte de consolidation pour les argiles NC (Hicher, 1996).

I.2.2.2 Caractérisation du domaine élastique par les méthodes dynamiques

Plusieurs recherches ont été menées sur la caractérisation expérimentale des propriétés élastiques des sols par la mesure de la vitesse de propagation d'onde élastique sous chargement mécanique (chargement uniaxial, chemin triaxial, …etc).

a - Par transmission de pulsation :

Des mesures ont été réalisées sur des minéraux argileux en utilisant des dispositifs expérimentaux équipés de transducteurs acoustiques en contact avec le matériau étudié (Marion et al. 1992; Mondol et al. 2007; Delle Piane et al. 2010; Bhuiyan et al. 2010; Bhuiyan et al. 2013).

Les mesures sont basées sur la technique de transmission de pulsation, décrite par Birch (1960), permettant de quantifier les vitesses d'ondes de compression V_p et de cisaillement V_s. Le principe de cette technique est de générer une onde acoustique en un point donné et de mesurer le temps de parcours de cette onde entre les deux transducteurs, émetteur et récepteur, et traversant une longueur L du matériau.

Les vitesses d'ondes de compression et de cisaillement sont calculées suivant la relation suivante (citée dans Mondol et al., 2007) :

$$V = \frac{L}{t_s - t_0} \qquad [I.13]$$

Dans cette formule, les temps de parcours de l'onde avec et sans la présence de l'échantillon sont respectivement notés t_s et t_0.

La figure I.43 montre un exemple d'ondes de compression obtenues suivant les plans vertical et horizontal sous un chargement uniaxial réalisé par Bhuiyan et al. (2013) sur un sable et une kaolinite.

Les points rouges signalés sur la figure I.43 représentent les temps de parcours, sur chaque plan, pris au niveau du premier zéro du signal. Bhuiyan et al. (2013) montrent que la position du temps de parcours (premier zéro ou premier minimum et maximum) n'a pas d'influence sur ses variations en fonction de la contrainte appliquée.

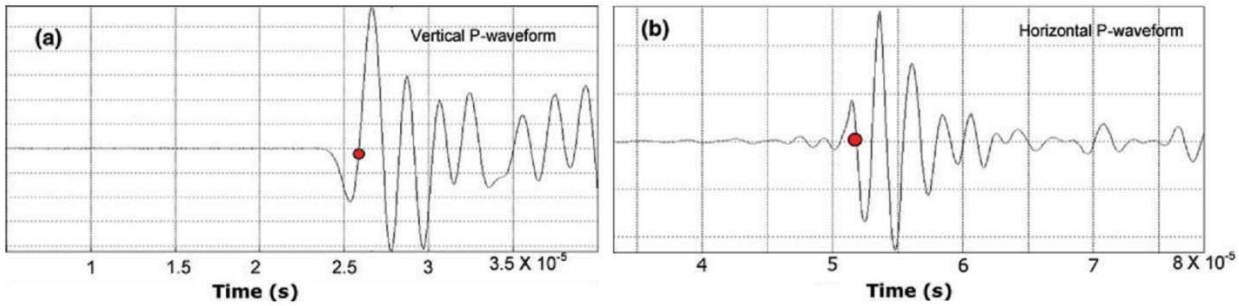


Figure I.43 : Exemple d'ondes de compression sur le plan vertical (a) et le plan horizontal (b) (Bhuiyan et al., 2013).

Les modules d'élasticité sont déduits à partir des vitesses d'ondes de compression V_p et de cisaillement V_s, déduites de la mesure de leur temps de parcours respectifs, et de la densité du matériau ρ. Le module de Young E et le coefficient de Poisson ν sont déterminés par les formules suivantes (citées dans Mondol et al., 2007) :

$$E = \rho V_s^2 . \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \qquad [I.14]$$

$$\nu = \frac{E - 2\rho V_s^2}{2\rho V_s^2} \qquad [I.15]$$

Notons que les ondes de cisaillement, se propageant uniquement dans un milieu solide, sont les plus difficiles à détecter et ainsi leur temps de parcours n'est pas évident à déterminer.

D'autres techniques de mesures acoustiques sont utilisées. Parmi elles, la technique impulsionnelle ultrasonore en immersion ou d'insertion-substitution développée par He (1999). Cette méthode consiste à mesurer, deux fois, le temps de vol parcouru entre

l'émetteur et le récepteur immergés, l'un de référence dans l'eau et l'autre à travers l'échantillon.

Le rapport des deux impulsions (transmise et de référence) permet d'avoir une mesure fiable de la vitesse d'onde de compression V_p qui se propage très bien dans les fluides et les solides. La vitesse d'onde de cisaillement n'est pas quantifiée par la méthode d'insertion-substitution où la propagation d'onde se fait dans un fluide.

Dans ce cas l'expression du module élastique dépend uniquement de la vitesse d'onde de compression suivant la formule suivante (citée dans Fjaer et al., 2008) :

$$E = \rho . V_P^2 \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{(1-\nu)} \qquad [I.16]$$

Par exemple, Fortineau (2006) a utilisé cette technique pour déterminer l'épaisseur d'un échantillon de résine phénolique dont la mesure est très délicate une fois exposée au séchage.

b - Par Bender éléments :

La technique des Bender éléments est constituée de deux plaques piézo-céramiques sous forme de couple émetteur-récepteur pouvant être installés sur différents appareils de laboratoire notamment la cellule triaxiale (par exemple Lo Presti et al., 1999; Dano et Hicher, 2002). Dans ce cas, les capteurs sont placés au niveau des embases inférieure et supérieure de la cellule, mais ils peuvent être aussi disposés sur les surfaces latérales de l'éprouvette (Di Benedetto et al., 1999; Kuwano et al., 1999).

La figure I.44 représente un schéma de principe du dispositif des Bender éléments.

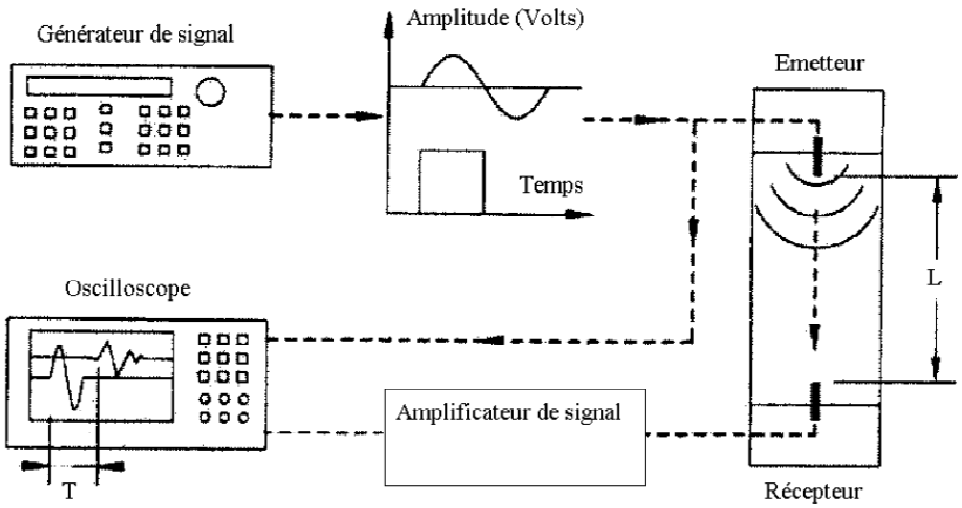


Figure I.44 : Schéma de principe de l'installation associée aux Bender éléments (Dano et Hicher, 2002).

Le principe des Bender éléments est le même que celui de la technique de transmission de pulsation. Il est basé sur la propagation d'onde de cisaillement et de compression entre l'émetteur et le récepteur à travers une longueur L du matériau.

Le signal de sortie est enregistré dans un oscilloscope et permet de déterminer les temps de parcours de l'onde de cisaillement et de compression notés T_s et T_p respectivement. Ceci permet de déduire les vitesses d'ondes suivant les formules suivantes (Viggiani and Atkinson, 1995; Brignoli et al., 1996; Jovičić et al., 1996) :

$$V_s = \frac{L}{T_s} \qquad [I.17]$$

$$V_p = \frac{L}{T_p} \qquad [I.18]$$

La technique des Bender éléments permet de déterminer, à très faibles déformations, le module de cisaillement G_{max} (Viggiani and Atkinson, 1995; Dano et Hicher, 2002) et le module de Young E_{max} (Brignoli et al., 1996).

Les expressions du module de Young E et du coefficient de Poisson ν en fonction des vitesses d'ondes V_s et V_p sont respectivement similaires à celles données par les équations (Eq. I.14) et (Eq. I.15) (Dano et al., 2003).

I.3. Endommagement et fissuration des argiles et des roches argileuses : amorçage et évolution

L'intérêt de l'étude proposée dans cette partie est de comprendre comment le phénomène de l'endommagement et de la fissuration se produit et se développe dans le sol, saturé et non saturé, soumis à différents types de sollicitations mécanique et hydrique.

- Dans le cas d'éprouvettes de sols saturés, l'étude est axée sur l'endommagement mécanique (voire rupture) sur chemin triaxial ainsi que la caractérisation des propriétés élastiques du matériau endommagé/fissuré et leur évolution.

- Le deuxième cas porte sur l'analyse du phénomène de fissuration sous dessiccation et l'identification des mécanismes qui le provoquent.

I.3.1. Phénomène d'endommagement et de fissuration mécanique

I.3.1.1 Introduction du phénomène

L'introduction du phénomène de l'endommagement et de fissuration mécanique et de la rupture permet également de situer la problématique posée dans cette étude.

L'application d'un chargement mécanique sur un matériau argileux induit une modification de sa structure. La conséquence de cette modification peut mener à la densification du matériau (contractance), ou bien à une dilatance. Dans ce cas, il s'agit d'un endommagement apparent engendré par une réorganisation de la structure et de l'évolution des déformations volumiques plastiques (Hicher, 1985).

Les essais mécaniques du laboratoire réalisés sur les sols (sables, argiles) permettent d'observer un pic de contrainte dans la réponse du matériau étudié avec, parfois, une concentration de la déformation dans les bandes de cisaillement (Bésuelle et al., 2000). Ces observations expérimentales caractérisent le phénomène de la rupture dans les sols.

En effet, lors d'un essai triaxial, l'endommagement intervient avant la rupture. Pour cela, il est important de distinguer les deux phénomènes pour mieux les identifier. L'endommagement est un phénomène qui génère la micro-fissuration provoquant une dilatance. La rupture, quant à elle, est caractérisée par des macro-fissures et représente le moment où les propriétés élastiques du matériau sont susceptibles d'être considérablement dégradées (Gaombalet, 2004).

I.3.1.2 Endommagement sur chemin triaxial

Dans l'étude présentée par Gaombalet (2004), et sous l'effet d'un chargement croissant uniaxial ou triaxial, le comportement du matériau dans le plan contrainte-déformation évolue en trois phases (d'après) :

- Une première phase élastique,

- Une deuxième phase d'endommagement caractérisée par une dilatance irréversible (augmentation de volume) et correspond à l'initiation et propagation d'une microfissuration du matériau. Cette phase peut être aussi expliquée par une augmentation du volume total de l'échantillon en compression et une accélération de la dilatation en extension,

- Une troisième phase de rupture du matériau identifiable en atteignant sa résistance maximale, appelée "pic", suivie d'une perte immédiate de la résistance pour se stabiliser à une valeur dite résiduelle.

Dans le cas d'une roche, ces phases sont représentées sur la figure I.45 lors d'un essai de compression uniaxiale ou triaxiale.

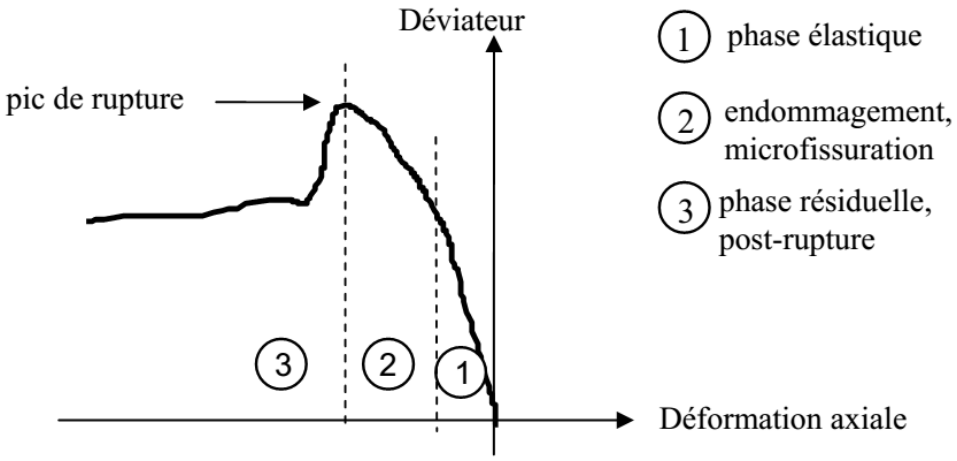


Figure I.45 : Phases de comportement d'une roche lors d'un essai de compression uniaxiale ou triaxiale (Gaombalet, 2004).

Dans le cas des roches argileuses et la plupart des géomatériaux, l'initiation de l'endommagement et de la rupture est précoce en extension par rapport à la compression (Gaombalet, 2004). La loi d'endommagement d'une argile raide est mise au point par deux approches :

a- Approche classique : (Lemaitre & Chaboche, 1985 cité dans Gaombalet, 2004)

Elle est basée sur l'utilisation de la variable d'endommagement D, définie comme une densité surfacique de la discontinuité de la matière. Cette variable caractérise la présence de microdéfauts, elle est nulle pour un matériau vierge (D=0) et atteint une valeur critique à la rupture ($D=D_c<1$). Elle intervient dans la notion de la contrainte effective rapportée à la surface résistant réellement aux efforts :

$$\underline{\underline{\tilde{\sigma}}} = \frac{\underline{\underline{\sigma}}}{1-D} \quad \text{, avec } 0 \le D < D_c \qquad [I.19]$$

L'apport de cette approche est de permettre de tenir compte de l'évolution des paramètres élastiques au cours de l'endommagement. Plusieurs modèles ont été proposés dans la littérature (par exemple Shao et Lydzba, 1999; Chiarelli, 2000; Aublivé et al., 2001) dans le domaine de la mécanique des matériaux poreux.

b- Approche basée sur la plasticité : (citée dans Gaombalet, 2004)

Cette approche est fondée sur le formalisme de la plasticité. Elle permet de reproduire correctement les essais malgré la différence entre les mécanismes responsables d'un endommagement, liés à la fissuration, et ceux de la plasticité traduisant une déformation continue du matériau.

Les propriétés élastiques du matériau sont considérées constantes dans le cas du formalisme de la plasticité et évoluent peu dans la phase avant-rupture (cas des argiles raides).

I.3.1.3 Analyse des déformations localisées

Desrues J. a été l'auteur ou parmi les auteurs de nombreuses recherches basées sur le phénomène de la localisation des déformations dans les géomatériaux sur chemin triaxial. Parmi ces travaux, nous pouvons citer Raynaud et al. (2008) qui ont étudié le phénomène de localisation de la déformation dans une marne Beaucaire, contenant 32% de fraction argileuse, à différentes pressions de confinement. Les auteurs ont réalisé six essais triaxiaux drainés sur des éprouvettes cylindriques avec un élancement H/D=2.

Les courbes de contrainte-déformation axiales sont représentées sur la figure I.46. Trois niveaux de pression de confinement ont été étudiés :

- faible [0 - 0,05 MPa] par les essais 02, 07 et 10 (Fig. I.46 a),

- modéré [0,25 MPa] par les essais 03 et 08 (Fig. I.46 b),

- fort [1 MPa] par l'essai 04 (Fig. I.46 b).

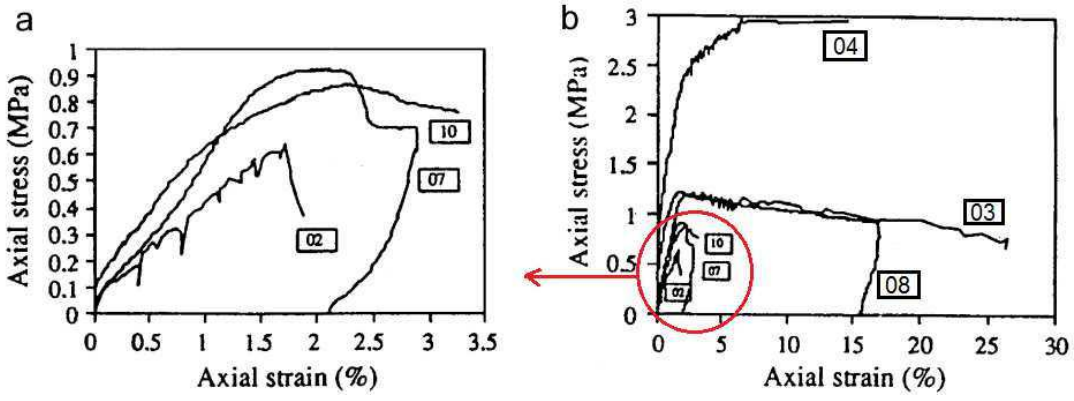


Figure I.46 : Courbes de contrainte-déformation axiales (Raynaud et al., 2008).

A l'échelle de l'échantillon, différents types de déformations ont été observés en fonction de la pression de confinement appliquée :

a- Faible pression de confinement :

Dans le cas de l'essai 02, au début du chargement déviatorique, des premiers signes de dilatance apparaissent dans l'échantillon à environ 1% de déformation axiale (Fig. I.47 a).

Avant que la contrainte de chargement atteigne sa valeur maximale (0.64 MPa), le passage du comportement contractant à un comportement dilatant a eu lieu (Fig. I.47 a) et une fracture s'est développée en mode de cisaillement (Fig. I.47 b).

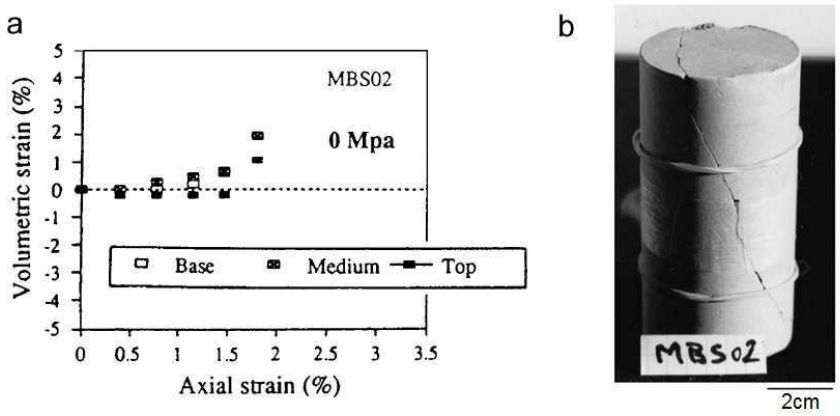


Figure I.47 : Déformation à faible pression de confinement : (a) déformation volumique en fonction de la déformation axiale, (b) photographie de l'échantillon 02 après la rupture (Raynaud et al., 2008).

b- Pression de confinement modérée :

Les variations de la déformation volumique en fonction de la déformation axiale (Fig. I.48 a) montrent une dilatance moins marquée dans le cas de l'essai 03. La photographie de l'échantillon après la rupture (Fig. I.48 b) met en évidence une forme de déformation en tonneau. Elle est caractérisée par une expansion diamétrale inégale et deux zones de cisaillement conjuguées avec une largeur de 10 mm. Dans ce cas, la forme du tonneau peut être partiellement un effet de l'interaction des zones de cisaillement.

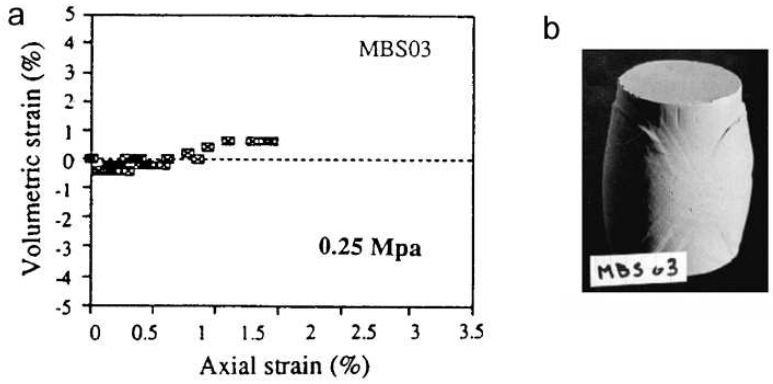


Figure I.48 : Déformation à pression de confinement modérée : (a) déformation volumique en fonction de la déformation axiale, (b) photographie de l'échantillon 03 après la rupture (Raynaud et al., 2008).

c- Forte pression de confinement :

A forte pression de confinement, l'échantillon présente un comportement contractant (Fig. I.49). Sur la courbe contrainte-déformation de l'essai 04 (Fig. I.46 b), la contrainte de chargement atteinte une valeur stable de 2.9 MPa. Dans ce cas, aucune déformation localisée n'a été observée à la surface de l'échantillon. En revanche, une déformation cylindrique homogène a eu lieu.

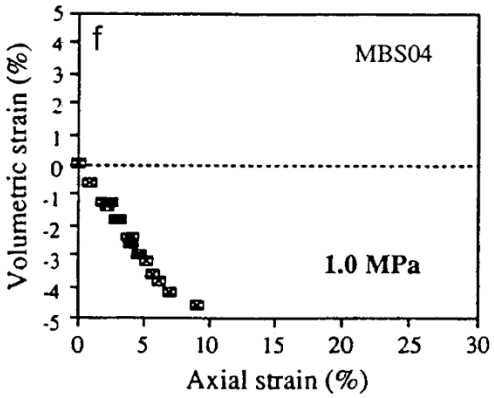


Figure I.49 : Courbe de déformation volumique en fonction de la déformation axiale à forte pression de confinement (Raynaud et al., 2008).

Les observations effectuées à l'échelle de l'échantillon, par la technique des rayons X, ont permis aux auteurs de mettre en évidence une influence du niveau de pression de confinement sur la contrainte axiale ainsi que sur le type de déformation. En effet, à mesure que la pression est faible, des zones de cisaillement sont formées et provoquent la dilatance du matériau avant d'atteindre le pic de la contrainte axiale appliquée. A une forte pression de confinement, la déformation globale est plus homogène et aucun signe de déformation localisée n'apparait à la surface de l'échantillon.

Par ailleurs, Raynaud et al. (2008) ont utilisé d'autres techniques pour déterminer la porosité du matériau et l'évolution de sa texture durant et après les essais : la porosimétrie au Mercure à une échelle millimétrique et les observations au MEB à une échelle micrométrique. Ces observations ont été effectuées dans des zones proches des bandes de cisaillement essentiellement à une pression de confinement faible et modérée (Fig. I.50) dans le cas des essais de porosimétrie au Mercure.

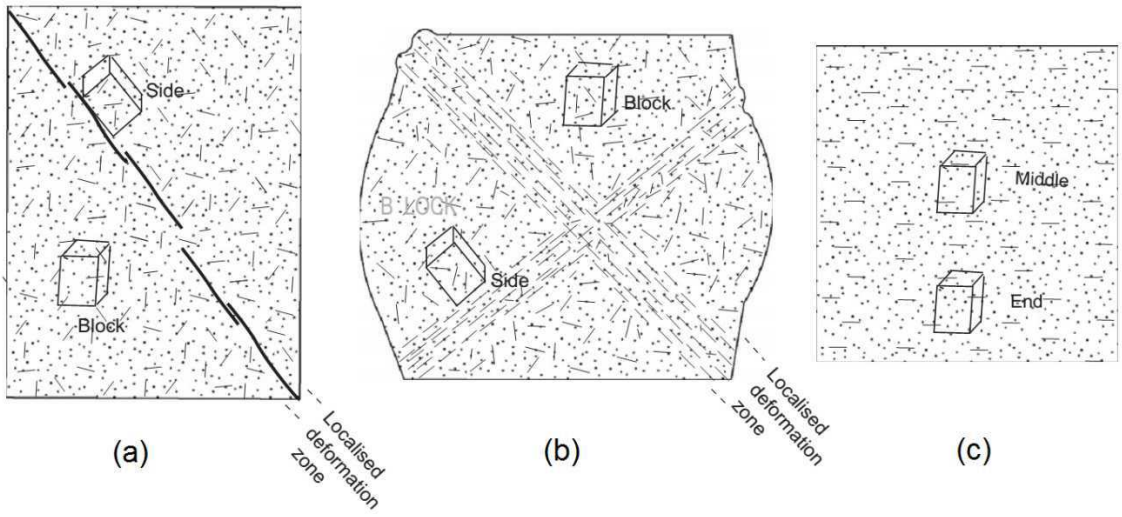


Figure I.50 : Positions des zones analysées à la porosimétrie au Mercure : (a) faible pression, (b) pression modérée, (c) forte pression (Raynaud et al., 2008).

Les zones de cisaillement observées par les auteurs à l'échelle de l'échantillon correspondent à des bandes de cisaillement à l'échelle microscopique où le mécanisme de

déformation est concentré dans une épaisseur non nulle. Au niveau de ces bandes, la discontinuité de la déformation est prise en compte. En effet, la bande de cisaillement diffère de la fissure. Elle ne constitue pas un déplacement de la discontinuité de l'assemblage des grains comme c'est le cas pour une fissure, expliquent les auteurs.

Par ailleurs, différents mécanismes de déformation ont été observés à différentes pressions de confinement. Les auteurs ont conclu qu'à une faible pression, la rupture est localisée et associée au phénomène de dilatance. A une forte pression de confinement, la rupture est diffuse et aucune localisation de la déformation n'apparait.

I.3.1.4 Comportement de dilatance des argiles surconsolidées

Pour les essais triaxiaux surconsolidés conduits sur les argiles, il est nécessaire de comprendre et de caractériser le phénomène de dilatance et sa relation avec le degré de surconsolidation OCR. Ainsi, cela permettra d'expliquer une éventuelle influence de la dilatance sur l'évolution des propriétés élastiques de l'argile.

Hattab et Hicher (2004) ont réalisé une série d'essais triaxiaux purement déviatoriques sur la kaolinite P300 avec différents degrés de surconsolidation OCR = 1 à 50. Les auteurs ont étudié l'évolution de la déformation volumique en fonction du déviateur dont les résultats sont présentés sur la figure I.51.

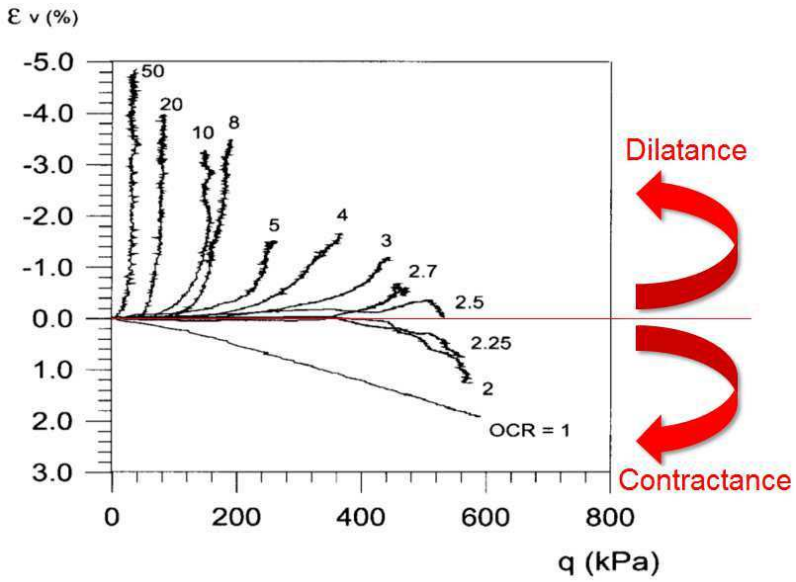


Figure I.51 : Variations de la déformation volumique en fonction du déviateur (Hattab et Hicher, 2004).

A partir de cette représentation (Fig. I.51), les auteurs ont distingué trois domaines de déformation qui caractérisent le comportement en fonction du degré de surconsolidation.

- un comportement contractant pour OCR compris entre 1 et 2.5,

- un comportement dilatant pour OCR > 2.5,

- les comportements dilatant (OCR $\geq$ 2.5) et contractant (OCR $\leq$ 2.5) s'activent après une phase initiale à volume constant, excepté le cas OCR=1 qui montre un comportement contractant dès le début du chargement.

Par ailleurs, les auteurs ont défini une valeur caractéristique du déviateur q_c pour chaque OCR, au-delà de laquelle la déformation volumique évolue, en dilatance ou contractance, après la phase à volume constant. Ensuite, les points correspondant à ces valeurs de q_c ont été reportés dans le plan des contraintes [q - p'], illustré sur la figure I.52.

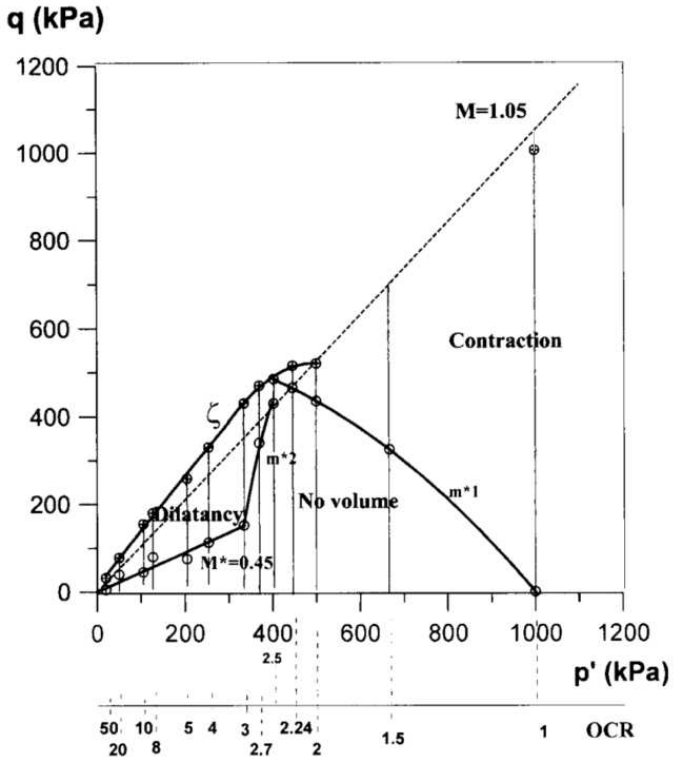


Figure I.52 : Conditions du changement de volume dans le plan [q - p'] (Hattab et Hicher, 2004).

Les résultats de la figure I.52 ont permis d'obtenir les différents domaines identifiés précédemment.

- domaine de dilatance (OCR $\geq$ 2.5) d'une part délimité par l'enveloppe de la résistance maximale ξ,

- domaine de contractance (OCR $\leq$ 2.5) d'une part délimité par la droite de l'état critique M,

- d'autre part, ces deux domaines sont délimités par un troisième domaine à volume constant dont les limites sont définies par les droites M*, m^*_1 et m^*_2 qui indiquent le début de la contractance ou la dilatance.

Ainsi, nous pouvons voir que le degré de surconsolidation est un paramètre important permettant de contrôler le comportement de la déformation volumique (contractant ou dilatant) pendant le chargement triaxial.

I.3.2. Endommagement élastique

L'objectif dans cette section est d'expliquer comment est analysée l'évolution des propriétés élastiques des matériaux argileux, endommagés sous chargement mécanique (chemin triaxial par exemple).

I.3.2.1 Propriétés élastiques du matériau endommagé

Les méthodes acoustiques permettant la mesure de la vitesse d'onde sont généralement utilisées pour la caractérisation des propriétés élastiques d'un matériau.

Dans le cas des géomatériaux, les dispositifs de chargements mécaniques classiques (cellule triaxiale, cellule oedométrique … etc) ont été adaptés par la mise en place de transducteurs acoustiques (par exemple, Marion et al., 1992; Sarout et al., 2007; Delle Piane, 2010; Bhuiyan et al., 2010, 2013). Basés sur la technique de transmission de pulsation (Birch, 1960), ces systèmes expérimentaux permettent de mesurer les vitesses d'ondes de compression et de cisaillement et déduire le module élastique dynamique.

Sarout et al. (2007) ont effectué une identification expérimentale du tenseur dynamique élastique de rigidité d'une roche argileuse (argilite de Bure) à partir d'une éprouvette cylindrique sous chargement. Des mesures ultrasons des vitesses d'ondes de compression et de cisaillement ont été réalisées durant le chargement triaxial, au moyen de transducteurs (f = 1MHz) placés directement sur l'éprouvette testées suivant le schéma illustré sur la figure I.53.

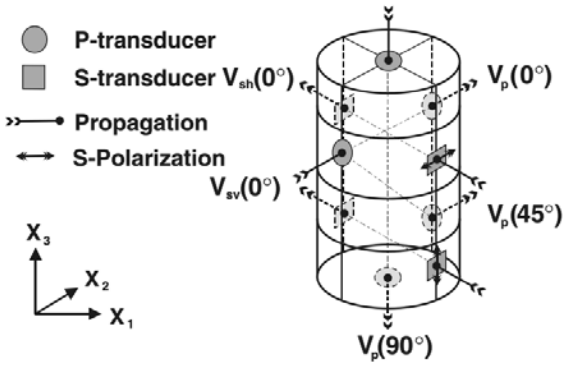


Figure I.53 : Représentation schématiques des positions des transducteurs ultrasons (Sarout et al., 2007).

La figure I.54 (a) montre, dans le plan [contrainte axiale - déformation axiale], le chemin de contrainte conduit en deux cycles de chargement avec une phase de déchargement. Le chargement axiale atteint le pic à 50 MPa pour une déformation axiale de 1.9%, puis décroît vers sa valeur finale obtenue dans un palier à 42 MPa. D'autre part, une analyse post-mortem de l'éprouvette a montré une localisation de la déformation sous forme de bande de cisaillement inclinée à 45° par rapport au plan horizontal de stratification.

L'évolution des vitesses d'onde (Vp et Vs) obtenues au cours du chargement suivant plusieurs plans (0°, 45° et 90°) est représentée sur la figure I.54 (b) en fonction de la

contrainte axiale jusqu'au pic (50 MPa). En termes de vitesse d'onde de compression, les résultats montrent :

- une décroissance monotone de Vp (0°) dans le plan parallèle à la stratification,

- une croissance de Vp (90°) dans le plan perpendiculaire à la stratification,

- une légère croissance de Vp (45°) jusqu'à 30 MPa, puis décroît considérablement.

Par ailleurs on peut observer, pour toutes les vitesses, une irréversibilité de la microstructure de l'argilite après déchargement (de 46 à 0 MPa), mise en évidence par le changement résiduel de la vitesse d'onde initiale. En revanche, le rechargement allant jusqu'à 50 MPa produit une évolution des vitesses qualitativement similaire à celle obtenue dans le premier chargement.

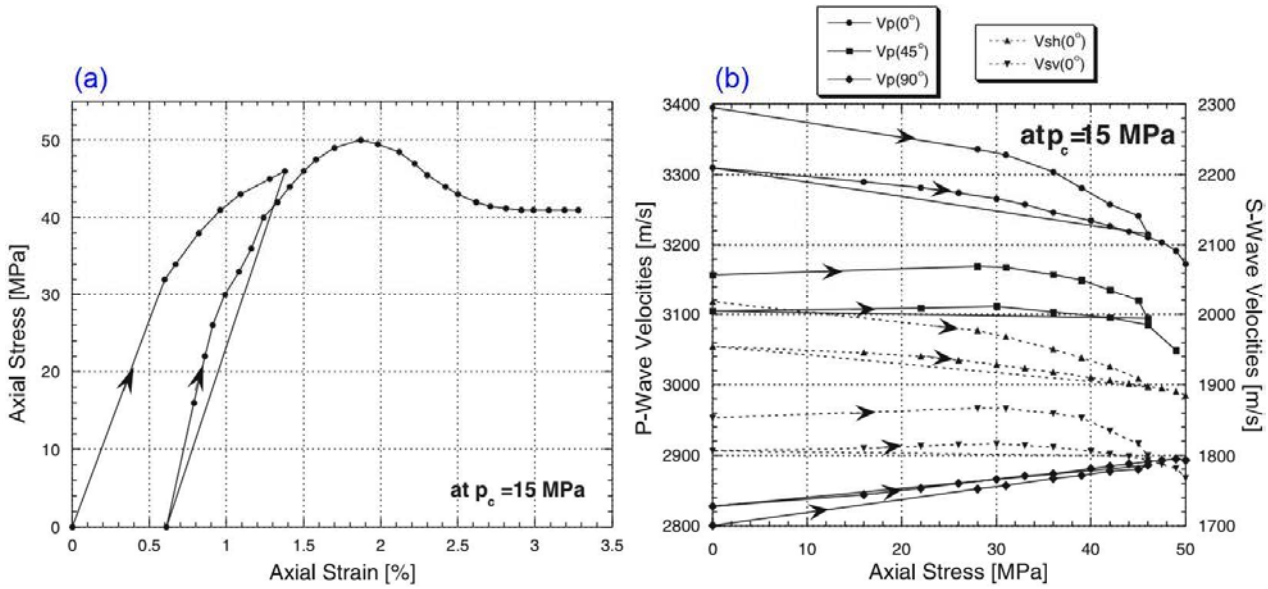


Figure I.54 : Résultats à une pression de confinement p_c=15 MPa : (a) courbe contrainte - déformation axiales, (b) Evolution des vitesses de compression Vp et de cisaillement Vs (Sarout et al., 2007).

Dans le cas des mesures multidirectionnelles de la vitesse d'onde, Bhuiyan et al. (2013) ont réalisé une étude comparative entre les différents systèmes expérimentaux permettant de mesurer les mêmes propriétés. Les auteurs ont comparé le comportement statique et dynamique d'une argile (kaolinite) et d'un sable sous la compaction uniaxiale dans deux cellules oedométrique et triaxiale. Dans le cas de la cellule triaxiale, les auteurs ont effectué deux essais sur la kaolinite et dont les courbes contrainte-déformation sont représentées sur la figure I.55 (a). L'état de contrainte initial avant chargement est différent : le premier a subit un chargement hydrostatique tandis que le deuxième était sous conditions de déformation uniaxiale.

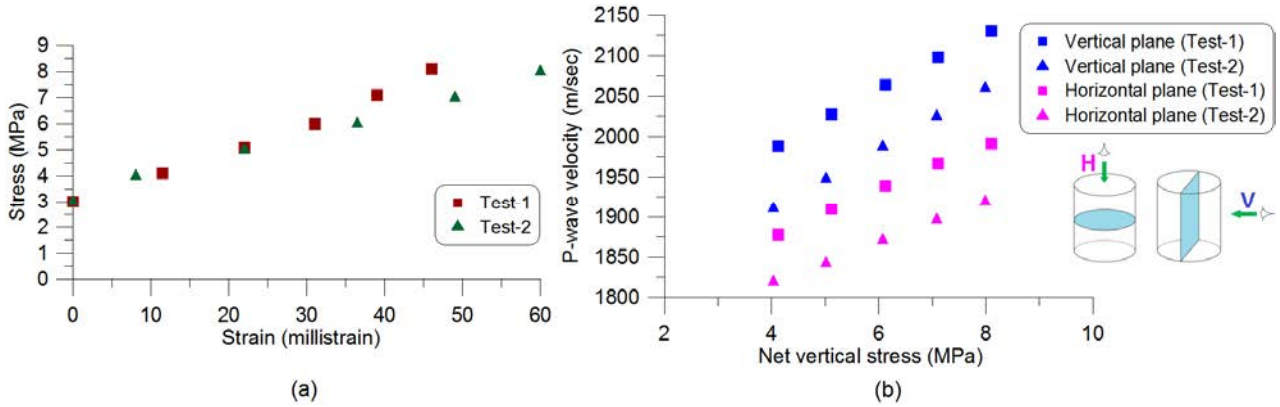


Figure I.55 : Résultats expérimentaux de deux essais triaxiaux sur la kaolinite : (a) courbe contrainte-déformation, (b) vitesses d'onde de compression sur les deux plans vertical et horizontal (Bhuiyan et al., 2013).

Les vitesses d'onde de compression mesurées dans les deux plans vertical et horizontal sont tracées en fonction du niveau de la contrainte verticale (Fig. I.55 b). Les résultats montrent des valeurs élevées dans le plan vertical pour les deux essais avec la même tendance. Cependant, les auteurs expliquent cette différence par la diminution de la porosité dans le premier cas, ce qui augmente la densité du matériau et par conséquent la vitesse d'onde est plus élevée.

I.3.2.2 Identification de la déformation localisée par propagation ultrasonore

Nous présentons les travaux de Hall et al. (2007) menés sur une argile (marne de Beaucaire). Les auteurs ont utilisé deux méthodes de mesure des vitesses d'ondes élastiques afin de quantifier l'endommagement induit par la déformation :

- La méthode dite "Circumferential Velocity Analysis" (CVA) consiste à mesurer les vitesses d'ondes sur différents chemins radiaux dans un échantillon de forme cylindrique.

- La méthode de "tomographie ultrasonore" permet d'effectuer des mesures de vitesses de propagation d'ondes sur un échantillon prismatique.

Dans les deux cas, la mesure a été effectuée sur des échantillons préalablement chargés lors d'un essai de compression (triaxial pour la première méthode et biaxial pour la deuxième).

Utilisant la méthode CVA, les mesures ont été réalisées sur une éprouvette cylindrique d'argile (Fig. I.56) préalablement déformée jusqu'à la rupture sous chargement triaxial axisymétrique suivi d'une micro tomographie à rayons X (voir Lenoir et al., 2004).

Les vitesses moyennes d'onde de compression ont été estimées à partir des mesures de temps de propagation de l'onde P, traversant l'échantillon entre les capteurs diamétralement opposés pour des azimuts régulièrement espacés de 10° tout autour de l'éprouvette. Les zones de mesure des vitesses d'ondes ont été fixées à trois hauteurs de l'éprouvette (i), (ii) et (iii) représentées sur la figure I.56.

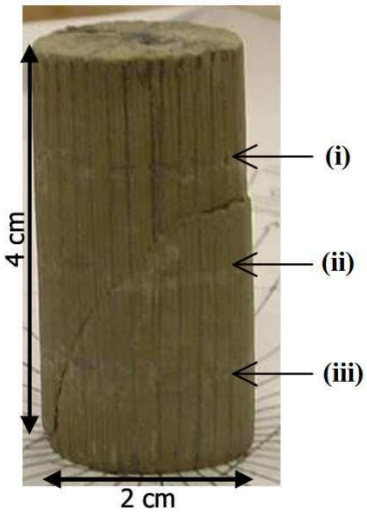


Figure I.56 : Eprouvette d'argile (marne de Beaucaire) déformée et localisation des zones de mesures (Hall et al., 2007).

Les coupes horizontales de la reconstruction tomographiques à rayons X sont présentées sur la figure I.57 dans les trois zones étudiées.

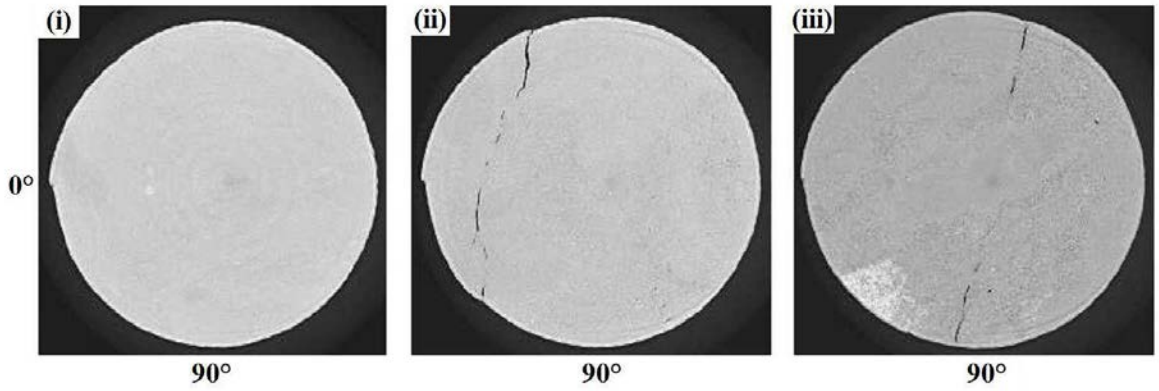


Figure I.57 : Coupes horizontales de la reconstruction tomographique à rayons X dans les trois zones de mesures (i), (ii) et (iii) (Hall et al., 2007).

Hall et al. (2007) montrent que :

- dans la zone (i), non concernée par la déformation localisée, une anisotropie initiale a été mise en évidence (Fig. I.57 (i)). Les auteurs l'attribuent probablement au litage sédimentaire.

- dans la zone (ii), un effet très marqué de la déformation localisée est visible sur les vitesses d'onde (voir Fig. I.57 (ii)). Celles-ci sont réduites lorsqu'elles traversent la zone de localisation.

- dans la zone (iii), un effet de l'endommagement est identifié mais difficile à interpréter. En effet, les vitesses d'onde sont réduites au niveau des zones ouvertes de la déformation localisée. Par contre, elles paraissent augmentées au niveau de la partie centrale de la bande de cisellement (Fig. I.57 (iii)). Les auteurs expliquent ce résultat par un

éventuel effet de compactage (bande fermée et compactée), pouvant être associé à l'effet de l'endommagement (fissures ouvertes), et par une hétérogénéité naturelle.

Dans cette étude, les résultats obtenus montrent que les mesures de vitesses d'onde ultrasonore sont sensibles à la déformation localisée observée par micro-tomographie à rayons X. Par ailleurs, les effets des fissures ouvertes et compactées ont été observés.

Enfin, Hall et al. (2007) attribuent les variations observées dans les résultats obtenus à la déformation localisée, et l'effet de l'anisotropie structurelle, plutôt qu'à la dilatation de l'échantillon lors du déchargement en fin d'essai triaxial.

I.3.2.3 Caractérisation de l'anisotropie élastique induite

Afin de caractériser l'anisotropie élastique induite par le chargement mécanique, des mesures de vitesses d'onde suivant différents plans de l'échantillon ont été réalisées.

Dans les travaux de Delle Piane et al. (2010) et Bhuiyan et al. (2010), des études ont été menées sur la caractérisation de l'anisotropie des minéraux argileux, sous chargement mécanique, en effectuant des mesures multidirectionnelles de la vitesse d'onde.

Bhuiyan et al. (2010) ont décrit l'anisotropie de la vitesse d'onde de compression en utilisant le paramètre χ définit par Thomsen (1986) en fonction de la vitesse d'onde radiale V_{pr} et verticale V_{pz} :

$$\chi = \frac{V_{pr}^2 - V_{pz}^2}{V_{pz}^2} \qquad [I.21]$$

Les variations de l'anisotropie de la vitesse d'onde en fonction de la contrainte verticale sont représentées sur la figure I.58 pour des mélanges sable-argile (kaolinite). Ces résultats indiquent une augmentation de l'anisotropie initiale avec celle de la teneur en argile, ce qui indique une orientation préférentielle des minéraux argileux à un niveau faible de la contrainte (anisotropie intrinsèque). A mesure que la contrainte verticale évolue (en conditions de déformation uniaxiale), l'anisotropie de la vitesse diminue.

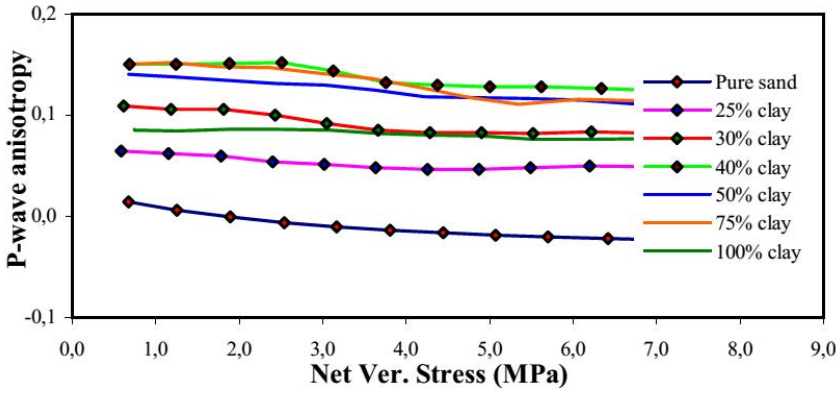


Figure I.58 : Anisotropie de la vitesse d'onde en fonction de la contrainte verticale dans les essais oedométriques avec des mélanges sable-argile (Bhuiyan et al., 2010).

Bhuiyan et al. (2010) montrent que, même si elle est faible, une différence existe entre la vitesse de propagation d'onde sur le plan parallèle au chargement oedométrique, et celle obtenue sur le plan perpendiculaire. Ils mettent ainsi en évidence une légère anisotropie du matériau. Delle Piane et al. (2010) expliquent l'anisotropie élastique initiale par la composition minéralogique de l'échantillon à l'état initial et la présence d'éventuelles micro-fissures, tandis que la variation de l'anisotropie résulte du niveau de chargement appliqué et l'orientation des particules minérales.

Dans le cas des roches argileuses (argilites de Bure), Wei et al. (2016b) ont étudié l'effet de la décompression sur l'évolution du module élastique dynamique. Les mesures ultrasons ont été réalisées par l'essai "Pundit" (Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester) sur des blocs d'Argilite de Bure, ayant une teneur en eau w = [5 - 5.7] % et une densité sèche ρ = [2 - 2.08]. Ces mesures ont été effectuées suivant trois directions illustrées sur la figure I.59 (a). La direction 1 correspond à la direction verticale, perpendiculaire à la stratification du matériau. Les directions 2 et 3 correspondent à la direction horizontale, parallèle à la stratification.

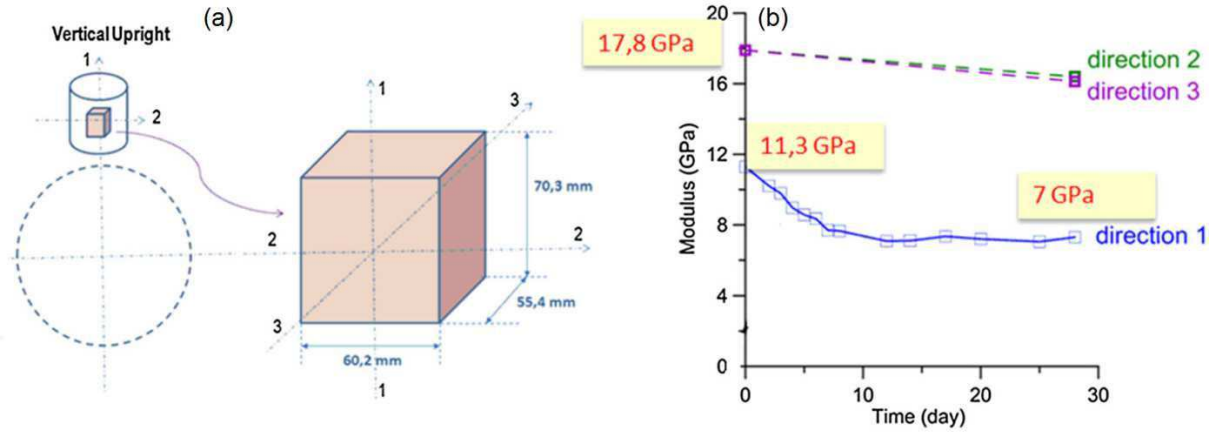


Figure I.59 : Effet de la décompression sur le module élastique dynamique : (a) directions de mesures ultrasons, (b) variations du module dynamique suivant ces directions (Wei et al., 2016b).

La figure I.59 (b) présente les variations du module élastique dynamique en fonction du temps de décompression, déterminé à partir de la vitesse d'onde de compression V_p et un coefficient de Poisson ν pris égal à 0.3 :

$$E = \rho . V_p^2 \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{(1-\nu)} \qquad [I.22]$$

On peut constater que les valeurs initiales (t=0) sont comprises entre 11 et 18 GPa. Les résultats montrent, d'une part, que le module élastique dans la direction 1 est inférieur à celui obtenu dans les directions 2 et 3. D'autre part, la décroissance du module suivant la direction 1, notamment pendant les 12 premiers jours après décompression, est plus importante que dans les directions 2 et 3. Ceci met en évidence une anisotropie du matériau et l'effet de la décompression suivant la direction 1 qui peut être due à la séparation des différentes couches de stratification.

Ainsi, la méthode acoustique permet de caractériser l'anisotropie élastique à partir de la mesure de la vitesse d'onde. Cette anisotropie peut être attribuée à plusieurs facteurs; les orientations privilégiées dans l'espace poral du matériau, ses caractéristiques textuelles et structurelles et des constituants minéraux anisotropes (Sarout et al., 2007). Par exemple, dans l'étude de pétrofabrique des argilites menée par Homand et al. (2006) sur l'Argilite de Bure (prélevée à une profondeur entre 460 et 505 m), les auteurs ont trouvé une anisotropie élastique assez faible entre la direction 1 (perpendiculaire à la stratification) et les deux directions 2 et 3 (parallèles à la stratification).

I.3.3. Fissuration de l'argile sous sollicitations hydriques

La présence de fissures dans les sols induit la création de zones à faible tension provoquant ainsi une chute de la résistance mécanique (Morris et al., 1992). Ceci a un impact majeur sur la conductivité hydraulique des sols argileux qui augmente à mesure que les fissures se développent.

La dessiccation libre ou contrôlée est conditionnée par les paramètres hydriques (température, humidité relative) qui influencent l'évolution des variables analysées au cours du séchage (par exemple, teneur en eau, degré de saturation, limite de retrait, succion du matériau, etc). Pour cela, nous allons nous intéresser dans cette partie à l'effet des gradients de succion et de température sur les variations de volume d'un sol non-saturé sous dessiccation.

I.3.3.1 Fissuration par dessiccation

La fissuration par dessiccation des sols argileux intervient généralement lorsque la contrainte de traction développée dans le sol, due à la succion, excède sa résistance à la traction (Kodikara et al., 1997). Les contraintes de traction se développent uniquement dans le cas où le sol est restreint contre le retrait. Cette restriction peut être externe (par exemple les interfaces d'une couche rugueuse) ou interne (par exemple, des parties du sol au cours d'un séchage non-uniforme).

Les modèles de fissuration peuvent être classés dans deux catégories : orthogonaux et non-orthogonaux. Dans le cas orthogonal, les fissures tendent à former des angles droits, contrairement au cas non-orthogonal où des formes hexagonales (fissures à 120°) et leurs déviations entrent dans cette catégorie. Au début du séchage, des fissures primaires apparaissent et divisent la surface du sol en blocs. Au cours du séchage, des fissures secondaires et tertiaires se développent et peuvent être, théoriquement, considérées comme une bifurcation des fissures primaires (Bažant and Cedolin, 1991; Kodikara et al., 1999).

La figure I.60 présente quelques modèles théoriques plausibles des fissures de dessiccation proposés par Bažant and Cedolin (1991) dans un milieu idéalisé. Le modèle de fissures parallèles (Fig. I.60 a) peut être admis comme un modèle 2D tandis que le reste est essentiellement considéré comme des modèles 3D.

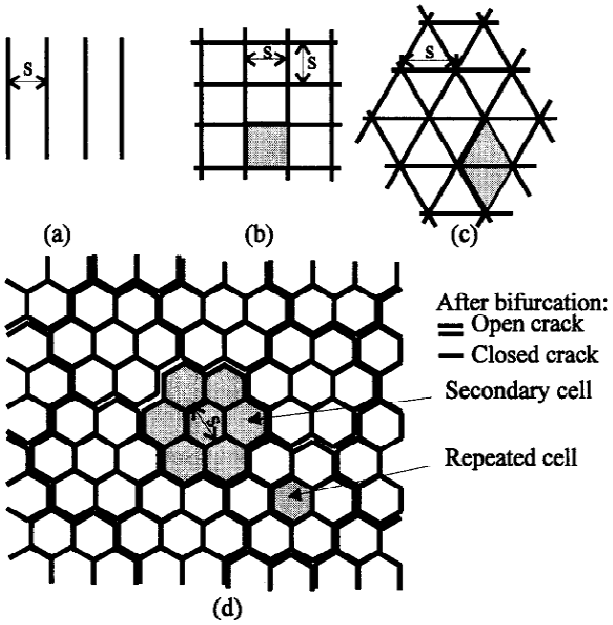


Figure I.60 : Modèles théoriques plausibles des fissures de dessiccation dans un milieu idéalisé (Bažant and Cedolin, 1991).

Péron et al. (2009a) ont mené une investigation sur le comportement sous dessiccation des sols cohésifs, plus particulièrement sur les mécanismes de retrait et l'initiation de la fissuration.

Les auteurs ont réalisé trois types d'essai : essais de dessiccation libre, essais de dessiccation contrainte, et des essais sur les modèles de fissuration. Dans ce dernier cas, les essais sont similaires à ceux du deuxième type où la contrainte est assurée par l'adhérence entre le support (plaque en aluminium) et le matériau initialement saturé.

Les résultats de deux essais sur deux échantillons, de dimensions 300×300×4 mm^3 et 300×300×12 mm^3, sont présentés respectivement sur la figure I.61 (a) et (b).

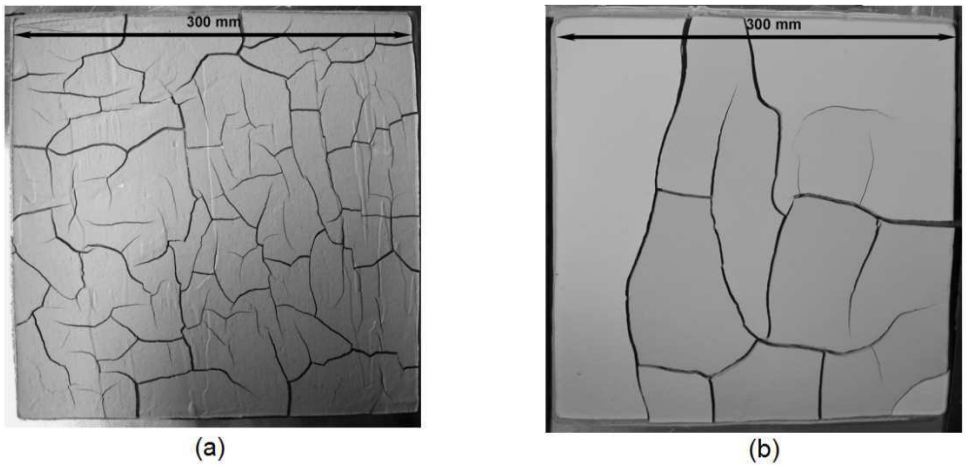


Figure I.61 : Formation du réseau de fissures à la fin du séchage : (a) échantillon 300×300×4 mm^3, (b) échantillon 300×300×12 mm^3 (Péron et al., 2009a).

Les résultats de la figure I.61 montrent la formation d'un réseau dense de fissures fines dans le cas de l'échantillon à 4 mm d'épaisseur et quelques fissures larges dans le cas de l'échantillon à 12 mm d'épaisseur. Corte and Higashi (1960) ont obtenu les mêmes tendances sur des échantillons carrés. Les angles formés par les intersections entre les fissures ont été mesurés et varient entre 90° et 150° pour l'ensemble des essais.

Plusieurs recherches (par exemple Lau, 1987; Morris et al., 1992; Philip et al., 2001; Kodikara et al., 2002) ont apportés des résultats importants sur la fissuration par dessiccation. Néanmoins, l'investigation se poursuit pour une meilleure compréhension du phénomène et des mécanismes d'initiation et propagation des fissures.

I.3.3.2 Mécanique de la rupture et propagation des fissures

L'étude de la fissuration par dessiccation est basée sur l'identification des modes de fissuration ainsi que des mécanismes de propagation qui interviennent après l'amorçage des fissures.

a- Etat des contraintes au voisinage des fissures :

Afin de comprendre les mécanismes de propagation, Il est important d'examiner l'état de contrainte et le champ des déplacements au voisinage de la fissure. Dans cette zone, les distributions de la contrainte (σ_x, σ_y et σ_{xy}) et des déplacements (u, v) sont données par les expressions suivantes (Zienkiewicz, 1977 cité dans Wei, 2014) :

$$\sigma_x = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2}\left(1-\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right) \quad [I.23]$$

$$\sigma_y = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2}\left(1+\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right) \quad [I.24]$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}}\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{3\theta}{2} \quad [I.25]$$

$$u = \frac{K_1}{4G}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}\left[(2\kappa-1)\cos\frac{\theta}{2}-\cos\frac{3\theta}{2}\right] \quad [I.26]$$

$$v = \frac{K_1}{4G}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}\left[(2\kappa+1)\sin\frac{\theta}{2}-\sin\frac{3\theta}{2}\right] \quad [I.27]$$

Avec K_1 le facteur d'intensité de la contrainte qui dépend du mode de fissuration, de l'orientation et des dimensions des fissures.

Konrad and Ayad (1997b) ont proposé une théorie générale de la dessiccation dans les sols argileux pour analyser l'espacement entre les fissures primaires au début de leur formation. Ce travail est basé sur la théorie de la mécanique de la rupture élastique linéaire (en anglais Linear Elastic Fracture Mechanics - LEFM). Elle fourni une description mathématique du phénomène de la propagation des fissures associé au principe de la contrainte effective.

La concentration de contrainte au voisinage de la pointe de fissure est représentée sur la figure I.62 dans le cas du mode I. Elle se traduit par la propagation de la fissure à une profondeur contrôlée par le champ de contraintes et les propriétés intrinsèques du sol.

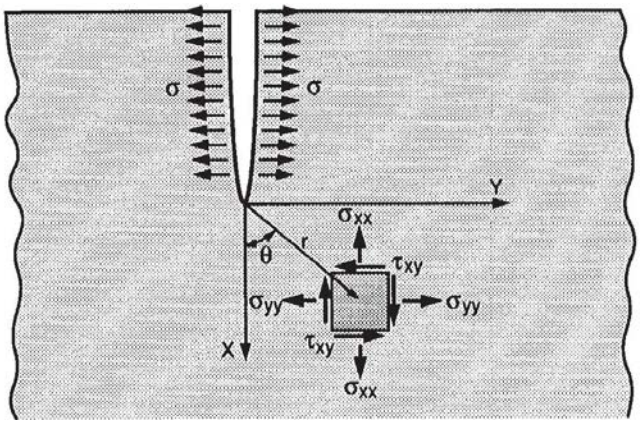


Figure I.62 : Etat des contraintes à la pointe de la fissure dans le mode d'ouverture - mode I (Konrad and Ayad, 1997b).

Irwin (1958) (cité par Konrad and Ayad, 1997b) montre que la propagation des fissures est essentiellement associée au champ de contraintes au voisinage immédiat de la pointe de fissure. Pour une longue fissure de traction dans un milieu élastique idéalisé, sous conditions de déformation plane, le facteur d'intensité de la contrainte pour le mode d'ouverture (mode I) s'écrit comme suit :

$$K_I = \left(\frac{E.G}{1-\nu^2} \right)^{0,5} \qquad [I.28]$$

Où E et ν représentent respectivement le module de Young et le coefficient de Poisson du sol. Le paramètre G est le taux de l'énergie de déformation libérée avec l'extension de la fissure.

Différentes approches ont été présentées sur la base de : la théorie de l'élasticité, la transition entre la rupture en tension et en cisaillement, et enfin la mécanique de fissuration élastique linéaire. L'ensemble de ces solutions considèrent que l'initiation de la fissuration se produit dans le sol non-saturé. En revanche, plusieurs études (par exemple Konrad and Ayad, 1997a,b; Lloret et al., 1998; Chertkov, 2002; Nahlawi, 2004) ont soit supposé soit conclu que le sol est saturé au début de la fissuration. Pour cela, les équations données par Morris et al. (1992) ne peuvent pas être utilisées pour prévoir l'initiation de la fissuration et la profondeur initiale de la propagation. Cependant, elles peuvent être appliquées pour prévoir le début de formation des fissures secondaires et leur profondeur.

b- Mécanismes de fissuration :

Dans les problèmes 3D, trois modèles de fissuration sont mis en évidence et représentés sur la figure I.63 (Degarmo et al., 2003); un mode d'ouverture (mode I), un mode de glissement (mode II) et un mode de déchirement (mode III).

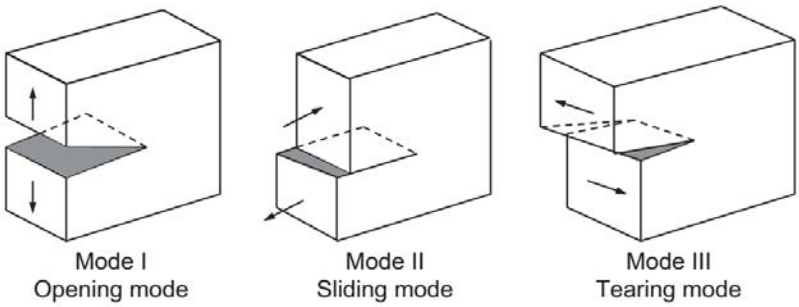


Figure I.63 : Modes de fissuration considérés dans les problèmes 3D (Degarmo et al., 2003).

Wei el al. (2016) ont effectué une analyse des mécanismes de formation et de propagation des fissures dans les argiles sous dessiccation. Deux argiles ont été étudiées, le kaolin P300 et un mélange de 65% de kaolin P300 et 35% de montmorillonite, noté M35, avec des limites de liquidité w_L respectivement égales à 40% et 82%. L'échantillon testé pour chaque argile (Fig. I.64 a), de 4 mm d'épaisseur, est préparé à partir d'une boue (argile poudre + eau désaérée) avec une teneur en eau initiale $w_0 = w_L$. Différents supports ont été utilisés en fonction de leur paramètre de rugosité (Sa); lisse, intermédiaire et rugueux. L'ensemble (échantillon + support) est placé dans un dispositif expérimental (Fig. I.64 b) équipé d'une balance, pour suivre l'évolution de la teneur en eau et d'une caméra, permettant de capturer des images après chaque 20 min de séchage pour la corrélation d'images numérique (CIN). Les conditions hydriques ambiantes des essais sont; une température T=20°C et une humidité relative HR=50%.

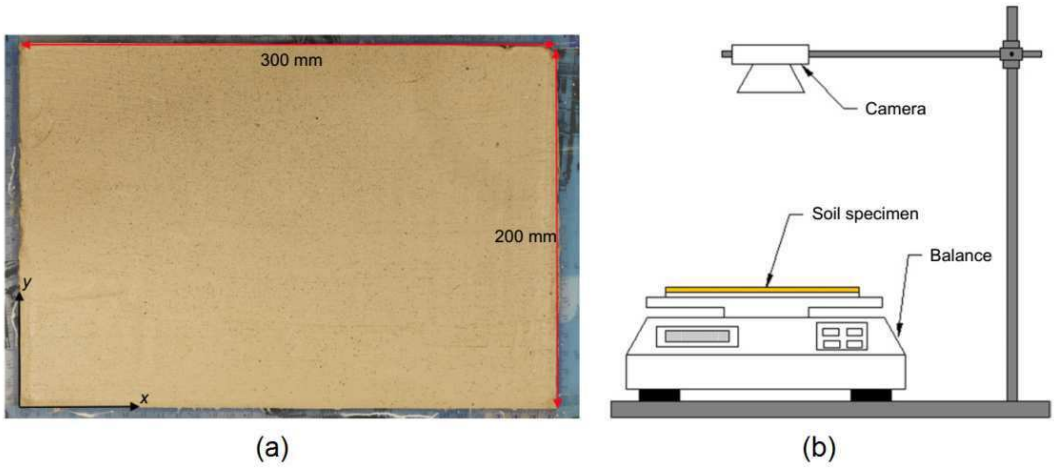


Figure I.64 : (a) Dimension de l'échantillon d'argile, (b) dispositif expérimental (Wei et al., 2016).

A la fin du séchage, le réseau de fissures est formé. Wei el al. (2016) ont identifié les trois modes de fissuration durant les essais; le mode d'ouverture, le mode de glissement et le mode de déchirement. Le mode d'ouverture a été détecté dans tous les cas, seul ou en combinaison avec les deux autres modes. La figure I.65 (a) montre la zone de fissuration dans la cartographie de la déformation longitudinale ε_{xx}, obtenue par la CIN à t=37.33h dans le cas du mélange M35 sur un support lisse. ε_{ss}= -1.5% est définie comme la déformation de retrait. ε_{xx} supérieure à ε_{ss} représente l'extension et ε_{xx} inférieure à ε_{ss} représente la compression.

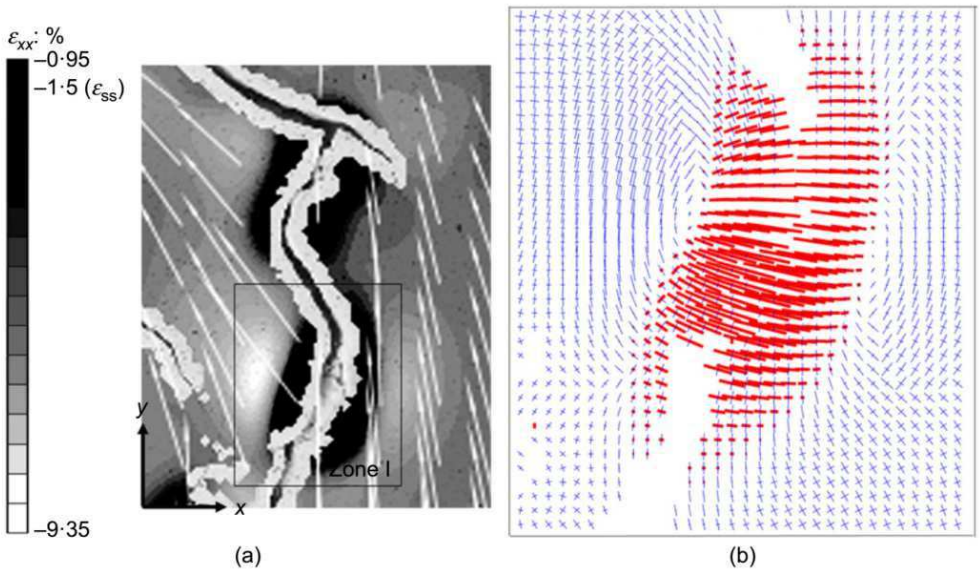


Figure I.65 : Fissuration par la mode d'ouverture : (a) ε_{xx} à t=37.33h (M35, support lisse), (b) déformations principales mécaniques dans la zone I (Wei et al., 2016).

Pour identifier le mécanisme de fissuration, les auteurs ont représenté les déformations principales mécaniques dans la zone de fissure (Fig. I.65 b). Les vecteurs rouges désignent l'extension et les vecteurs bleus montrent la compression. On constate que la direction de la fissure est perpendiculaire à celle des extensions principales. Ainsi, les auteurs ont conclu que la fissure, dans cette zone, s'est formée par le mode d'ouverture (mode I).

I.3.4. Endommagement de l'argile sous sollicitation mécanique

Plusieurs études ont été menées sur le comportement de l'argile en traction (par exemple Fang and Chen, 1971,1972; Krishnayya et al., 1974; Ajaz and Parry, 1975). La plupart de ces études montrent un intérêt pour la détermination de la résistance à la traction des sols, les méthodes d'essais peuvent être classées dans deux catégories :

- La première méthode est l'essai de traction directe (par exemple Tang and Graham, 2000),

- La deuxième méthode est l'essai de traction indirecte, il peut être réalisé par différentes approches : (1) l'essai de traction brésilien (Frydman, 1964), (2) l'essai de flexion de poutre (Krishnayya et al., 1974), (3) l'essai du cylindre creux (Al-Hussaini, 1981) et (4) l'essai à double poinçon "Double-Punch" (Fang and Chen, 1971).

Nous pouvons citer Leonards and Narain (1963) qui ont réalisé des essais de flexion pour étudier les déformations dues à la fissuration de traction sur différentes argiles compactées et préparées sous forme de poutrelles. Les auteurs ont analysé l'influence de la teneur en eau, l'effort appliqué et le temps sur la déformation en traction à la fissuration. Les résultats obtenus ont montré que la déformation en traction enregistrée à la rupture ou à la fissuration était comprise entre 0.05 et 0.33 %. Cette gamme de valeurs varie en fonction de plusieurs paramètres (type d'essai, taux de chargement, la définition de la rupture, …etc).

Ajaz and Parry (1975) ont définit la rupture au niveau maximum de la contrainte de traction. Les auteurs ont réalisé deux types d'essais (flexion et traction directe) sur deux argiles à différentes valeurs de teneur en eau (9.9 - 31.6 %). La déformation en traction obtenue à la rupture était comprise entre 1 et 16 % pour l'essai de flexion et entre 0.5 et 5 % pour l'essai de traction directe. Ces résultats montrent aussi que la déformation en traction augmente à mesure que la teneur en eau augmente. L'influence de la teneur en eau a également été identifiée dans plusieurs autres recherches (par exemple Suklje et al., 1967; Lushnikov et al., 1973).

I.3.4.1 Critères de la rupture du sol soumis à une tension

Les théories sont avancées pour permettre de décrire le comportement des sols à la rupture. Pour les sols stabilisés et les masses granulaires, trois théories principales sont disponibles (Lee and Ingles, 1968) : la théorie de Mohr, décrite en partie physique et en partie phénoménologique; la théorie de Griffith entièrement physique et la théorie de Weibull entièrement statique.

La théorie de Mohr affirme que la rupture se produit lorsque la contrainte de cisaillement τ_f sur un plan atteint d'abord une valeur critique fonction de la contrainte normale effective σ'_n.

Le critère de rupture le plus utilisé est celui de Mohr-Coulomb dont le principe est illustré sur la figure I.66.

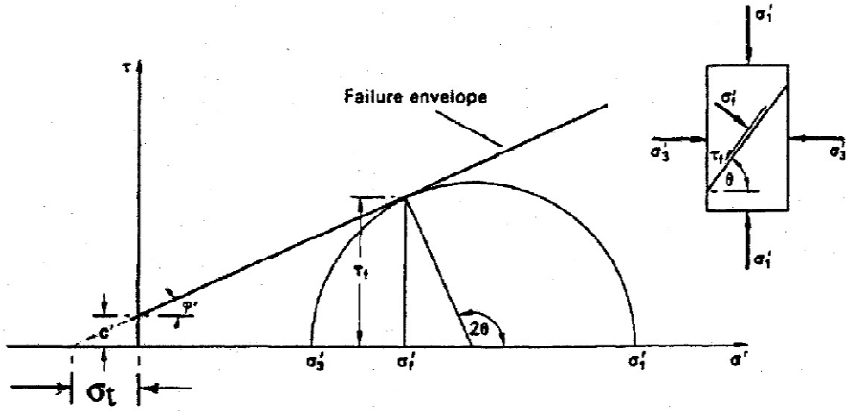


Figure I.66 : Critère de Mohr-Coulomb.

La relation permettant de définir le critère de Mohr-Coulomb est donnée par l'équation linéaire I.29 où c' et ϕ' représentent respectivement la cohésion et l'angle de frottement.

$$\tau_f = c' + \sigma'_n . \tan\varphi' \qquad [I.29]$$

Le critère de Mohr-Coulomb illustré sur la figure I.66 permet de définir des relations entre les contraintes principales effectives (σ'_1 et σ'_3) et les paramètres intrinsèques du sol (c' et ϕ') :

$$\sin\varphi' = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2}{c'\cot\varphi' + (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2} \qquad [I.30]$$

$$\sigma_1^{'} - \sigma_3^{'} = 2c'\cos\varphi' + (\sigma_1^{'} + \sigma_3^{'}).\sin\varphi' \qquad [I.31]$$

En effet, la théorie Mohr-Coulomb vise essentiellement à expliquer le comportement des matériaux soumis à des forces de compression. Elle permet de prévoir un rapport, entre une résistance à la compression non-confinée c_0 et la résistance à la traction notée T_0, exprimé par la relation suivante (Lee and Ingles, 1968) :

$$\frac{c_0}{T_0} = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi'}{2}\right) \qquad [I.32]$$

Par ailleurs, un autre critère de la rupture, défini par la théorie de Griffith, affirme que la rupture intervient dans le matériau fissuré lorsque la contrainte de traction locale maximale, au niveau de la fissure la plus longue, atteint la résistance à la traction du matériau non fissuré (Lee and Ingles, 1968). La formulation de la théorie de Griffith est dérivée à partir de l'enveloppe de Mohr (Fig. I.67 a) et définie par l'équation suivante (Brace, 1960) :

$$\tau^2 + 4K\sigma - 4K^2 = 0 \qquad [I.33]$$

Avec σ et τ sont respectivement les contraintes normale et de cisaillement, et K représente la résistance à la traction.

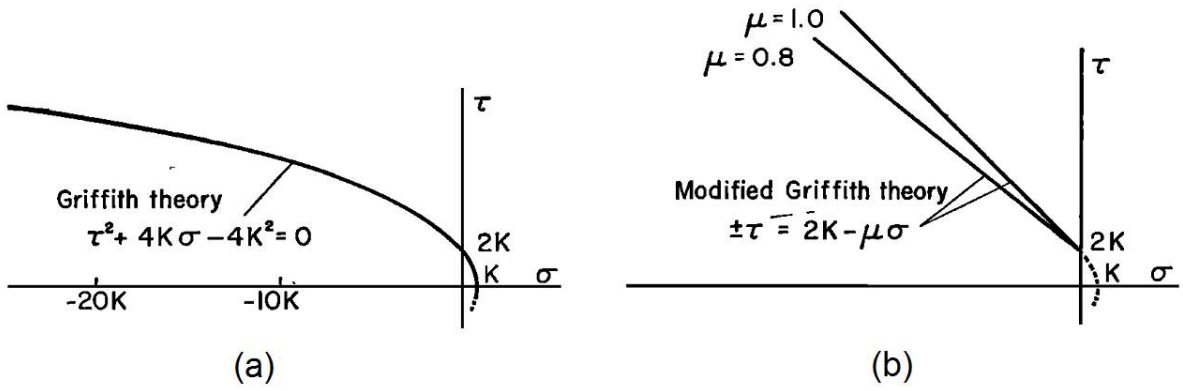


Figure I.67 : Théories dérivées de l'enveloppe de Mohr : (a) Théorie de Griffith, (b) Théorie de Griffith modifiée (Brace, 1960).

La théorie de Griffith a été modifiée par Brace (1960) et représente une combinaison des deux théories Mohr et Griffith. La partie compressive de la théorie de Griffith-Brace est essentiellement égale au critère de Mohr-Coulomb, tandis que la partie traction est égale au critère de Griffith. L'équation de la théorie de Griffith-Brace (Fig. I.67 b) est donnée par la relation simplifiée suivante :

$$\pm\tau = 2K - \mu\sigma \qquad [I.34]$$

Avec μ le coefficient de frottement à la surface de la fissure variant entre 0.8 et 1 (Brace, 1960). Sur la figure I.67 (b), l'enveloppe linéaire définie par l'équation I.34 rejoint la parabole de Griffith (Eq. I.33) sur l'axe de la contrainte de cisaillement τ.

I.3.4.2 Méthodes de mesures de la résistance à la traction

De nombreux essais mécaniques permettent de déterminer la résistance à la traction des sols. Ils sont classés dans deux catégories de méthodes pouvant être directes ou indirectes.

a - Traction directe :

Nahlawi et al. (2004) ont développé un système expérimental adapté pour réaliser un essai de traction directe. Ce dispositif, représenté sur la figure I.68, est entièrement motorisé. Il permet de mesurer le chargement au moyen d'une cellule connectée au moule mobile et le déplacement par des transducteurs (LVDT) placés sur le moule fixe. Le principe de cet appareil a été utilisé dans plusieurs études dans le développement des systèmes de traction directe (par exemple Avila, 2004; Tamrakar et al., 2005; Lakshmikantha et al., 2012; Wei, 2014).

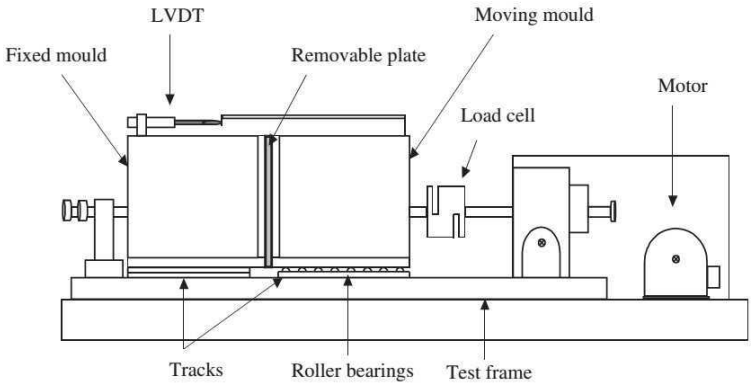


Figure I.68 : Appareil de traction directe (Nahlawi et al., 2004).

Nahlawi et al. (2004) ont mené une série d'essais de traction directe sur un ciment stabilisé et une argile (appelée Werribee). Dans le cas de l'argile, l'objectif était de simuler la rupture en traction durant la fissuration due à la dessiccation.

La figure I.69 montre les courbes de chargement de traction tracées en fonction du déplacement engendré.

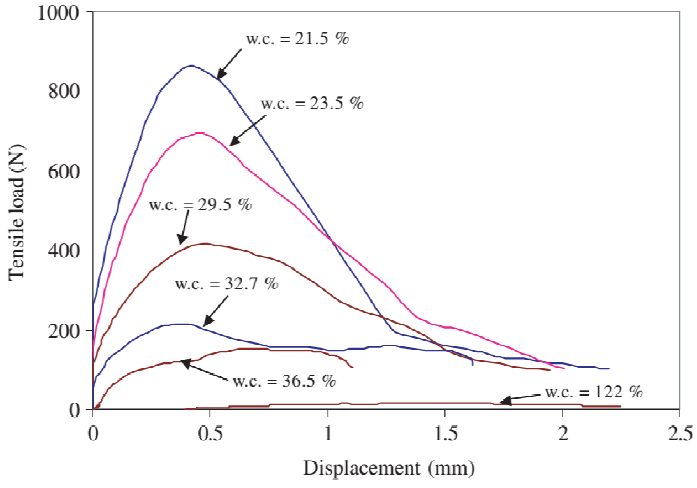


Figure I.69 : Courbes de chargement en traction directe (Nahlawi et al., 2004).

Les auteurs ont effectué des essais à différentes valeurs de teneur en eau afin d'exploiter la gamme de succions se produisant dans un essai de dessiccation. Les courbes de chargement (Fig. I.69) mettent en évidence une influence de la teneur en eau. En effet, à mesure que celle-ci augmente, la force de traction nécessaire à la rupture diminue.

b - Traction indirecte :

Pour la méthode indirecte, l'échantillon est soumis à une compression ponctuelle ou linéaire. La résistance à la traction peut être déterminée par différents types d'essais, par exemple : la flexion et le double poinçon dont les dispositifs expérimentaux sont représentés sur la figure I.70.

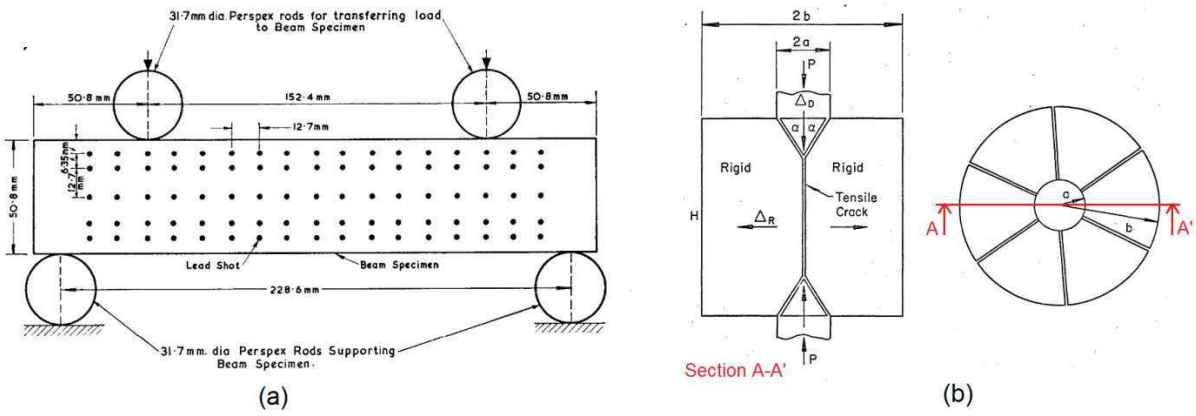


Figure I.70 : Essais de traction indirecte : (a) par flexion (Ajaz and Parry, 1975), (b) par double poinçon (Fang and Chen, 1972).

Ajaz and Parry (1975) ont utilisé un dispositif de flexion sur poutres d'argile où le chargement est appliqué en deux points équidistants du centre la poutre (Fig. I.70 a).

Fang and Chen (1972) ont étudié, en réalisant des essais à double poinçon, l'effet de différents paramètres sur les résultats (par exemple les tailles de l'échantillon et du poinçon, le taux de chargement, la force de compression et le type du sol). Le dispositif utilisé dans cette étude est représenté sur la figure I.70 (b). Il est composé de deux poinçons centrés et placés dans les parties supérieures et inférieure de l'éprouvette cylindrique. La résistance en traction est calculée à partir de la force maximale appliquée par les deux poinçons.

Les méthodes de traction indirecte sont plus adaptées pour des matériaux fragiles et élastiques que pour des matériaux ductiles (Tang et al., 2014). La résistance à la traction est essentiellement déterminée en supposant que la contrainte de traction soit uniformément répartie sur le plan de rupture.

I.3.4.3 Traction par flexion - Principe et calcul

L'essai de traction par flexion consiste à soumettre une poutre à une compression ponctuelle. En fonction du nombre de points d'application du chargement vertical, on distingue deux types d'essais :

- l'essai de flexion 3 points avec un point d'application de la charge (Fig. I.71 a),

- l'essai de flexion 4 points avec deux points d'application de la charge (Fig. I.71 b).

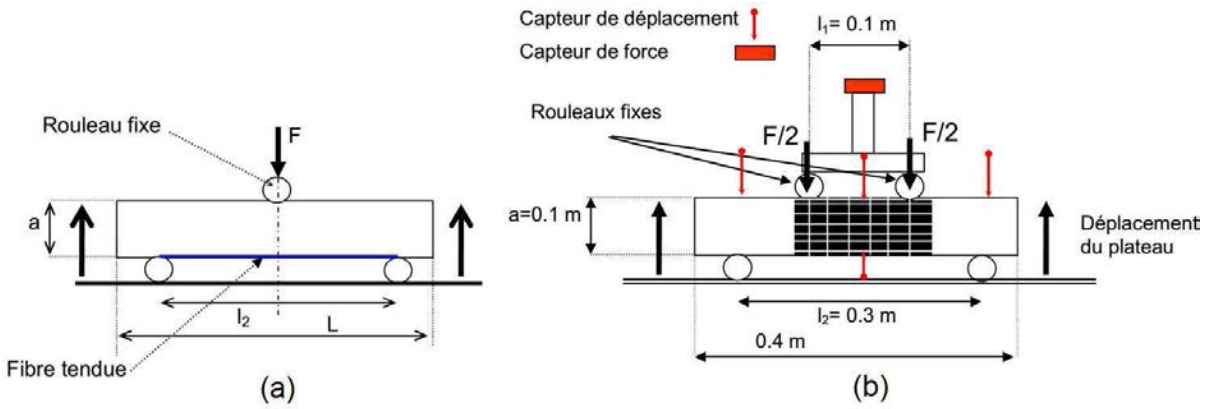


Figure I.71 : Essais de traction par flexion : (a) flexion 3 points, (b) flexion 4 points (Camp Devernay, 2008).

Dans le cas des barrières passives de couverture dans les centres de stockage des déchets, Camp Devernay (2008) a réalisé des essais de flexion 4 points afin de caractériser le comportement de l'argile en traction. L'essai de flexion permet d'observer à la fois les deux fibres tendue et comprimée de la poutre.

Lors d'un essai de flexion, les contraintes sont déterminées par différentes méthodes d'analyse. Ajaz and Parry (1975b) présentent trois méthodes :

- la méthode directe,

- la méthode différentielle,

- la méthode de la flexion élastique.

Les deux premières méthodes permettent de déterminer les contraintes à partir du moment fléchissant et les déformations mesurées par la technique radiographique. Dans la troisième méthode, les contraintes et déformations sont calculées à partir du moment fléchissant et de la flèche de la poutre en utilisant la théorie de la flexion élastique.

Les distributions des contraintes et déformations sont données par les diagrammes représentés sur la figure I.72 (Ajaz and Parry, 1975b). Les contraintes au niveau de la fibre comprimée et la fibre tendue sont notées par σ^b_c et σ^b_t avec respectivement leurs déformations correspondantes ε^b_c et ε^b_t.

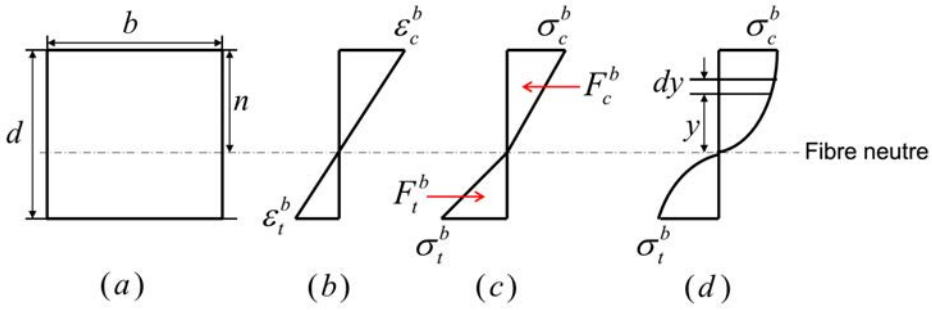


Figure I.72 : Diagrammes de distribution des contraintes et déformations dans un essai de flexion (d'après Ajaz and Parry, 1975b).

Les trois méthodes, proposées par Ajaz and Parry (1975b), permettant de déterminer les contraintes et les déformations durant un essai de flexion sont présentées ci-dessous en fonction des hypothèses posées.

a - Méthode directe :

La méthode suppose que les sections planes restent planes, la contrainte soit linéairement proportionnelle à la déformation et qu'il n'y a pas de fluage pendant la flexion. En revanche, la valeur du module de déformation en tension peut différer de celle en compression.

A l'équilibre statique de la poutre, les expressions des contraintes en compression et en traction deviennent :

$$\sigma_c^b = \frac{3M}{b.d^2}.\frac{\varepsilon_c^b + \varepsilon_t^b}{\varepsilon_c^b} \qquad [I.35]$$

$$\sigma_t^b = \frac{3M}{b.d^2}.\frac{\varepsilon_c^b + \varepsilon_t^b}{\varepsilon_t^b} \qquad [I.36]$$

Avec M le moment fléchissant. Les dimensions b et d représentent la largeur et la hauteur de la poutre respectivement (Fig. I.72 a).

b - Méthode différentielle :

La méthode ne suppose pas une relation privilégiée entre contrainte et déformation. Elle représente simplement la contrainte σ^b en fonction de la déformation ε^b sous la forme suivante :

$$\sigma^b = f(\varepsilon^b) \qquad [I.37]$$

Suivant les diagrammes de contraintes présentés sur la figure I.72, les expressions des forces de traction F^b_t et de compression F^b_c sont données par :

$$F_c^b = \int_0^n b.\sigma^b dy = \frac{b.n}{\varepsilon_c^b}\int_0^{\varepsilon_c^b} f(\varepsilon^b) d\varepsilon^b \qquad [I.38]$$

$$F_t^b = \int_{n-d}^{0} b.\sigma^b dy = \frac{b(d-n)}{\varepsilon_t^b} \int_{\varepsilon_t^b}^{0} f(\varepsilon^b) d\varepsilon^b \quad [I.39]$$

Avec $$n = \frac{\varepsilon_c^b}{\varepsilon_t^b + \varepsilon_c^b}.d \quad [I.40]$$

Le moment fléchissant M est défini à partir du produit de la force de compression F^b_c par le bras du moment d_m :

$$M = d_m . F_c^b = \frac{b.d^2}{(\varepsilon_t^b + \varepsilon_c^b)^2} \int_{\varepsilon_t^b}^{\varepsilon_c^b} f(\varepsilon^b) \varepsilon^b d\varepsilon^b \quad [I.41]$$

A partir du calcul intégral du moment fléchissant par rapport à $d\varepsilon^b$, les contraintes de traction σ^b_t et de compression σ^b_c sont déterminées par la résolution d'un système non linéaire avec deux équations différentielles :

$$\sigma_c^b = \frac{1}{\varepsilon_c^b + \varepsilon_t^b} . \frac{\delta}{\delta \varepsilon_c^b}(X) \quad [I.42]$$

$$\sigma_t^b = \frac{1}{\varepsilon_c^b + \varepsilon_t^b} . \frac{\delta}{\delta \varepsilon_t^b}(X) \quad [I.43]$$

Avec $$X = \frac{M.(\varepsilon_c^b + \varepsilon_t^b)^2}{b.d^2} \quad [I.44]$$

c - Méthode de la flexion élastique :

La méthode est basée sur les hypothèses citées précédemment; les sections planes restent planes après la flexion, la contrainte est proportionnelle à la déformation, il n'y a pas de fluage pendant la flexion et le module de Young du matériau étudié qui prend la même valeur en compression et en traction. Dans ce cas, les contraintes de traction et de compression au niveau des fibres extrêmes sont données par l'équation suivante :

$$\sigma_{c,t}^b = \frac{6M}{b.d^2} \quad [I.45]$$

Ajaz and Parry (1975b) ont conclu, après comparaison des trois méthodes, que la méthode basée sur la théorie de la flexion élastique et la méthode directe sont plus rapides, moins laborieuses et souvent utilisées pour l'analyse des contraintes dans les essais de flexion. La méthode différentielle quant à elle n'est pas basée sur une loi contrainte-déformation privilégiée.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tenté d'exposer les principales avancées de plusieurs études de la littérature ayant traité les diverses problématiques de notre recherche.

Les résultats présentés dans le ***premier volet*** de ce chapitre nous ont permis de souligner les conclusions suivantes :

- Définition des unités structurales et des propriétés globales des argiles en se focalisant sur celles qui concernent notre étude à savoir la kaolinite.

- L'analyse de la microstructure des argiles par différentes méthodes (observation au MEB, porosimétrie au Mercure PAM) nous a montré à quel point son apport peut être déterminant dans l'explication des phénomènes macroscopiques. Nous pouvons constater également que de plus en plus d'auteurs ont privilégié l'étude à l'échelle microscopique comme moyen permettant d'établir une corrélation entre la minéralogie du matériau et son comportement mécanique à l'instar de Hicher et al. (2000), Sivakumar et al. (2002) ou encore Bouziri (2007).

- Comprendre les mouvements de l'eau régissant le comportement du sol non saturé dont l'état de contrainte global a été établi clairement par Fredlund (1979). Par ailleurs, la courbe de rétention d'eau proposée par Indarto (1991) permet une bonne présentation des paramètres hydriques et une bonne compréhension du comportement du sol sur des chemins de séchage-humidification. En revanche, la comparaison faite entre les chemins normalement consolidés de dessiccation et isotropes (ou oedométriques) est limitée. Car, en effet, elle propose une corrélation mais uniquement lorsque le sol reste saturé. Cependant, sur un chemin de séchage et au-delà de la limite de retrait, les mécanismes restent complexes et nécessitent d'avantage d'investigation.

Dans le ***deuxième volet*** ce chapitre, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Comprendre comment s'opèrent les changements intervenant dans les propriétés élastiques du matériau induits par l'endommagement dû au chargement mécanique. En effet, les résultats de Hicher (1996) nous ont montré que les variations du niveau de contrainte effective et de l'indice des vides pouvaient influencer le module élastique sur chemin triaxial.

- Prendre connaissance des différentes méthodes dynamiques de caractérisation des propriétés élastiques du matériau endommagé. En revanche, plusieurs travaux ont soit développé soit amélioré les dispositifs d'essais mécaniques en les équipant de capteurs ultrasons. L'enjeu pour nous est d'apporter une nouvelle démarche expérimentale permettant de caractériser les propriétés élastiques par un système simple permettant de bien contrôler les paramètres de mesure.

Les questions qui de notre point de vue restent ouvertes sont :

1- Comment évoluent les paramètres élastiques du matériau qui s'endommage et quelle est l'influence du niveau et des chemins de contrainte ?

2- Quelle est l'influence de la surconsolidation ?

Le ***troisième volet*** concernant l'endommagement et la fissuration des argiles sous différents types de chargement (mécanique ou hydrique) nous a permis de :

- Comprendre que le phénomène de localisation des déformations observé par Raynaud et al. (2008) sur chemin triaxial peut affecter les propriétés élastiques du matériau endommagé. En effet, les travaux de Hall et al. (2007) nous ont montré que la déformation localisée et l'anisotropie induite sont à l'origine des variations de vitesses d'onde ultrasonore permettant de déduire le module élastique dynamique.

- Analyser la fissuration par dessiccation et les différents critères de rupture du sol soumis à une tension.

- Repérer l'importance des essais de traction indirecte afin de comprendre et tenter d'expliquer l'apparition de la fissuration due à la dessiccation. Plusieurs auteurs s'y sont intéressés en adoptant différentes approches notamment la traction par flexion. Cela permettra d'identifier la résistance admissible du sol à la traction au-delà de laquelle il serait susceptible de se fissurer. Mais est-ce suffisant ? Nous allons pousser l'investigation et tenter de caractériser une déformation critique à partir de laquelle l'amorçage de la fissuration se produit.

Chapitre II

Propriétés du matériau et techniques expérimentales

Chapitre II. Propriétés du matériau et techniques expérimentales

Sommaire :

Introduction……..106

II.1. Propriétés physiques du matériau et préparation d'éprouvettes consolidées……107

II.1.1. Kaolin K13 - propriétés minéralogiques……107

II.1.2. Confection des éprouvettes consolidées……...108

II.2. Propriétés mécaniques de l'argile identifiées sous chargement oedométrique…110

II.2.1. Conditions d'essai……110

II.2.2. Comportement sous chargement oedométrique……111

II.3. Essai ultrason……..115

II.3.1. Mesure de vitesse d'onde par propagation ultrasonore……...115

II.3.2. Validation du système et confrontation aux résultats des essais oedométriques……..122

II.4. Chargement triaxial……131

II.4.1. Système expérimental et mise en place de l'échantillon……131

II.4.2. Phases d'essai……...133

II.5. Mesure du champ des déplacements de l'argile au cours de son séchage par la méthode de corrélation d'images numériques……...139

II.5.1. Techniques de dessiccation……139

II.5.2. Méthode de corrélation d'images numériques……148

II.5.3. Validation……150

II.6. Essai de traction indirecte par flexion……...155

II.6.1. Dispositif expérimental et principe de fonctionnement……155

II.6.2. Préparation des échantillons……...156

II.6.3. Calibration du capteur de force……...159

Conclusion……161

Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des propriétés du matériau utilisé (propriétés minéralogiques et mécaniques, en particulier le comportement à l'oedomètre), ainsi qu'à la description des différents systèmes expérimentaux et des méthodes de mesure.

Quatre systèmes expérimentaux ont été utilisés dans cette étude permettant de focaliser sur un aspect particulier du comportement des argiles :

→ Essai de propagation d'ondes ultrasonores :

L'essai permet d'identifier les propriétés élastiques du sol se trouvant préalablement sous chargement mécanique.

Le dispositif expérimental, développé au laboratoire dans le cadre de la thèse, a d'abord été validé par des mesures ultrasons effectuées sur des échantillons consolidés sous chargement oedométrique. Des mesures ont ensuite été effectuées sur des échantillons ayant été soumis à des chargements triaxiaux complexes.

→ Essais triaxiaux :

Les essais triaxiaux ont été réalisés permettant de caractériser dans un premier temps le comportement mécanique de l'argile, puis, dans un deuxième temps, préparer les éprouvettes à l'essai de propagation ultrasonore.

→ Essai de dessiccation et méthode de mesure par corrélation d'images numériques :

Deux parties seront traitées dans cette section. La première consiste à décrire les essais de dessiccation, ainsi que la préparation des échantillons pour les essais de corrélation d'images numériques (CIN). La seconde partie consiste à présenter la méthode de mesure par CIN qui apparaît particulièrement efficace pour prédire la fissuration par séchage de l'argile. Cette deuxième partie porte donc sur :

- le montage expérimental adapté à la technique de CIN,
- le logiciel de corrélation (Vic2D),
- le choix des paramètres de corrélation,
- les essais réalisés pour la calibration du système.

→ Essai de flexion sur poutrelles d'argile sous succion :

La dernière partie de ce chapitre présente un dispositif de flexion réalisé au laboratoire spécialement conçu pour l'étude d'une rupture par flexion de poutrelles d'argile en fonction de la succion. La préparation d'échantillon et le conditionnement des poutrelles (succion initiale) sont introduits dans cette partie.

II.1. Propriétés physiques du matériau et préparation d'éprouvettes consolidées

II.1.1. Kaolin K13 - propriétés minéralogiques

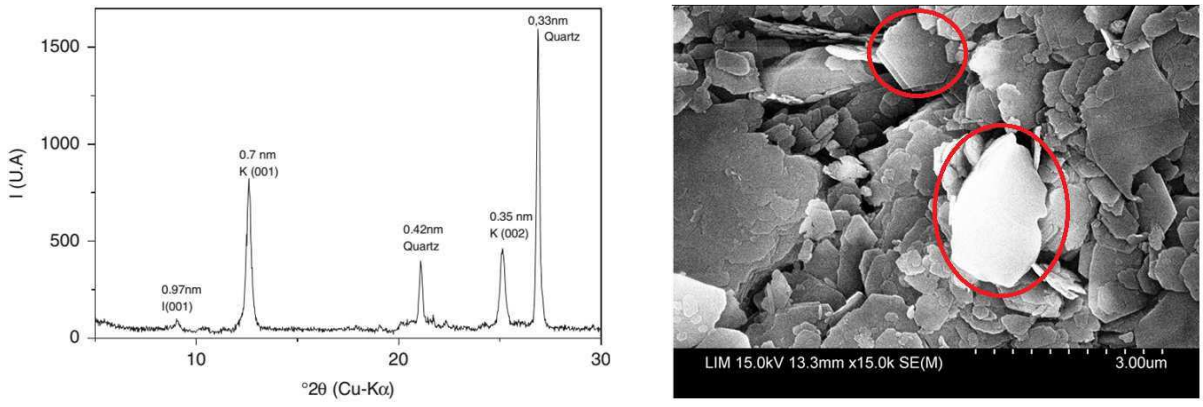
Le matériau étudié est un kaolin commercialisé sous la référence « Kaolin K13 » par *Sibelco* (Paris, France). Cette argile industrielle, fournie sous forme de poudre déshydratée, est très proche de la « kaolinite P300 », plus connue, commercialisée par *Dousselin* (Rhône, France) et qu'on retrouve dans la littérature (voir par exemple Wahyudi, 1991; Hattab, 1994).

Une identification expérimentale a été réalisée afin de déterminer les propriétés physiques du Kaolin K13. Les valeurs moyennes mesurées sont confrontées avec celles obtenues par Hammad (2010) sur la kaolinite P300 dans le tableau II.1.

Tableau II.1 : Propriétés physiques du Kaolin K13 et de la kaolinite P300.

Propriétés physiques	Limite de liquidité w_L (%)	Limite de plasticité w_P (%)	Indice de plasticité $I_p = w_L - w_P$ (%)	Densité de grains solides ρ_s (cm²/s)
Kaolinite P300 (Hammad, 2010)	40	21	19	2.65
Kaolin K13	41.6	21.2	20.4	2.63

Ces résultats permettent d'observer des propriétés physiques très proches entre le Kaolin K13 et la kaolinite P300. Ainsi, nous considérons dans la suite de l'étude que les résultats expérimentaux cités dans la littérature pour la kaolinite P300 sont valables pour le Kaolin K13.



(a) (b)

Figure II.1 : Composition minéralogique de la kaolinite P300 : (a) analyse par diffraction des rayons X (Hattab et al., 2010), (b) photo au MEB (Hammad, 2010).

Les résultats de l'analyse par diffraction de rayons X, réalisée sur la Kaolinite P300 (Hattab et al., 2010), sont présentés sur la figure II.1 (a). Elle montre que le matériau est composé principalement de particules de kaolinite (~96%), des traces d'illite (~2-3%) et une faible quantité de quartz (<1%).

Dans sa thèse de doctorat, Hammad (2010) a effectué des observations au microscope électronique à balayage (MEB) de la Kaolinite P300. Les photos au MEB obtenues (Fig. II.1 b) sont assez concordantes avec les résultats d'analyse par diffraction aux rayons X. Elles montrent que l'argile est composée de particules de kaolinite (indiquées par des cercles rouges sur la figure II.1b), présentées comme des plaquettes rigides hexagonales constituées d'un ensemble de feuillets superposés.

II.1.2. Confection des éprouvettes consolidées

La préparation des éprouvettes à partir du kaolin K13 en poudre déshydratée, se déroule en quatre phases :

1- Fabrication de la boue : le mélange "argile poudre + eau" est réalisé avec une teneur en eau égale à 1.5 fois la limite de liquidité de la kaolinite ($w_0 = 1.5w_L$). Il est ensuite introduit dans un malaxeur (de marque Controlab L0031.1) tournant à une vitesse de 280 tr/min, pendant 15 minutes. Une boue homogène dont l'aspect est représenté en figure II.2 (b) est obtenue.

2- Repos de la boue : pour une meilleure homogénéité de la teneur en eau, la boue obtenue est isolée et laissée à température ambiante pendant 24 heures (Fig. II.2 c).

Figure II.2 : Préparation de la boue : (a) poudre déshydratée, (b) boue d'argile et (c) conditionnement.

3- La boue est introduite dans un consolidomètre à double drainage pour y être progressivement consolidée, d'une manière unidimensionnelle, jusqu'à une contrainte finale de 120 kPa. Le principe de ce dispositif est d'appliquer, au moyen d'un piston, une succession de charges croissantes toutes les 24h. Pour atteindre le dernier palier, 3 semaines au minimum sont nécessaires pour assurer la consolidation. Un schéma de principe du consolidomètre utilisé (monté au laboratoire dans le cadre de cette étude) est représenté sur la figure II.3.

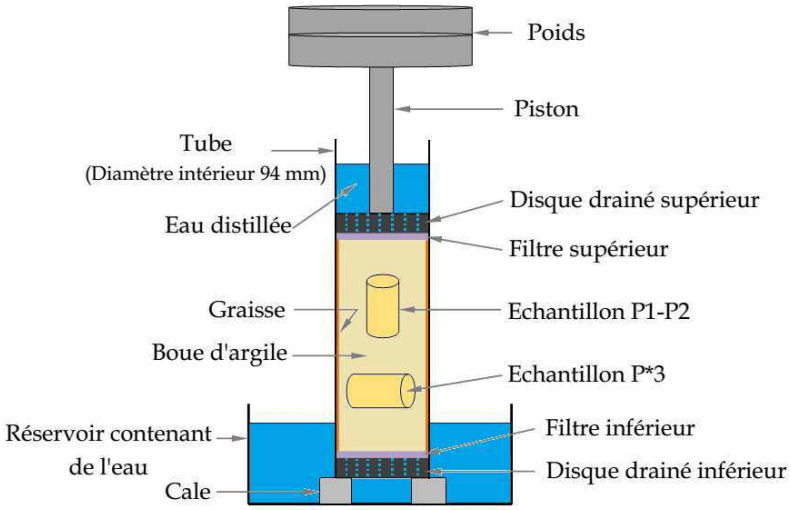


Figure II.3 : Représentation schématique du consolidomètre.

4- Après consolidation de la boue, le matériau se présente sous la forme d'une carotte d'argile. Une grande éprouvette peut être découpée et placée dans un tourneur (Fig. II.4 a) pour confectionner des éprouvettes parfaitement cylindriques avec un diamètre ϕ = 50 mm et une hauteur h = 75 mm (Fig. II.4 b).

(a) (b)

Figure II.4 : Confection des éprouvettes d'argile consolidée au consolidomètre: (a) Tourneur de découpe, (b) éprouvette cylindrique découpée.

La découpe des grandes éprouvettes dans le consolidomètre peut se faire soit dans le sens vertical (sens de la contrainte verticale de chargement σ'_v, P1 et P2 sur la figure II.3), soit dans le sens horizontale (sens perpendiculaire à σ'_v, P*3 sur la figure II.3).

II.2. Propriétés mécaniques de l'argile identifiées sous chargement oedométrique

II.2.1. Conditions d'essai

Des séries d'essais oedométriques, décrites ci-dessous, ont été réalisées pour deux états initiaux du matériau, argile en boue et argile préconsolidée. Dans l'argile préconsolidée dans le consolidomètre, deux types d'échantillons ont été testés, des échantillons découpés dans le sens vertical, et des échantillons découpés dans le sens horizontal (Figure II.3) :

- *Set 1* : sur des échantillons d'argile préconsolidée de type P1 (découpée dans le sens vertical);

- *Set 2* : sur des échantillons d'argile préconsolidée de type P2 (découpée dans le sens vertical);

- *Set*3* : sur des échantillons d'argile préconsolidée de type P*3 (découpée dans le sens horizontal);

- *Set 4* : à partir de la boue d'argile préparée à une teneur en eau $w = 1.5\ w_L$.

Le programme des essais est décrit dans le tableau II.2 où sont reportés l'état initial des échantillons pour l'essai, la contrainte verticale appliquée (σ'_v) ainsi que les indices des vides à l'état initial après consolidation unidimensionnelle (noté e_{00}) et à l'état final après déchargement oedométrique.

La nomenclature proposée tient compte de la *série d'essai oedométrique* et de la *valeur de* σ'_v.

Tableau II.2 : Propriétés des essais oedométriques.

Echantillons			σ'_v (MPa)	e_{00} Indice des vides initial	e Indice des vides de déchargement
Noms		Etat initial			
Set 1	Set1_1MPa	Argile préconsolidée σ'_{v0} = 120 kPa	1	0.85	0.593
	Set1_3MPa		3	0.86	0.464
	Set1_5MPa		5	0.83	0.421
	Set1_7MPa		7	0.89	0.403
Set 2	Set2_1MPa		1	0.89	0.701
	Set2_3MPa		3	0.95	0.520
	Set2_5MPa		5	0.92	0.468
	Set2_7MPa		7	0.93	0.457
Set 3* 3*	Set*3_1MPa		1	0.87	0.616
	Set*3_3MPa		3	0.89	0.538
	Set*3_5MPa		5	0,89	0.421
	Set*3_7MPa		7	0.89	0.362
Set 4	Set4_1MPa	Boue d'argile	1	1.59	1.261
	Set4_3MPa		3	1.59	0.973
	Set4_5MPa		5	1.59	0.926
	Set4_7MPa		7	1.59	0.812

II.2.2. Comportement sous chargement oedométrique

Pour l'ensemble des essais réalisés, l'application de chaque palier de chargement a été maintenue pendant 24 heures (temps suffisant pour la consolidation primaire et la valeur de t_{100}). Le cas de l'essai *Set1_5MPa* est proposé comme exemple pour présenter les résultats de variations du tassement Δh en fonction du temps (figure II.5). La stabilisation est obtenue à la fin de chaque palier.

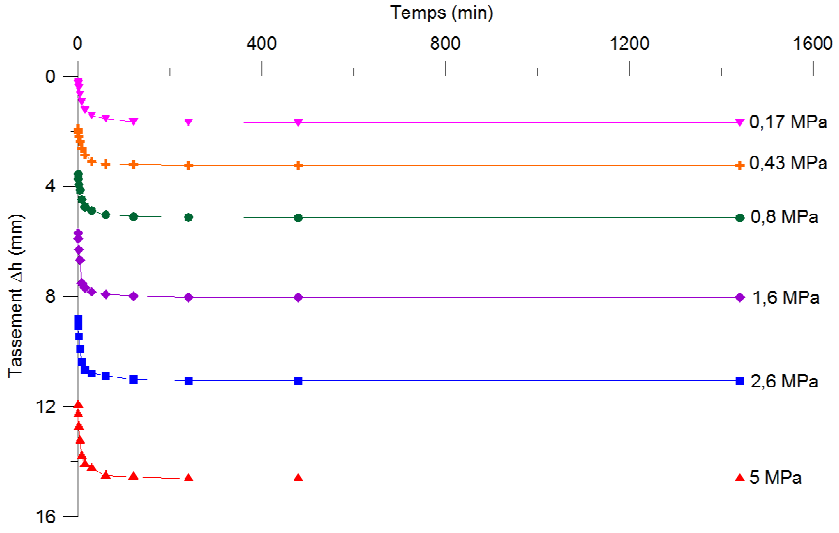


Figure II.5 : Variations du tassement en fonction du temps - Essai Set1_5MPa.

Afin de déterminer le temps de consolidation primaire t_{100}, nous avons utilisé la méthode de Casagrande qui consiste à tracer le tassement en fonction du logarithme du temps. Nous l'avons appliquée sur le dernier palier de l'essai *Set1_5MPa* et les variations ainsi obtenues sont rapportées sur la figure II.6. Le temps correspondant à la fin de la consolidation primaire est t_{100} = 70 min pour le Kaolin K13.

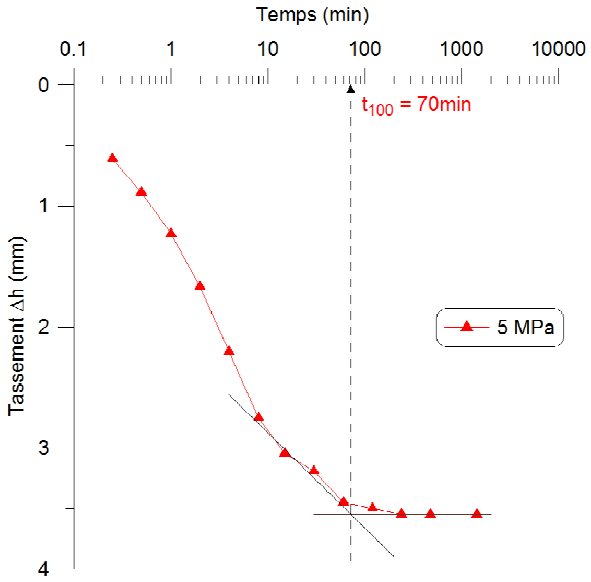


Figure II.6 : Détermination de t_{100} par construction graphique (méthode de Casagrande) pour le palier σ'_v=5MPa de l'essai Set1_5MPa.

La figure II.7 montre l'évolution de l'indice des vides en fonction de la contrainte verticale effective dans les deux séries *Set 2* et *Set*3*. Les essais de la série *Set 2,* dont les échantillons ont été découpés suivant le sens vertical, réalisés à différents niveaux de contrainte, sont cohérents et permettent l'identification d'un indice de compression Cc = 0.29 et d'un indice de gonflement Cs = 0.05. Ces valeurs sont équivalentes à celles obtenues dans la littérature pour la kaolinite P300 (Hammad, 2010).

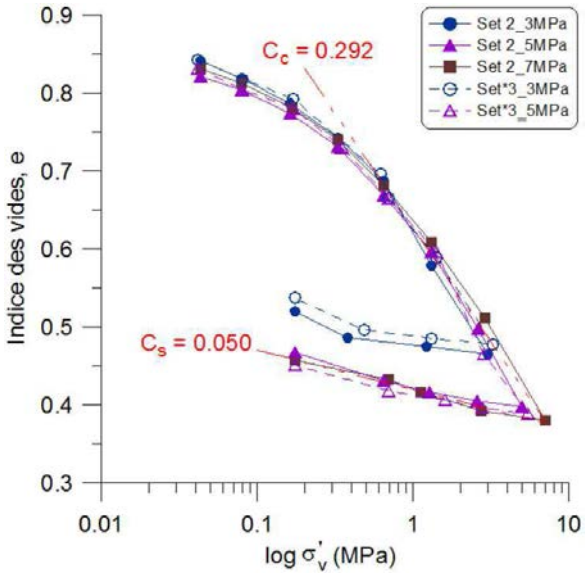


Figure II.7 : Variations d'indice des vides en fonction de la contrainte verticale effective et effet de l'anisotropie initiale.

Les essais de la série *Set*3* (Fig. II.7) réalisés sur les échantillons découpés dans le sens horizontal de la carotte, enregistrent des déformations supérieures comparées à celles obtenues dans la série *Set 2*.

Pour les deux séries *Set 1* et *Set 4*, nous avons tracé les courbes oedométriques exprimées par les variations de la déformation axiale ε_1 en fonction de la contrainte verticale effective (Fig. II.8). Cette représentation permet de déduire un module oedométrique E_{oed} en particulier celui mobilisé à la fin du déchargement qui va intéresser notre étude.

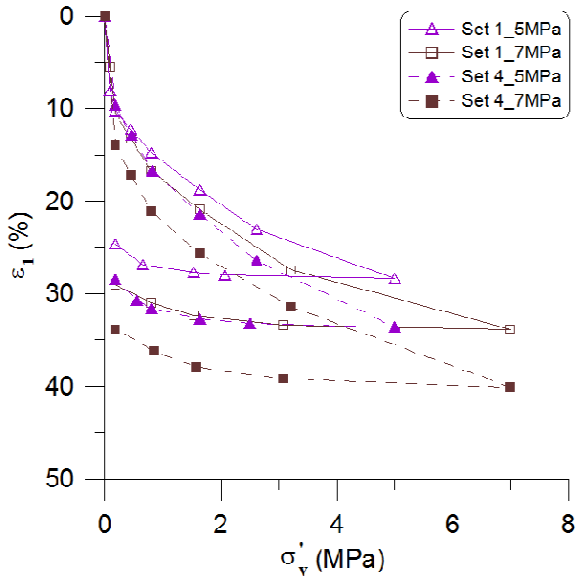


Figure II.8 : Courbes oedométriques (ε_1 - σ'_v) dans les deux séries *Set 1* et *Set 4*.

E_{oed} peut être assimilé au module statique que l'on notera E_{stat}, équivalent au module d'Young :

$$E_{oed} = \frac{\Delta\sigma'_v}{\Delta\varepsilon_1} = E_{stat}\frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} \qquad [II.1]$$

Le coefficient de Poisson ν étant difficile à mesurer avec le dispositif oedométrique utilisé. Il varie de 0.28 à 0.38 dans les sols argileux remaniés consolidés en condition drainée. Nous faisons le choix d'adopter l'approche empirique proposée par Costet et Sanglerat (1983) pour estimer le coefficient de Poisson à partir du coefficient des terres au repos (K_0).

$$\nu = \frac{K_0}{(1+K_0)} \qquad [II.2]$$

$K_0 \approx 0.62$ est calculé en fonction de l'angle de frottement φ' de la kaolinite (obtenu par les essais triaxiaux, $\varphi' = 22°$) par la formule de Jacky (Eq. II.3). Ainsi, ν sera pris égal à 0.38.

$$K_0 = 1 - \sin\varphi \qquad [II.3]$$

La figure II.9 représente les variations du module statique en fonction de l'indice des vides lors du déchargement oedométrique pour l'ensemble des séries.

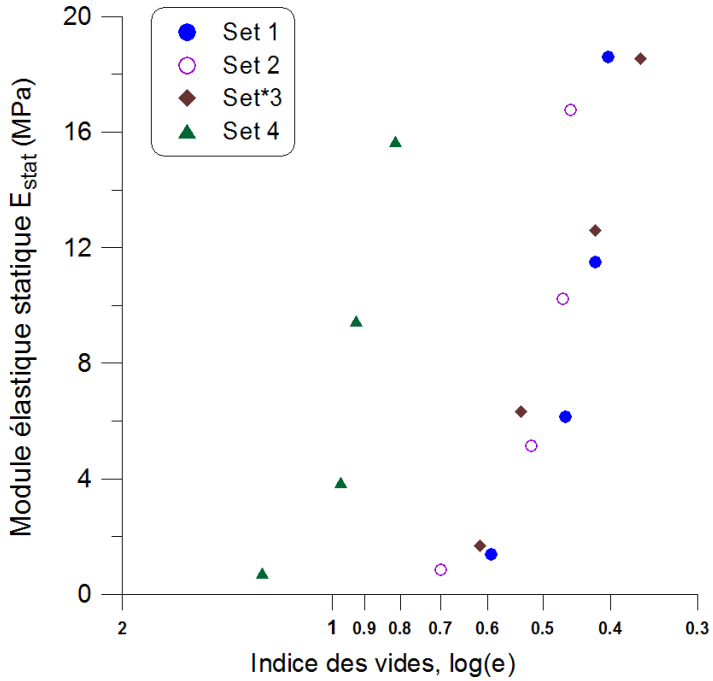


Figure II.9 : Evolution du module élastique statique en fonction de l'indice des vides en déchargement oedométrique

Ces résultats montrent une évolution significative du module élastique statique avec la dimunition de l'indice des vides caractéristique du niveau de chargement vertical appliqué. La variation du module élastique statique (E_{stat}) pour les séries *Set 1*, *Set 2* et *Set*3* est similaire. Concernant la série *Set 4*, l'évolution E_{stat} suit la même évolution, cependant, un décalage est observé sur l'axe d'indice des vides (log e). Les conditions intiales de l'essai (argile boue) imposant un indice des vides intial plus élevé (e_{00} = 1.59) peut expliquer ce décalage.

II.3. Essai ultrason

La caractérisation des propriétés élastiques d'un matériau par propagation d'ondes ultrasonores se base sur les méthodes acoustiques présentées dans le chapitre I. Dans cette étude, nous avons choisi d'utiliser une méthode d'insertion-substitution pour mesurer les vitesses d'onde ultrasonore indépendamment du couplant entre le transducteur et l'échantillon d'étude. Le choix d'une mesure post chargement et déchargement mécanique a été opéré.

Pour conserver les éprouvettes à la fin des essais mécaniques, elles sont conservées et isolées dans la paraffine. Au moment de réaliser les essais ultrasons, les échantillons sont découpés à partir de ces éprouvettes dont les dimensions sont prédéfinies.

Nous présentons dans cette partie le principe de mesure de la vitesse d'onde et le dispositif expérimental qui a été spécialement conçu et utilisé au laboratoire dans le cadre de cette thèse. Les résultats et les conclusions de la validation faite par confrontation aux résultats des essais oedométriques seront également présentés dans cette partie.

II.3.1. Mesure de vitesse d'onde par propagation ultrasonore

II.3.1.1 Eléments théoriques de la méthode

La méthode d'insertion-substitution permet de mesurer la vitesse d'onde de compression V_p uniquement propagée à travers l'échantillon. Elle est basée sur la mesure du temps de vol parcouru par l'onde à travers le matériau. Un schéma de principe est représenté sur la figure II.10. Le matériau étudié (échantillon avec une épaisseur d) est placé à deux distances L_1 et L_2 entre deux transducteurs, respectivement, émetteur-récepteur.

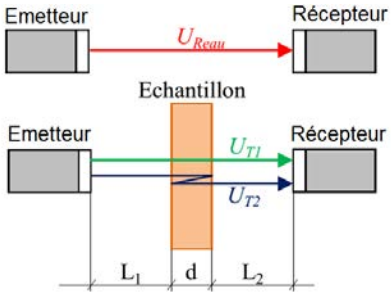


Figure II.10 : Schéma de principe de la méthode d'insertion-substitution.

La méthode de mesure s'effectue en deux temps :

- Une première mesure de référence est effectuée dans l'eau uniquement. Elle est caractérisée par l'onde ultrasonore transmise dans l'eau et noté U_{Reau}.

- La deuxième mesure est réalisée après la mise en place de l'échantillon. Le signal ultrasonore reçu à la surface du transducteur reçoit les deux premiers échos U_{T1} et U_{T2} qui ont respectivement effectué un aller et un aller-retour-aller à travers l'échantillon (Fig. II.10). La figure II.11 présente un exemple de signal temporel des échos ultrasonores

correspondant à une mesure effectuée sur un échantillon provenant de l'essai oedométrique référencié Set1_5MPa (tableau II.2). Dans ce cas, le signal transmis dans l'échantillon enregistre une amplitude plus faible comparée à celle du signal de référence. Cette baisse est due notamment à l'atténuation de l'onde ultrasonore dans l'argile qui est plus forte que celle de l'eau.

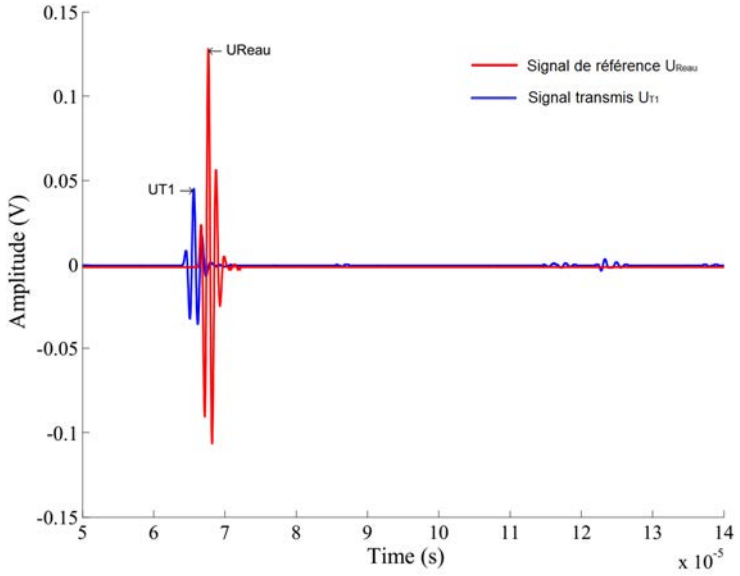


Figure II.11 : Signaux temporels de référence dans l'eau et transmis à travers l'échantillon Set1_5MPa (Tableau. II.2).

Afin de déterminer l'expression de la vitesse d'onde de compression V_p, le temps de vol est enregistré au niveau du pic maximum de la transformée d'Hilbert du signal. Seuls les spectres U_{Reau} et U_{T1} sont exploités et dont les équations sont les suivantes :

$$U_{Reau} = A_E(\omega)\, e^{(-\alpha_{eau} - jk_{eau})(L_1 + d + L_2)}\, A_R(\omega) \qquad [II.4]$$

$$U_{T1} = A_E(\omega)\, e^{(-\alpha_{eau} - jk_{eau})L_1}\, T_{eau\text{-}éch}\, e^{(-\alpha_{éch} - jk_{éch})d}\, T_{éch\text{-}eau}\, e^{(-\alpha_{eau} - jk_{eau})L_2}\, A_R(\omega) \qquad [II.5]$$

Les différents paramètres définissant ces deux équations sont détaillés dans le tableau II.3 dans les deux milieux : l'eau et l'échantillon d'argile.

Tableau II.3 : Paramètres définissant les équations [II.4] et [II.5].

Paramètres	Eau	Echantillon
Atténuation (Np/m)	α_{eau}	$\alpha_{éch}$
Vitesse d'onde (m/s)	V_{eau}	V_p
Pulsation de l'onde (rad/s)	$\omega = 2\pi f$	
Nombre d'onde (rad/m)	$k_{eau} = \omega/V_{eau}$	$k_{éch} = \omega/V_p$
$A_E(\omega)$ et $A_R(\omega)$	Réponses en fréquence, respectivement, des transducteurs d'émission et de réception	
$T_{eau\text{-}éch}$ et $T_{éch\text{-}eau}$	Coefficients de transmission en amplitude pour les interfaces séparant, respectivement, l'eau de l'échantillon et l'échantillon de l'eau	

Le rapport de l'impulsion transmise (U_{T1}) sur l'impulsion de référence (U_{Reau}) peut s'écrire comme suit :

$$\frac{U_{T1}}{U_{Reau}} = T_{eau\text{-}éch}\, T_{éch\text{-}eau}\, e^{(-\alpha_{éch}+\alpha_{eau}-jk_{éch}+jk_{eau})d} = Ae^{j\Delta\phi} \qquad [II.6]$$

Où A et $\Delta\phi$ sont respectivement les parties réelle et imaginaire du rapport U_{T1}/U_{Reau} qui permettent de déterminer l'atténuation $\alpha_{éch}$ et la vitesse de phase V_p dont les expressions sont les suivantes :

$$\alpha_{éch} = \alpha_{eau} - \frac{1}{d}\ln\left(\frac{A}{T_{eau\text{-}éch}\, T_{éch\text{-}eau}}\right) \qquad [II.7]$$

$$V_P = \frac{1}{\frac{1}{V_{eau}} - \frac{\Delta\phi}{\omega . d}} \qquad [II.8]$$

Dans notre cas, les propriétés élastiques de l'argile sont basées sur la détermination de la vitesse d'onde V_p (Eq. II.7).

II.3.1.2 Méthode de découpe des échantillons d'essai

1/ Pour le kaolin K13 :

A la fin de l'essai oedométrique, les échantillons sont retirés de la cellule et récupérés pour être de nouveau découpés en de petits échantillons parallélépipédiques destinés à l'essai ultrasonore. Le schéma de découpe des petits échantillons est présenté sur la figure II.12.

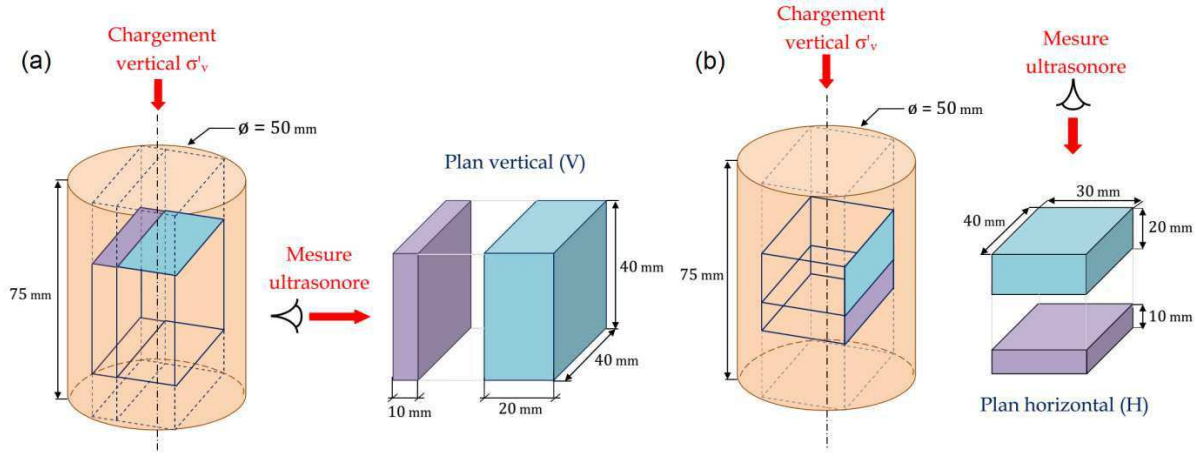


Figure II.12 : Processus de découpe des échantillons d'argile pour la mesure ultrasonore : (a) plan vertical "V", (b) plan horizontal "H".

Cette méthode permet de mesurer les caractéristiques élastiques suivant deux axes de propagation d'onde, un axe perpendiculaire à la direction du chargement oedométrique (contrainte verticale σ_v, Fig. II.12a), et un axe parallèle à σ_v (Fig. II.12b).

Les petits échantillons sont tous de dimensions 40×30×d, (en mm). La sensibilité de l'épaisseur des échantillons sur les résultats a été testée en considérant deux valeurs de d (d= 10 mm et d=20mm).

Le tableau II.4 présente la nomenclature des petits échantillons découpés dédiés aux mesures ultrasons. Ils sont regroupés sous différentes séries nommées *Set1*$_V$, *Set2*$_H$, *Set*3*$_V$, *Set*3*$_H$ et *Set4*$_V$ où les indices V et H indiquent respectivement les plans vertical et horizontal étudiés. Nous avons également reporté dans le tableau II.4 les essais oedométriques correspondant à chaque petit échantillon découpé ainsi que l'indice des vides de déchargement associé.

Tableau II.4 : Nomenclature des échantillons découpés pour les mesures ultrasonores.

Echantillons découpés		Essai oedométrique correspondant	e Indice des vides de déchargement
Séries	Noms		
Set 1$_V$	US1_Set1$_V$	Set1_1MPa	0.593
	US3_Set1$_V$	Set1_3MPa	0.464
	US5_Set1$_V$	Set1_5MPa	0.421
	US7_Set1$_V$	Set1_7MPa	0.403
Set 2$_H$	US1_Set2$_H$	Set2_1MPa	0.701
	US3_Set2$_H$	Set2_3MPa	0.520
	US5_Set2$_H$	Set2_5MPa	0.468
	US7_Set2$_H$	Set2_7MPa	0.457
Set 3*$_H$	US1_Set*3$_H$	Set*3_1MPa	0.616
	US3_Set*3$_H$	Set*3_3MPa	0.538
	US5_Set*3$_H$	Set*3_5MPa	0.421
	US7_Set*3$_H$	Set*3_7MPa	0.362
Set 3*$_V$	US1_Set*3$_V$	Set*3_1MPa	0.616
	US3_Set*3$_V$	Set*3_3MPa	0.538
	US5_Set*3$_V$	Set*3_5MPa	0.421
	US7_Set*3$_V$	Set*3_7MPa	0.362
Set 4	US1_Set4$_V$	Set4_1MPa	1.261
	US3_Set4$_V$	Set4_3MPa	0.973
	US5_Set4$_V$	Set4_5MPa	0.926
	US7_Set4$_V$	Set4_7MPa	0.812

2/ Pour les argilites de Bure :

Les essais ultrasonores sur les argilites de Bure permettent de confronter les résultats de mesure de notre dispositif expérimental aux résultats de la litérature, en particuliers ceux obtenus à partir d'essais par propagation d'ondes.

Les caractéristiques mécaniques et minéralogiques des argilites de Bure sont résumées dans le tableau II.5. Il s'agit de valeurs moyennes citées dans Gasc-Barbier (2002) et concernent la partie du Callovo-Oxfordien entre 422 et 527 m de profondeur.

Tableau II.5 : Quelques caractéristiques mécaniques et minéralogiques des argilites de Bure (Gasc-Barbier, 2002).

Caractéristiques		**Valeurs moyennes sur le Callovo-Oxfordien (422 - 527 m)**
Minéralogiques	Argiles	25 - 55 %
	Quartz	15 - 30 %
	Carbonates	17 - 53 %
	Autres constituants (pyrite, mica, dolomie, halite, gypse)	< 10 %
	Nature des argiles	Interstratifiés illite / smectites (50 - 80%), chlorite, illite, kaolinite
Mécaniques	Coefficient de Poisson	0.17 - 0.4
	Résistance uniaxiale à la compression (MPa)	19 - 48.8
	Résistance uniaxiale à la traction (MPa)	0.9 - 5.4

Les petits échantillons pour les essais ultrasonores sont ici découpés d'une éprouvette venant du laboratoire souterrain de l'ANDRA à Bure. L'éprouvette elle même provient d'une carotte extraite à 550 m dans la couche Callovo-Oxfordien, dont les propriétés sont présentées dans le Tableau II.5. L'éprouvette a été prélevée in-situ suivant le sens de la contrainte principale mineure σ_h = 12 MPa, et parallèle à la stratification comme le montre la figure II.13.

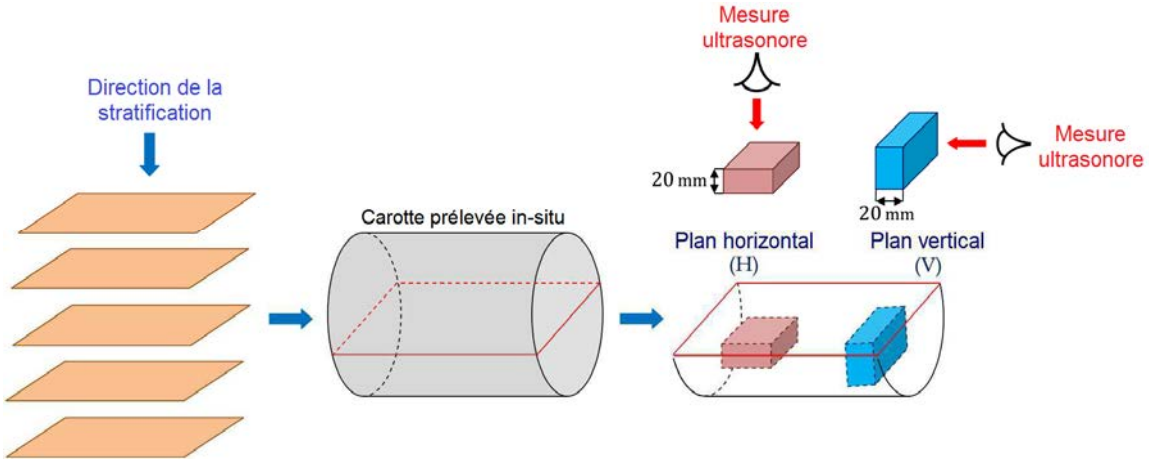


Figure II.13 : Schéma de découpe des échantillons d'Argilite de Bure.

Le principe de découpe des petits échantillons (30×30×20 mm^3) est similaire à celui adopté pour le kaolin K13. Ceux-ci permettent, comme le montre la figure II.13, de réaliser des

essais avec propagation d'ondes suivant deux axes possibles : le premier perpendiculaire aux strates et le second parallèle aux strates. In-situ, l'éprouvette a été sous un état de contrainte tel que σ_v= 12MPa (dans la direction perpendiculaire aux strates), σ_h= 12 MPa et σ_H= 15.6 MPa.

II.3.1.3 Dispositif expérimental

Le programme expérimental a necessité la conception et la réalisation au laboratoire d'un dispositif expérimental adapté à la méthode d'insertion-substitution (Fig. II.14). Le système est composé principalement d'un couple de transducteurs d'émission et de réception, de type *Olympus*, ayant un diamètre actif de 15 mm et une fréquence de sollicitation pouvant être variable.

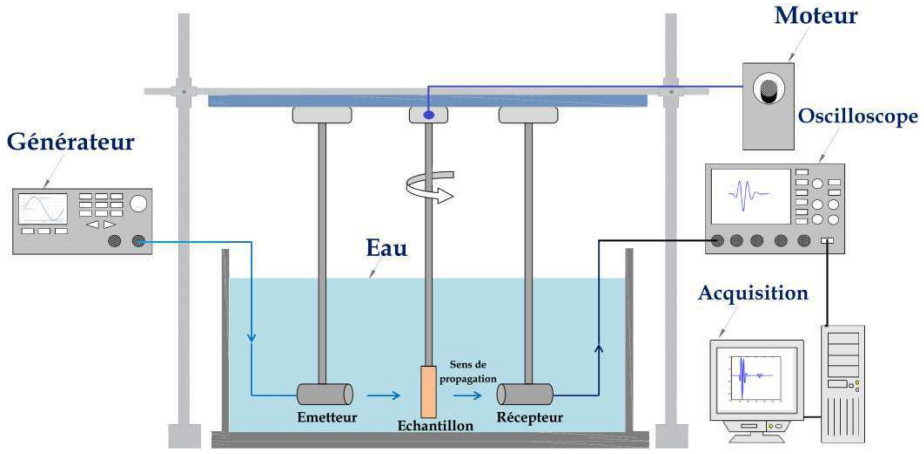


Figure II.14 : Dispositif expérimental de mesure de la vitesse d'onde de compression.

Les éléments constituant le dispositif expérimental sont présentés dans le tableau II.6.

Tableau II.6 : Composition du dispositif expérimental (Fig. II.14).

Eléments	
Générateur (Agilent 33500B Series)	Moteur de pilotage
Oscilloscope (Lecroy wavesurfer 314A)	Cuve remplie d'eau
Transducteur émetteur (Olympus)	Deux porteurs de transducteurs
Transducteur récepteur (Olympus)	Porteur d'échantillon
Ordinateur (traitement de signal)	Portique de mise en service

II.3.1.4 Principe de l'essai ultrason

Le générateur sollicite le transducteur émetteur, ce qui permet la propagation d'une onde ultraonore monofréquentiel à travers l'échantillon pour atteindre la surface du transducteur récepteur.

L'acquisition du signal est ensuite effectuée à l'aide d'un oscilloscope relié à un ordinateur pour le traitement de l'onde acoustique reçue.

La surface totale traitée de l'échantillon, représentée sur le schéma de la figure II.15, est égale à 175 mm². Le transducteur plan permet une mesure moyennée de la vitesse d'onde sur la surface traitée.

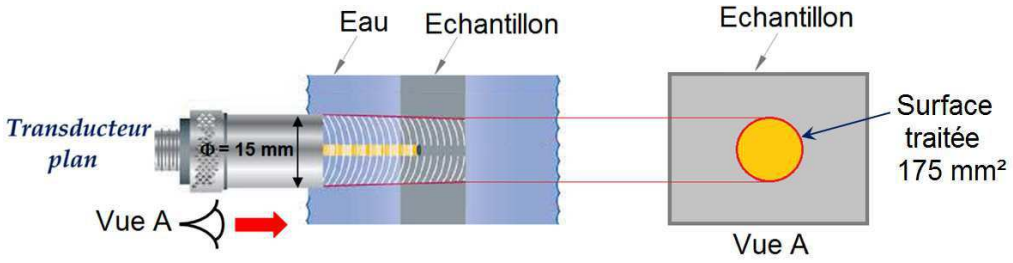


Figure II.15 : Schéma de principe définissant la surface traitée de l'échantillon.

L'échantillon, inséré dans une membrane très fine en latex (quelques microns d'épaisseur) est immergé dans l'eau (Fig. II.14). Il est, ainsi placé entre les deux transducteurs émetteur et récepteur dans un bras télécommandé pouvant s'adapter à différentes dimensions. La membrane sert à isoler l'échantillon sans affecter la mesure car elle est acoustiquement transparente.

II.3.1.5 Vérification de la transparence acoustique de la membrane

La membrane acoustiquement transparente a été démontrée à partir des mesures ultrasonores réalisées dans le dispositif de la figure II.14. La première étape consiste à considérer la propagation d'onde dans l'eau uniquement, puis à traves la membrane immergée et remplie d'eau. De cette façon, l'eau à l'intérieure de la membrane a remplacé l'échantillon (Fig. II.16).

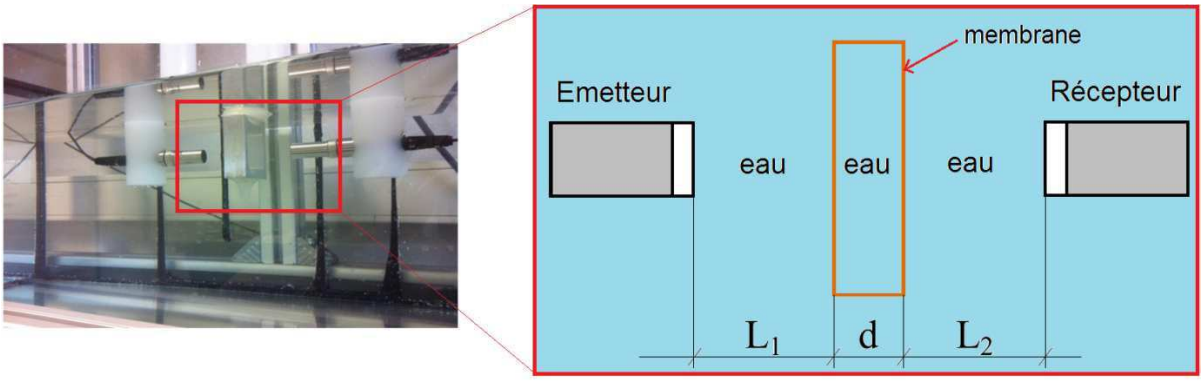


Figure II.16 : Mesure de vérification de la transparence de la membrane utilisée.

Traitement des résultats :

Les signaux temporels obtenus par les deux mesures ont été traités, et les premiers échos sont représentés dans le même plan sur la figure II.17.

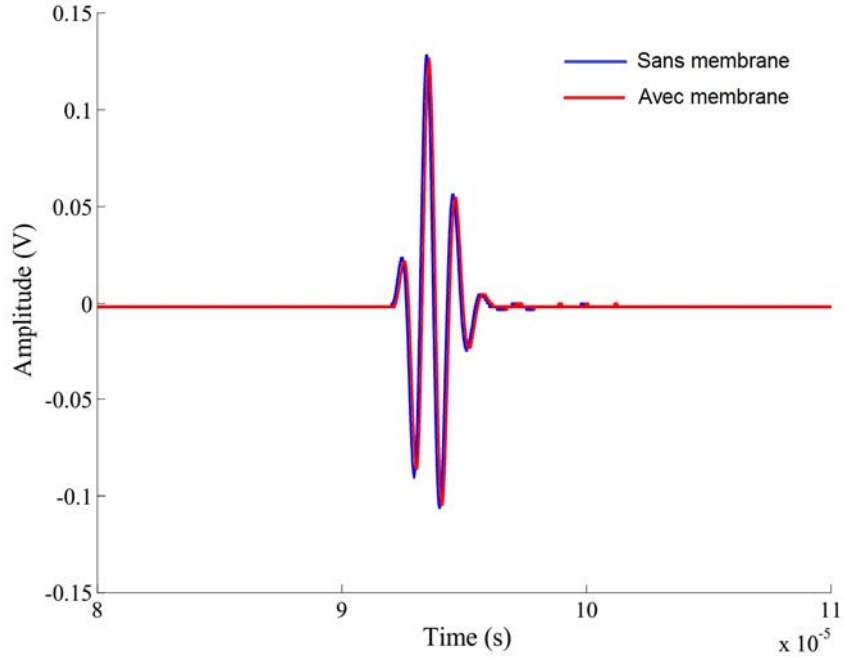


Figure II.17 : Comparaison des signaux temporels transmis dans l'eau, sans et avec membrane.

Les signaux montrent clairement qu'en présence de la membrane, il n'y a pas eu de baisse significative de l'amplitude. Il n'y a pas eu non plus de déformation d'impulsion avec la membrane et le signal obtenu conserve le même contenu spectral que celui de référence dans l'eau. Ce qui permet de considérer que la présence de la membrane n'a pas d'impact sur les mesures de la vitesse d'onde de compression.

II.3.2. Validation du système et confrontation aux résultats des essais oedométriques

II.3.2.1 Rôle de l'épaisseur et de la fréquence

Une étape préalable à la validation consiste à définir deux paramètres de mesure, l'épaisseur de l'échantillon "d" et la fréquence de l'onde ultrasonore "f".

L'influence de ces deux paramètres sur la vitesse d'onde de compression est analysée à travers les résultats représentés sur la figure II.18 sous forme de courbes de variation de la vitesse d'onde V_p (dans l'échantillon) en fonction de l'indice des vides de l'échantillon (mesuré après déchargement oedométrique).

Dans les résultats présentés, deux épaisseurs ont été considérées, l'une avec d=10 mm (Fig. II.18 a) et l'autre avec d=20 mm (Fig. II.18 b). Pour chaque épaisseur d'échantillon, deux fréquences ont été utilisées, l'une à 1 MHz et l'autre à 5 MHz. Les échantillons permettent l'analyse suivant l'axe parallèle à la direction de la contrainte oedométrique σ_v ($Set2_H$) et perpendiculaire à σ_v ($Set1_V$).

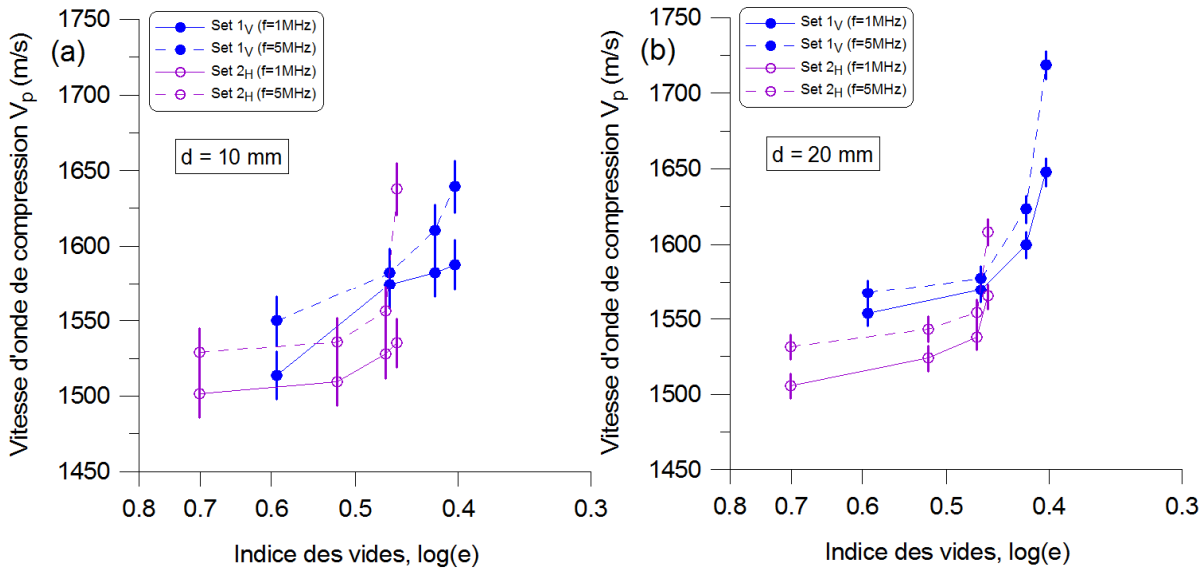


Figure II.18 : Influence de l'épaisseur de l'échantillon et de la fréquence centrale des transducteurs sur la vitesse d'onde de compression.

Les courbes de vitesse d'onde de compression V_p sont accompagnées d'une plage integrant l'incertitude sur les mesures ΔV_p. Celle-ci a été calculée suivant l'équation II.9 en considérant une erreur de ±0.1 mm sur l'épaisseur "d", et comprise entre ±0.02 et ±0.05 µs sur le temps de vol "t". Cette erreur représente l'erreur effectuée à la lecture des appareils de mesure.

$$\frac{\Delta V_P}{V_P} = \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta d}{d} \qquad [II.9]$$

La figure II.18 (b) montre, pour l'épaisseur d=20mm, la même tendance entre les deux fréquences. En revanche, une irrégularité dans les valeurs est mis en évidence pour l'épaisseur d= 10mm (Fig. II.18 a).

En ce qui concerne le paramètre de fréquence, la valeur de 5 MHz induit des valeurs élevées de la vitesse d'onde et supérieures à celles obtenues avec une fréquence de 1 MHz sur un écart modéré.

En se basant sur ces résultats, nous avons fixé l'épaisseur d=20mm et la fréquence f=1MHz comme paramètres de mesure ultrasonore pour la suite de cette étude.

II.3.2.2 Variation de la vitesse d'onde avec l'indice des vides

Les essais visent à définir l'évolution de la vitesse d'onde en fonction de la variation de l'indice des vides du matériau (mesuré en déchargement) après chargement oedométrique.

La figure II.19 présente les résultats sur trois séries *Set 1$_V$*, *Set 2$_H$* et *Set*3$_{V\&H}$* du tableau II.4 avec une propagation d'onde à travers les deux plans vertical et horizontal.

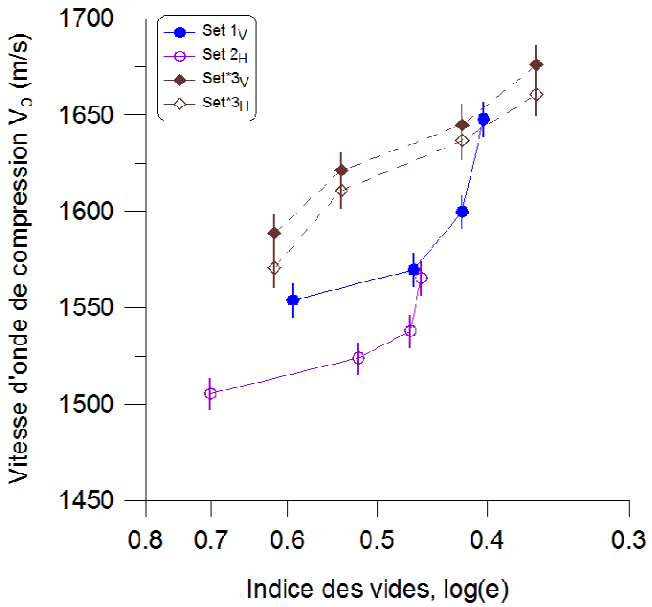


Figure II.19 : Variations de la vitesse d'onde de compression verticale et horizontale en fonction de l'indice des vides de déchargement avec une épaisseur d=20mm et une fréquence f=1MHz.

Quelque soit l'échantillon d'essai, les résultats montrent une évolution croissante de la vitesse avec la diminution de l'indice des vides (provoquée par le chargement oedométrique). Les courbes affichées par les séries *Set* 1_V et *Set* 2_H sont distinctes. Globalement, les vitesses d'ondes mesurées dans *Set* 1_V sont plus élevées que celles obtenue dans *Set* 2_H. Ce résultat montre un phénomène d'anisotropie induite par le chargement mécanique renforçant l'anisotropie initiale (structure initiale du matériau formée dans le consolidomètre).

Les résultats de la série *Set*3*$_{V\&H}$ apportent une vision supplémentaire appuyant le fait que la mesure est sensible à l'anisotropie structurelle du matériau.

*Set*3*$_V$ *et Set*3*$_H$ *affichent* deux courbes équivalentes, ce qui veut dire qu'il y a ici des propriétés d'isotropie. Ceci apparaît comme étant le résultat d'une atténuation de l'anisotropie initiale (l'éprouvette ayant été préconsolidée de la même façon que les séries *Set* 1_V *et Set* 2_H) provoquée par la rotation de l'éprouvette avant son chargement oedométrique.

Remarque : dans la série *Set*3*$_{V\&H}$ lors du chargement oedométrique, la contrainte de chargement devient perpendiculaire à la contrainte initiale de préconsolidation. Cette discussion est reprise dans la partie II.3.2.1.

Enfin, une comparaison, effectuée entre les valeurs expérimentales de notre étude (*Set* 1_V, *Set* 2_H, *Set*3*$_{V\&H}$ et *Set* 4_V) et celles obtenues par Mondol et al. (2007) sur des échantillons de kaolinite saturée, renforce la validation de notre système expérimental. Les résultats, représentés sur la figure II.20 sous forme de la vitesse d'onde en fonction de la porosité, montrent une bonne concordance avec la loi de Reuss (1929) proposée pour les sols argileux.

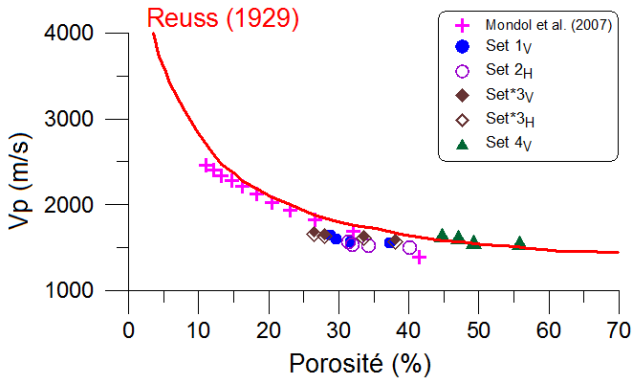


Figure II.20 : Vitesse d'onde de compression en fonction de la porosité dans les sols argileux.

II.3.2.3 Module dynamique et caractérisation de la porosité d'anisotropie

La formulation générale du module dynamique E_{dyn} est donnée dans le cas d'un matériau anisotrope par l'équation II.10 en fonction du coefficient de Poisson ν et des vitesses d'ondes de compression V_p et de cisaillement V_s.

$$E_{dyn} = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{(1-\nu)} f(V_p, V_s) \qquad [II.10]$$

L'expression de la fonction f (V_p, V_s) est citée par exemple dans Mondol et al. (2007) et donnée par l'équation II.11.

$$f(V_p, V_s) = \rho V_s^2 \left[\frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right] \qquad [II.11]$$

Dans le cadre de notre étude, la méthode acoustique d'insertion-substitution ne permet pas la mesure de la vitesse de cisaillement V_s. Cependant, nous avons adopté la formule de l'équation II.12 citée dans Fjaer et al. (2008). ρ représente la densité de l'échantillon d'argile.

$$E_{dyn} = \frac{2}{3} \rho V_p^2 \qquad [II.12]$$

1- Mesure des propriétés élastiques dans l'argilite de Bure :

Afin de compléter notre étude de validation du systéme expérimental, des mesures ont été effectuées sur des échantillons d'Argilite de Bure. Il est alors possible de comparer nos résultats à ceux disponibles dans la litérature.

La découpe des échantillons a été réalisée suivant le protocole présenté sur la Figure II.13. Les mesures de vitesse d'onde ont été effectuées sur les échantillons, en plusieurs points suivant les deux plans parallèle (//) et perpendiculaire (⊥) à la stratification (Fig. II.13). Elles ont permis d'obtenir les résultats présentés dans le tableau II.7 où ils sont comparés aux résultats obtenus par Gasc-Barbier (2002) et Wei et al. (2016b).

Tableau II.7 : Propriétés élastiques des Argilites de Bure.

Caractéristiques		Gasc-Barbier (2002)	Wei et al. (2016b)	Résultats obtenus dans cette étude
Profondeur d'extraction (m)		422 - 527	489 - 502	489 - 502
Teneur en eau (%)		4.4 - 9	5 - 5.7	6.2
Indice des vides		0.12 - 0.20	0.22 - 0.35	0.15
Vitesse d'onde de compression (m/s)	(//)	--	--	2371 - 2494
	(⊥)	--	--	1726 - 1892
	Valeurs moyennes	1410 - 4640	--	--
Module dynamique (GPa)	(//)	--	18 - 16	10 - 11.1
	(⊥)	--	11.3 - 7	5.3 - 6.4
	Rapport (//) / (⊥)	--	2.3	1.9 - 1.7
	Valeurs moyennes	2.3 - 11	--	--

Les propriétés élastiques déterminées par l'utilisation de notre système expérimental sont globalement concordantes avec celles obtenues par Gasc-Barbier (2002) et Wei et al. (2016b). Les échantillons d'Argilite de Bure traités proviennent de la même couche du Callovo-Oxfordien et ont un indice des vides et une teneur en eau compris dans la même gamme de valeurs.

Par ailleurs, l'anisotropie des Argilites de Bure est mise en évidence dans notre étude avec des vitesses d'onde plus élevées suivant le plan vertical (⊥ à la stratification) par rapport au plan horizontal (// à la stratification).

Nous avons calculé le module dynamique en utilisant la formule donnée par l'équation II.12 avec une densité de l'Argilite égale à 2.4. Pour une teneur en eau de 6.2% nous avons obtenus des valeurs comprises entre 5.3 et 6.4 GPa suivant le plan (⊥) et entre 10 et 11 GPa suivant le plan (//). Ces résultats sont assimilables aux valeurs moyennes données par Gasc-barbier (2002) caractérisées par un large éventail allant de 2.3 à 11 GPa. Ce qui conforte également la validité du système.

2- Propriété d'anisotropie :

Les mesures sur l'Argilite de Bure, suivant le plan perpendiculaire puis parallèle, a montré l'existence d'une anisotropie dans les propriétés élastiques du matériau. Cette partie traite la question d'anisotropie, dans le cas particulier des éprouvettes de kaolinite consolidées.

Nous avons représenté les valeurs du module dynamique sur la figure II.21 en fonction de l'indice des vides mesuré après le déchargement oedométrique.

Les courbes des différentes séries (*Set 1$_V$*, *Set 2$_H$*, *Set*3$_V$* et *Set*3$_H$*) suivent la même évolution que pour la vitesse d'onde (Fig. II.19) avec une croissance à mesure que l'indice des vides diminue.

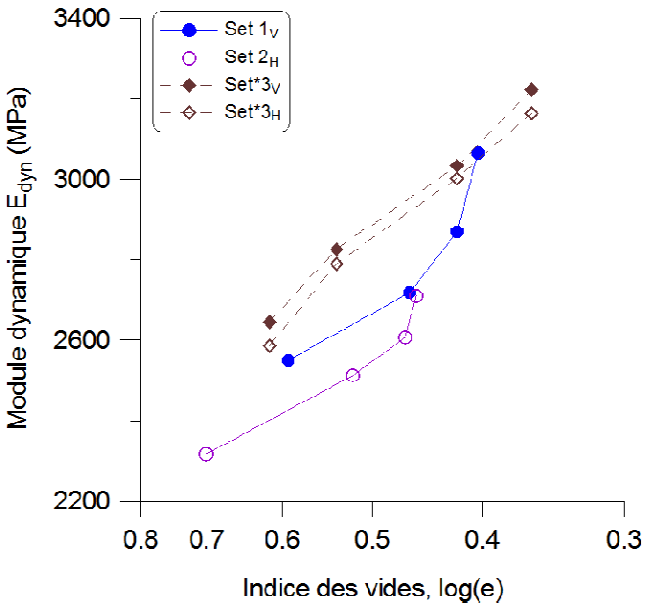


Figure II.21 : Variations du module dynamique en fonction de l'indice des vides.

Même faible, l'anisotropie élastique reste apparente à travers des résultats obtenus dans les valeurs du module dynamique légèrement plus faibles suivant le plan horizontal (*Set 2$_H$*.) par rapport au modules obtenus suivant le plan vertical (*Set 1$_V$*).

Par ailleurs, comme on peut le voir sur la figure II.21, et compte tenu des conditions d'essai de la série *Set*3*, les résultats mettent en évidence des propriétés d'isotropie. La série *Set*3$_V$* présente les mêmes propriétés élastiques que la série *Set*3$_H$*. Cela est expliqué par le réarrangement structurel, dans le matériau lors du chargement oedométrique, qui tend à casser l'orientation initialement formée vers le plan horizontal des particules.

La figure II.22 présente les variations du rapport (E_{dynV}/E_{dynH}) des modules dynamiques vertical et horizontal en fonction de l'indice des vides. Ce plan est pratique pour montrer le rapport d'anisotropie que l'on trouve de l'ordre de 10^{-1} pour *Set 1$_V$* et *Set 2$_H$*, et très proche de la ligne d'isotropie $E_{dynV}/E_{dynH} = 1$ pour la série *Set*3* suivant les deux plans V et H.

Ces essais dans le cas des séries *Set 1$_V$* et *Set 2$_H$* mettant en évidence une anisotropie induite de plus en plus importante avec le chargement oedométrique.

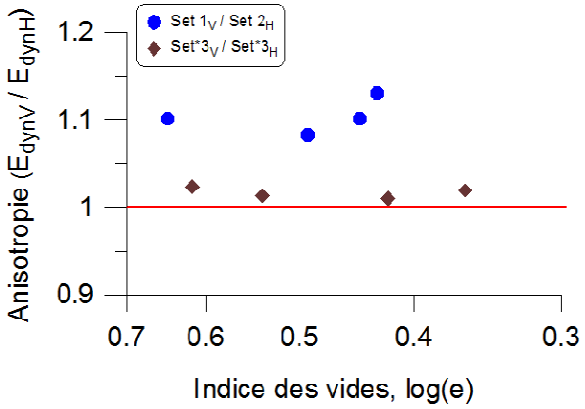


Figure II.22 : Propriétés de l'anisotropie induite par le chargement oedométrique.

Ce mécanisme de l'anisotropie induite dans les matériaux argileux remaniés peut être expliqué par l'évolution de la microstructure lors du chargement mécanique qui provoque l'orientation des particules vers le plan horizontal, perpendiculaire à la direction de la contrainte axiale appliquée. Ceci est montré dans les observations réalisées au MEB par Hammad (2010) sur la kaolinite (Fig. II.23). Ces images montrent une direction privilégiée d'une large proportion de particules de kaolinite orientées vers le plan horizontal.

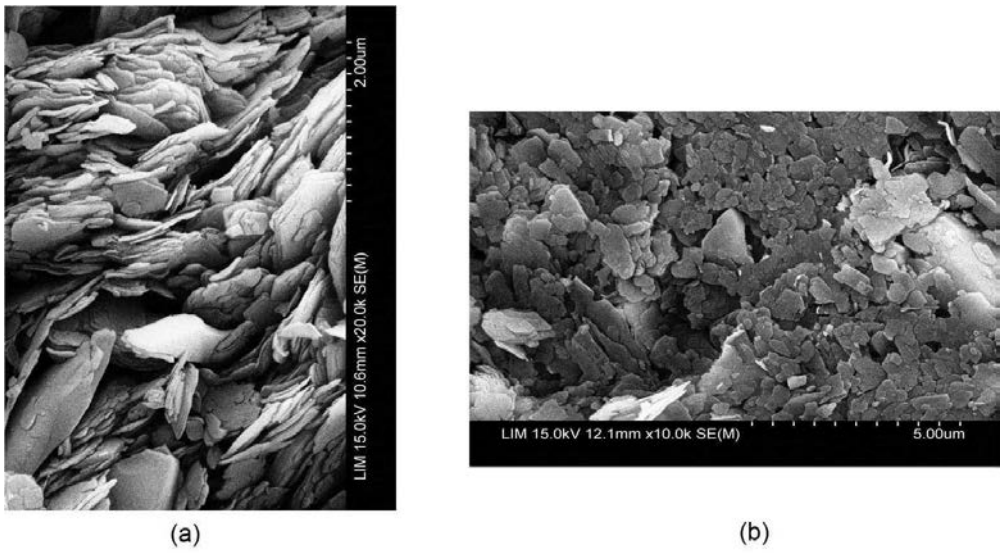


Figure II.23 : Photographies au MEB de la kaolinite sous chargement oedométrique (σ'_v=1MPa) : observations sur les plans (a) vertical et (b) horizontal (Hammad, 2010).

II.3.2.4 Modules statiques et modules dynamiques

Une comparaison entre module statique E_{stat} (Fig. II.9) et module dynamique E_{dyn} (Fig. II. 21) a été effectuée et représentée sur la figure II.24. Les points expérimentaux concernent les essais effectués sur les différentes séries *Set 1*, *Set 2* et *Set*3*.

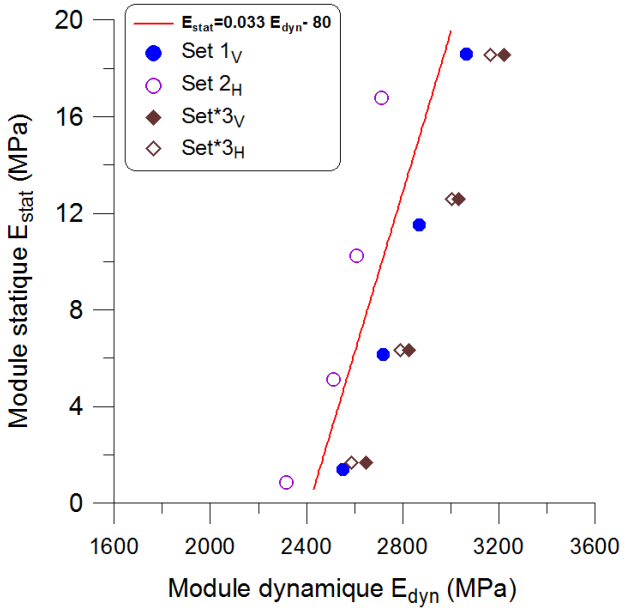


Figure II.24 : Relation entre les modules statique et dynamique de la kaolinite sous chargement oedométrique.

Chaque série met en évidence une variation linéaire que l'on peut globalement approcher par l'équation II.13 lorsque $\sigma'_v \geq 3$MPa. E_{stat} est exprimé en MPa.

$$E_{stat} = 0.033 E_{dyn} + 80 \qquad [II.13]$$

Des relations linéaires ont été énoncées dans la littérature entre les modules statique et dynamique notamment pour les roches (Mavko et al., 2009). Cependant, cette tendance n'est pas clairement établie pour les argiles molles consolidées car les données expérimentales ne sont pas abondantes. Gorjainov and Ljchowickij (1979) ont proposé, pour les sédiments argileux en faible profondeur, une équation d'une droite (exprimée en MPa) formulée par :

$$E_{stat} = 0.033 E_{dyn} + 6.5 \qquad [II.14]$$

On peut constater que la pente de 0.033 est la même que celle obtenue dans la kaolinite.

La figure II.25 montre le rapport E_{dyn}/E_{stat} en fonction de l'indice des vides obtenus en déchargement après le chargement oedométrique (voir tableau II.2). Les courbes montrent une décroissance considérable du rapport E_{dyn}/E_{stat} en fonction du chargement. La chute se poursuit ensuite progressivement jusqu'à atteindre un palier de E_{dyn}/E_{stat-u}= 167.

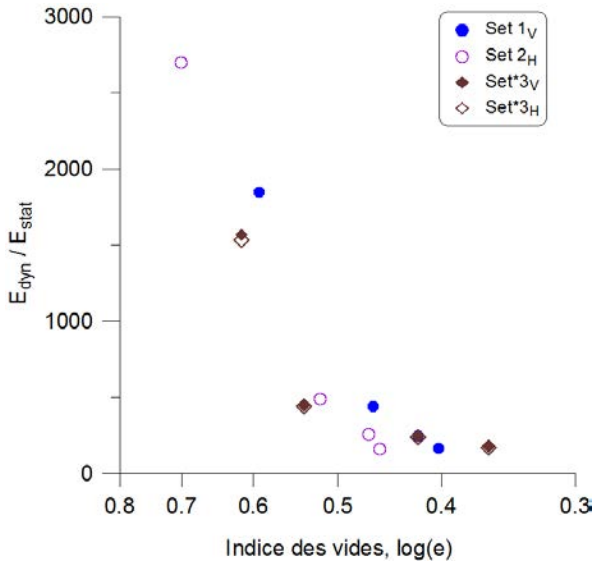


Figure II.25 : Variations du rapport E_{dyn}/E_{stat} en fonction de l'indice des vides sur chemin oedométrique.

Le travail développé dans cette partie II.3 a permis de valider le système expérimental développé au laboratoire. La méthode ultrasonore en insertion-substitution peut être utilisée pour caractériser les propriétés élastiques (en particulier le module dynamique E_{dyn}) d'un matériau argileux en utilisant la mesure de la vitesse d'onde de compression. Cette méthode d'identification peut-être améliorée dans l'avenir, par le développement d'une méthode de mesure permettant d'acquérir les ondes transversales (S) pour une meilleure estimation du module élastique dynamique et du coefficient de Poisson.

II.4. Chargement triaxial

L'essai triaxial consiste à étudier le comportement mécanique d'un échantillon de sol en lui imposant un chemin de contrainte bien défini.

Dans cette partie, nous allons présenter le principe de l'essai triaxial, définir les paramètres de mesure et décrire le déroulement de ses différentes phases du chargement triaxial.

II.4.1. Système expérimental et mise en place de l'échantillon

II.4.1.1 Dispositif expérimental

Le principe de l'essai triaxial est d'appliquer à une éprouvette cylindrique un champ de contrainte uniforme par d'une pression hydraulique, notée σ_3 et une contrainte axiale, notée σ_1, appliquée au moyen d'un piston. Le système expérimental est présenté par la figure II.26.

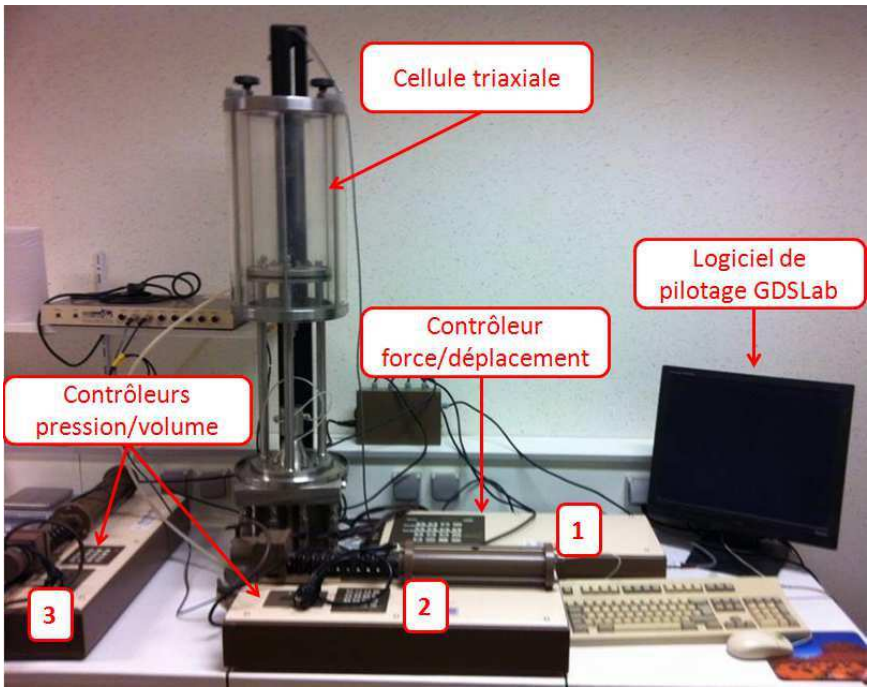


Figure II.26 : Appareil triaxial de révolution (LEM3).

L'appareil triaxial est motorisé et possède un système de chargement axial de type Wesley. Il est composé des éléments suivants :

- un contrôleur force-déplacement appelé GDS1,

- deux contrôleurs volume-pression, désignés par GDS2 et GDS3, pilotés par des microprocesseurs permettant de réguler et mesurer la pression et les variations de volume du liquide.

- une cellule en plexiglas équipée, sur sa partie supérieure, d'un piston muni d'un capteur de force et connecté au contrôleur GDS1.

- une centrale (PC) d'acquisition et de pilotage qui gère l'ensemble de l'instrumentation par l'intermédiaire du logiciel GDSLab.

Fonctionnement :

La contrainte axiale est engendrée par le déplacement de la base inférieure reliée à un vérin électromécanique piloté par le contrôleur GDS1.

Pour un essai triaxial à σ_3 constante en condition drainée, le déplacement se fait à vitesse constante et conduit à l'écrasement de l'éprouvette au contact avec le piston. La contrainte radiale σ_3 est exercée par le fluide (eau) contenu dans la cellule, et contrôlée par le contrôleur GDS3. Le contrôleur GDS2 permet d'imposer une contre pression CP à l'intérieur de l'échantillon.

II.4.1.2 Mise en place de l'échantillon

La figure II.27 représente la mise en place de l'éprouvette d'argile dans la cellule triaxiale. L'échantillon est compris entre : deux papiers filtre, deux systèmes anti-frettage et deux pierres poreuses saturées (Fig. II.27 b). L'ensemble est protégé par une membrane en latex (2 mm d'épaisseur) fixée au moyen de joints toriques au niveau de la base inférieure et la tête d'échantillon.

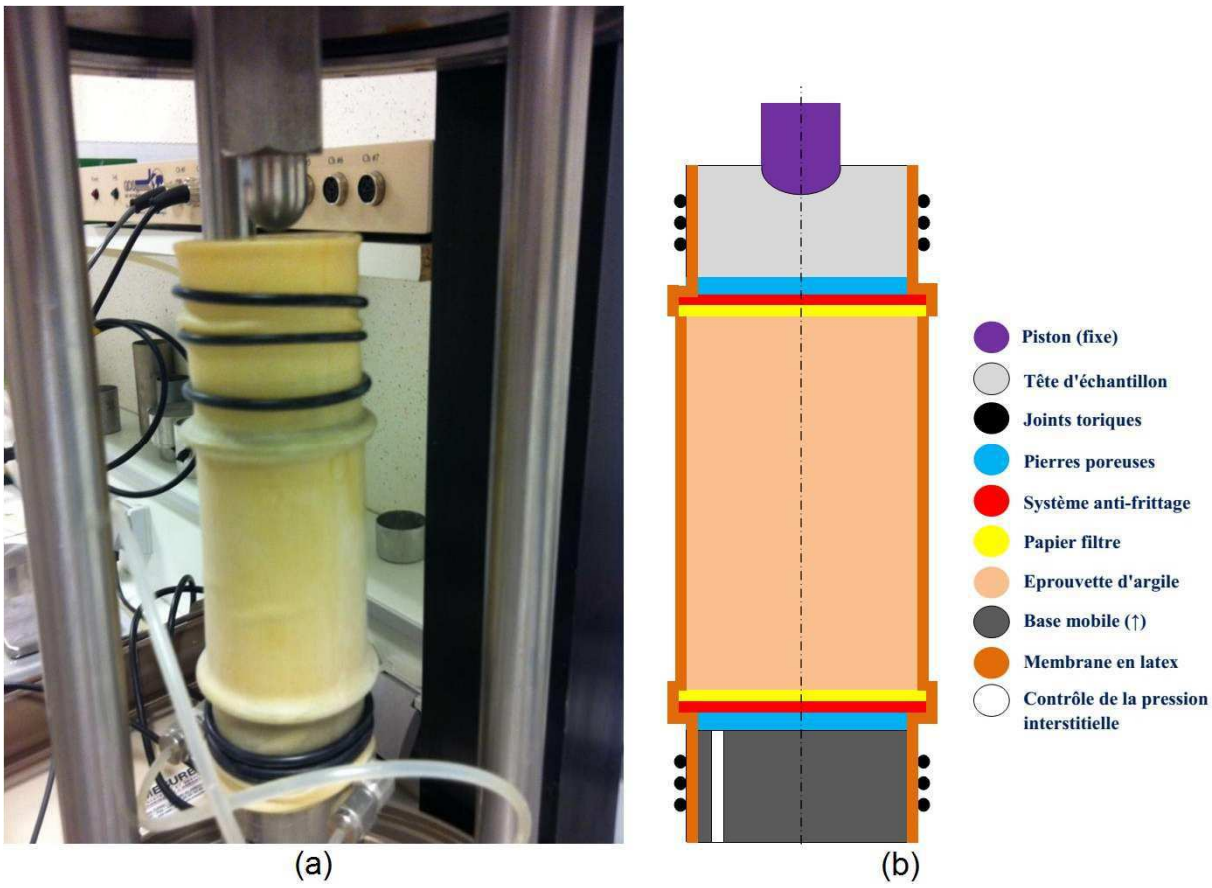


Figure II.27 : Mise en place de l'éprouvette dans la cellule triaxiale : (a) éprouvette mise en place, (b) composants nécessaires utilisés.

L'élancement de l'éprouvette cylindrique est une caractéristique géométrique ayant une influence importante sur le déroulement de l'essai triaxial (Wayhudi, 1991). Des études antérieures (par exemple, Biarez et Hicher, 1994) ont montrées qu'un élancement supérieur à 2 peut induire un phénomène d'instabilité par flambement. Un élancement inférieur à 1 peut entrainer la formation d'un cône de frottement important en fonction des conditions de contact à l'interface de l'éprouvette.

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi un élancement H_{00}/D_{00} = 1.5 afin de voir apparaitre les phénomènes liés à l'endommagement et la rupture du matériau.

Les éprouvettes cylindriques ont donc été taillées avec une hauteur H_{00} de 75 mm et un diamètre D_{00} de 50 mm (Fig. II.28 a).

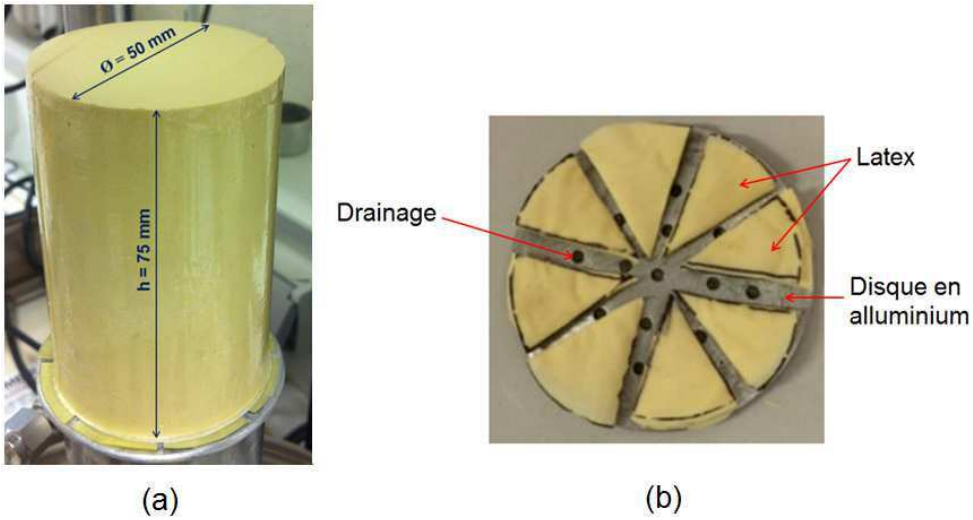


Figure II.28 : Préparation de l'échantillon : (a) éprouvette cylindrique découpée, (b) photographie du système anti-frettage.

L'utilisation du système anti-frettage a été suggérée par plusieurs chercheurs (Zervoyannis, 1982; Wayhudi, 1991; Frost and Yang, 2003) qui ont montré que l'anti-frettage assure l'uniformité du champ de contrainte et limite la forme en tonneau de l'éprouvette lors de sa déformation.

Le système anti-frettage que nous avons utilisé est constitué d'un disque en aluminium drainé et graissé sur lequel sont posés des morceaux triangulaires de latex (Fig. II.28 b).

II.4.2. Phases d'essai

L'essai triaxial se déroule en trois phases pouvant être pilotées par le logiciel GDSLab, ce qui permet un asservissement automatique des essais.

Après la mise en place de l'échantillon et avant la première phase de l'essai triaxial, une étape préliminaire consiste à équilibrer les pressions. On impose alors une contrainte radiale de σ_3 = 40 kPa et une contre pression de CP = 10 kPa.

On définit :

- ε_1, la déformation axiale de l'échantillon,

- ε_v, la déformation volumique de l'échantillon,

- σ_1, la contrainte axiale,

- σ_3, la contrainte radiale,

- CP, la contre pression dans l'échantillon.

a - Phase de Saturation :

Durant cette phase, il s'agit d'appliquer une rampe de saturation et de vérifier le coefficient de Skempton B.

La figure II.29 représente un exemple de la rampe de saturation réalisé pilotée par les contrôlleurs 2 et 3 (Fig. II.26).

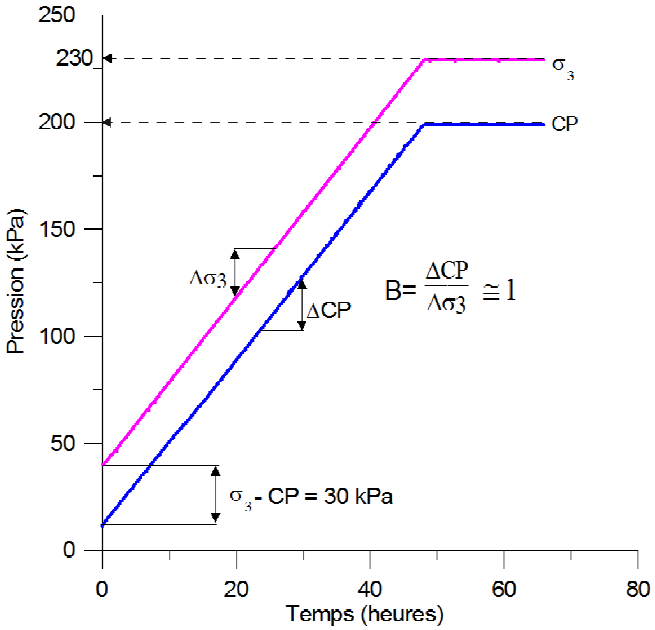


Figure II.29 : Rampe de saturation obtenue pour le Kaolin K13.

Cette phase correspond à une augmentation progressive de la pression de confinement σ_3 et de la contre pression CP tout en maintenant la différence (σ_3-CP) constante fixée à 30 kPa dans ces essais.

La durée moyenne de la saturation dépend du matériau. Elle est estimée à 48 heures dans le cas de la Kaolinite pour une bonne saturation à une vitesse d'application de 3,96 kPa/h.

La phase prend fin lorsque la pression de confinement et la contre pression atteignent respectivement 230 et 200 kPa comme on peut le constater sur la figure II.29.

A la fin de phase de saturation, une mesure systématique du coefficient de Skempton B (B = $\Delta CP/\Delta\sigma_3$) qui doit être proche de 100% assure la bonne qualité de la saturation.

b - Phase de consolidation isotrope :

Le chargement isotrope (Fig. II.30) consiste à augmenter la contrainte de confinement σ_3 (par palier par exemple) tout en maintenant la contre pression CP constante à sa valeur de fin de saturation.

La valeur de la contre pression utilisée dans les essais réalisés est de 200 kPa. La contrainte de consolidation isotrope est notée p'_0.

La variation de p'_0 est fixée à 50 ou 100 kPa (essai normalement consolidé ou surconsolidé). Chaque palier est appliqué durant 80 minutes. Ce temps assure la fin la consolidation primaire avec un t_{100}=70 min, comme le montre la figure II.6.

Pour un essai surconsolidé, où la contrainte de consolidation p'_0=1000 kPa, le déchargement isotrope doit être appliqué en fonction du degré de surconsolidation (p'_0/p'_1) souhaité.

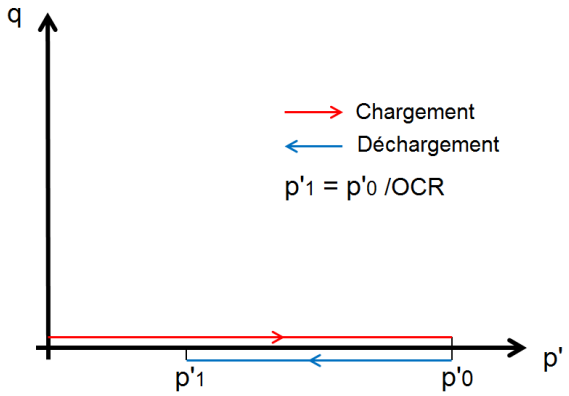


Figure II.30 : Chargement et déchargement isotropes dans le plan (p' - q).

La figure II.31 représente un exemple de courbes de chargement (Fig. II.30 a) et déchargement (Fig. II.31 b) isotropes exprimées en termes de variations du volume en fonction du temps.

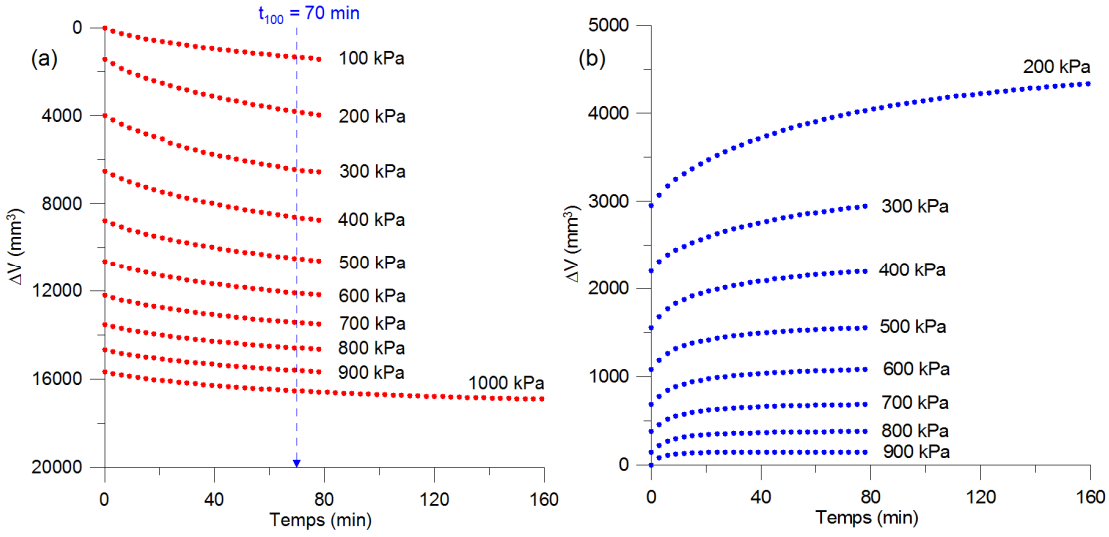


Figure II.31 : Exemple de variations du volume en fonction du temps lors de la consolidation isotrope : (a) chargement, (b) déchargement.

A la fin de la consolidation isotrope, les dimensions de l'éprouvette consolidée (hauteur H_0, diamètre D_0) ainsi que l'indice des vides e_0 seront mesurés et calculés.

c - Phase de cisaillement :

Cette phase consiste à appliquer un cisaillement indirect à l'éprouvette. La figure II.32 représente le champ des contraintes auquel est soumise l'éprouvette pendant l'essai.

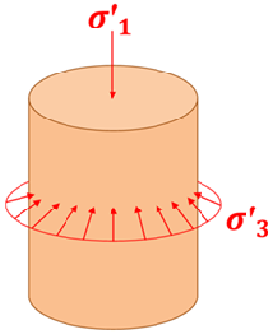


Figure II.32 : Etat de contrainte durant la phase de cisaillement.

Il existe plusieurs chemins de contrainte qui peuvent être réalisés lors d'un essai triaxial. Nous avons réalisé deux types d'essais, l'essai à σ_3=constante et l'essai purement déviatorique.

- **Cisaillement à σ_3 constante :**

L'essai consiste à maintenir la contrainte latérale effective σ'_3 constante et à augmenter la contrainte axiale effective σ'_1. L'essai est à déplacement imposé.

La vitesse de déplacement V_{max} est constante imposée elle est estimée par la norme NF-P 94-074 (AFNOR, 1994/b) qui propose la formule Eq. II.15.

$$V_{max} = \frac{H_{00} \cdot \varepsilon_f}{a \cdot t_{100}} \qquad [II.15]$$

Le calcul est basé sur la connaissance de t_{100} et du paramètre de drainage "a" (égal à 8.5 dans le cas d'un drainage simple). ε_f est la déformation présumée à la rupture elle est de l'ordre de égale à 6% dans le cas de la kaolinite).

Ce qui donne une vitesse d'écrasement V_{max} = 7.56 ×10^{-3} mm/min.

Une représentation schématique du chemin de contrainte à σ'_3 constante est illustrée sur la figure II.33 en comportement normalement consolidé et surconsolidé. Les deux types d'essai peuvent être réalisés en conditions drainé (CD) et non-drainé (CU).

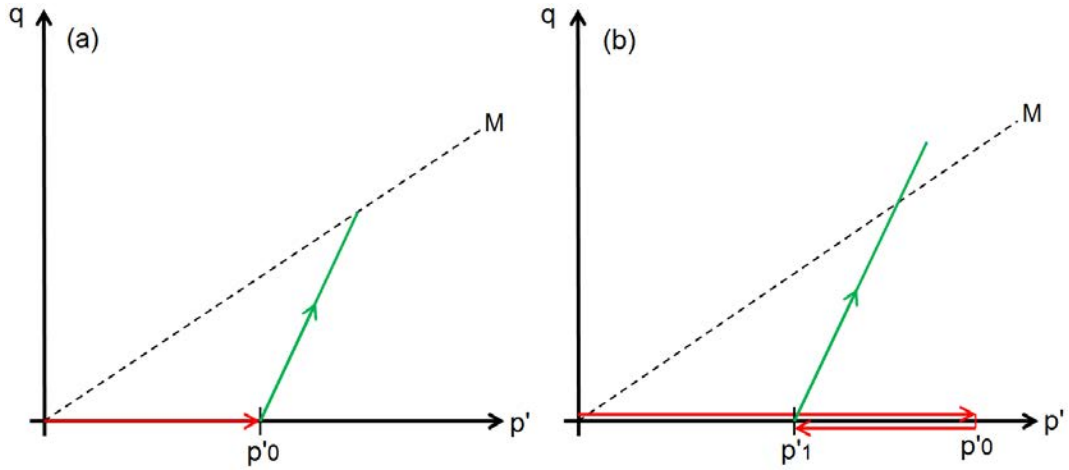


Figure II.33 : Chemin triaxial à σ'_3 = constante : (a) normalement consolidé, (b) surconsolidé.

- **Cisaillement purement déviatorique (p'=cste) :**

L'essai consiste à maintenir la contrainte moyenne effective p' constante jusqu'à la rupture à partir de la pression atteinte à la fin de la consolidation isotrope ($p'= p'_0$). Ceci est schématisé sur la figure II.34 dans les deux cas du comportement, normalement consolidé et surconsolidé.

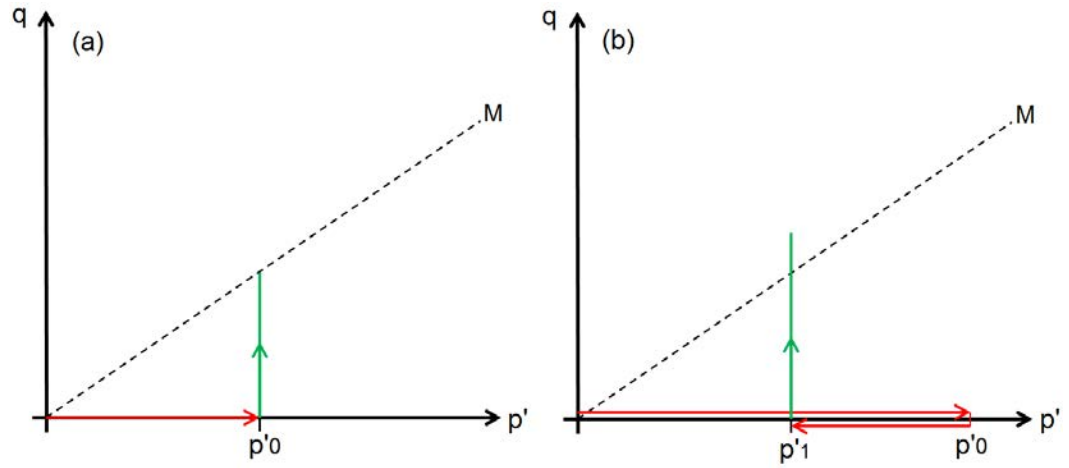


Figure II.34 : Chemin triaxial à p' = constante : (a) normalement consolidé, (b) surconsolidé.

L'essai purement déviatorique est réalisé à contraintes imposées. Le programme de pilotage permet d'imposer les valeurs finales du déviateur (q_f) et de la contrainte effective moyenne (p'_f) pour gérer le chargement et la remontée du plateau.

d- Identification et calcul des paramètres de l'essai triaxial :

Le tableau II.8 présente les différents paramètres mesurés et calculés dans un essai triaxial.

Tableau II.8 : Paramètres mesurés et calculés dans un essai triaxial.

<table>
<tr><th colspan="5">Conditions initiales</th></tr>
<tr><td colspan="2">H_{00}, D_{00}, e_{00},
S_{00} et V_{00} section et volume de l'éprouvette</td><td colspan="3">$e_{00} = Gs.\frac{M_h - M_{sec}}{M_{sec}}$
M_h et M_{sec} masses humide et sèche de petits échantillons d'argile préconsolidée séchés à l'étuve. G_s densité des grains solides.</td></tr>
<tr><th>Déroulement de l'essai</th><th colspan="2">Paramètres mesurés par GDSLab</th><th colspan="2">Paramètres calculés</th></tr>
<tr><td>Phase de saturation</td><td colspan="2">σ_{3i}, CP_i</td><td colspan="2">$B = \frac{\Delta CP}{\Delta \sigma_3}$</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Phase de consolidation isotrope</td><td colspan="2" rowspan="4">$\Delta V_{0i\text{-}ch}$, $\Delta V_{0i\text{-}déch}$
Variation de volume en chargement et déchargement
NC : normalement consolidé
OC : surconsolidé</td><td colspan="2">$e_{0i,ch} = e_{00} - (1+e_{00}).\frac{\Delta V_{0i,ch}}{V_{00}}$
Indice des vides cas d'un essai NC et OC</td></tr>
<tr><td colspan="2">$e_{0i,déch} = e_{00} + (1+e_{00}).\frac{\Delta V_{0i,déch}}{V_{00}}$
Indice des vides cas d'un essai OC</td></tr>
<tr><td colspan="2">$V_0 = V_{00} - (\sum \Delta V_{0i,ch} - \sum \Delta V_{0i,déch})$</td></tr>
<tr><td colspan="2">$H_0 = H_{00} - \frac{1}{3.V_{00}}(\sum \Delta V_{0i,ch} - \sum \Delta V_{0i,déch})$
$S_0 = \frac{V_0}{H_0}$</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Phase de cisaillement</td><td colspan="2">σ_{3i}</td><td>$\varepsilon_{vi} = \frac{\Delta V_i}{V_0}$ Déformation volumique</td><td>$\varepsilon_{1i} = \frac{\Delta H_i}{H_0}$ Déformation axiale</td></tr>
<tr><td colspan="2">CP_i</td><td colspan="2">$\sigma_{1i} = \frac{F_i}{S_i} + \sigma_{3i}$</td><td>$S_i = \frac{V_0 - \Delta V_i}{H_0 - \Delta H_i}$</td></tr>
<tr><td>F_i</td><td>Force axiale</td><td colspan="2">$\sigma'_{1i} = \sigma_{1i} - CP_i$</td><td>$\sigma'_{3i} = \sigma_{3i} - CP_i$</td></tr>
<tr><td>ΔH_i</td><td>Déplacement axial</td><td colspan="3">$e_i = e_0 - (1+e_0).\varepsilon_{vi}$
e_0 : indice des vides calculé à la fin de la phase de consolidation isotrope</td></tr>
<tr><td>ΔV_i</td><td>Variation de volume</td><td colspan="2">$q_i = \sigma'_{1i} - \sigma'_{3i}$</td><td>$p'_i = \frac{1}{3}(\sigma'_{1i} + 2\sigma'_{3i})$</td></tr>
</table>

II.5. Mesure du champ des déplacements de l'argile au cours du séchage par la méthode de corrélation d'images numériques

L'objectif de cet essai est de tenter de mesurer le champ des déplacements d'un échantillon de kaolinite qui sèche entre un état saturé et un état d'humidité relative donnée. Les essais de dessiccation sont soit libres soit contrôlées.

Un dispositif expérimental a été monté au laboratoire LEM3 pour faire suite à la thèse de Wei (2014), et a été adapté aux deux techniques libre et contrôlée de dessiccation.

Les données sont enregistrées et traitées en temps réel lors des essais par la méthode de corrélation d'images numériques (CIN) au moyen du logiciel VIC2D décrit ultérieurement.

Dans cette partie, nous présentons successivement les procédures expérimentales des deux dessiccations, la préparation des échantillons, une étude des supports pour les échantillons et nous nous intéresserons ensuite à la mesure par la CIN et au logiciel VIC2D.

II.5.1. Techniques de dessiccation

Deux paramètres, interdépendants, de base dans l'essai de dessiccation seront à contrôler et/ou à mesurer :

- la température T (en °C)

- l'humidité relative HR (en %)

En fonction de l'environnement conditionnant l'essai, et de la maitrise de T et de HR, la dessiccation peut être libre ou contrôlée.

II.5.1.1 Mesure de la température et de l'humidité relative et éléments de base

1- Méthode pour contrôle de l'humidité relative :

L'essai de dessiccation contrôlée consiste à suivre le séchage d'un échantillon mis en place dans une enceinte isolée où il est possible de contrôler la température et l'humidité relative.

De nombreuses méthodes expérimentales permettent de réaliser des essais de dessiccation contrôlée (voir chapitre I partie I.1.3.2). Nous avons choisi d'utiliser la technique d'équilibre de vapeur (en anglais : Vapour Equilibrium Technique VET) dont le principe est représenté sur la figure II.35. Cette technique permet de contrôler la succion "s_{glob}" à l'intérieur d'une chambre confinée en imposant une humidité relative générée par la présence d'une solution saline saturée. Ainsi, les transferts d'eau entre l'échantillon et la solution saline s'effectuent sous phase vapeur jusqu'à l'équilibre.

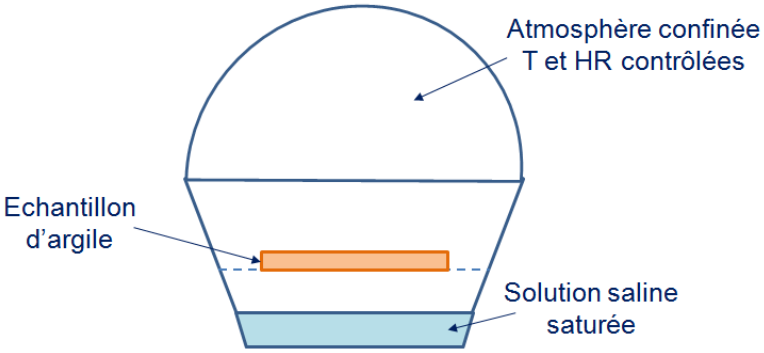


Figure II.35 : Schéma de principe du contrôle de la succion par phase vapeur.

La figure II.36 présente un exemple d'essai de dessiccation contrôlée effectué par la technique d'équilibre de vapeur. La solution saline saturée utilisée est l'hydroxyde de potassium KOH afin d'imposer une succion globale s_{glob}= 361 MPa par le biais d'une humidité relative HR= 7%. On peut constater qu'à partir de 40h de séchage, la teneur en eau se stabilise à sa valeur résiduelle (≈ 2%) sous une humidité relative HR= 7%.

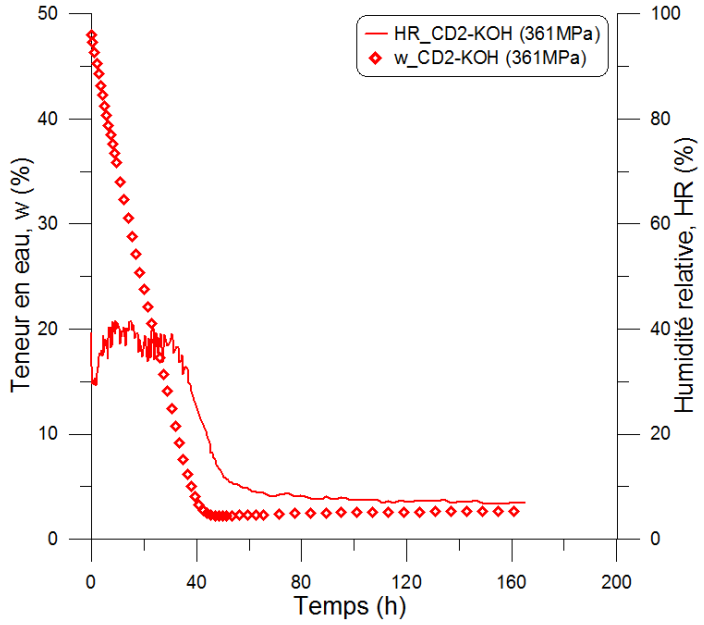


Figure II.36 : Evolution de la teneur en eau en fonction du temps sous une humidité relative contrôlée HR= 7% imposée par la solution saline saturée KOH.

2- Formules de base pour le calcul de la succion :

La formule reliant la succion à l'humidité relative est indépendante du sol, et elle est basée sur la loi de Kelvin exprimée par Eq. II.16 (Delage et Cui, 2000).

$$u_a - u_w = \frac{RT}{gM_w} \ln\left(HR\%\right) \qquad [II.16]$$

- u_a et u_w sont respectivement les pressions de l'air et de l'eau,

- HR est l'humidité relative,

- M_w est la masse molaire de l'eau (M_w = 18.016 g.mol^{-1}),

- g est l'accélération de la pesanteur (g = 9.81 m.s^{-2}),

- R est la constante molaire des gaz (R = 8.3143 J.mol^{-1}.K^{-1}),

- T est la température thermodynamique. À T = 20°C, le rapport (RT/gM) = 137.837 MPa.

L'équation de Fredlund and Rahardjo (1993) (Eq. II.17) permet de déterminer la succion en fonction de HR et T. ρ_w est la masse volumique de l'eau exprimée en (kg/m^3).

$$s_{glob} = -\frac{\rho_w RT}{M_w} \ln\left(\frac{HR\%}{100}\right) \qquad [II.17]$$

II.5.1.2 Dessiccation libre

L'essai de dessiccation libre consiste à suivre le séchage de l'échantillon placé dans des conditions de température ambiante. La figure II.37 présente le système expérimental utilisé dans les essais à dessiccation libre.

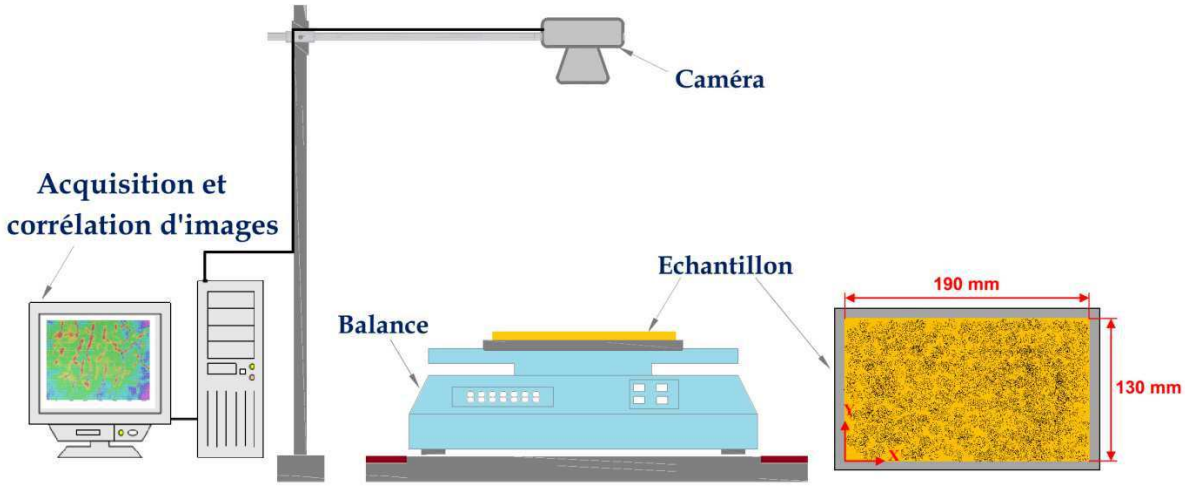


Figure II.37 : Schéma du dispositif expérimental assurant la dessiccation libre.

Les éléments constituant le système expérimental de la figure II.37 sont décrits ci-dessous :

- un échantillon d'argile saturée posé sur un support et dont la préparation est détaillée dans ce qui suit,

- une balance numérique permettant de suivre l'évolution de la perte de masse de l'échantillon au cours du séchage,

- une caméra digitale HD positionnée à la verticale de l'échantillon permet de prendre des photographies à intervalle régulier à définir au choix,

- un poste (PC) doté de deux logiciels d'acquisition et de traitement. Le premier *Vic-Snap 2010* qui gère la caméra et la prise des photographies au cours de l'essai. Le second *Vic-2D 2009* permet d'effectuer l'analyse par la CIN.

1- Préparation de l'échantillon :

L'échantillon est confectionné à partir d'une boue d'argile (Kaolin K13) ayant une teneur en eau initiale égale à 1.2 fois sa limite de liquidité ($w_0 = 1.2\ w_L$).

Après 48 heures nécessaires à l'homogénéisation de la boue, celle-ci est étalée sur un support dans un cadre parallélépipédique, comme le montre la figure II. 38 ci-dessous.

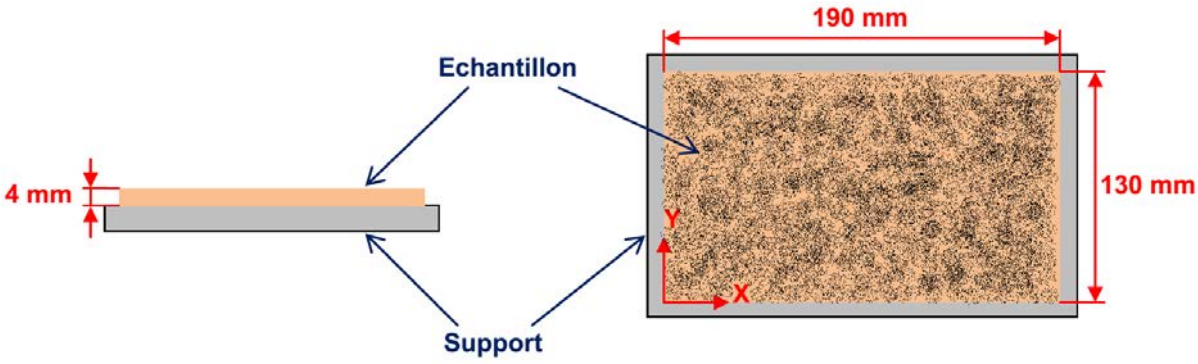


Figure II.38 : Représentation de l'échantillon sur le support.

Les dimensions de l'échantillon sont de 190 mm de longueur, 130 mm de largeur et 4 mm d'épaisseur.

Un mouchetis, nécessaire à la corrélation d'images numériques, est appliqué sur la surface supérieure de l'échantillon par une peinture aérosol. L'échelle de nos mesures demande une vaporisation homogène et dense de la peinture, ceci est nécessaire pour éviter des zones de non-calcul par la CIN. Une étude du mouchetis est présentée dans la section (II.5.3.2).

2- Etude de la rugosité du support :

Deux types de support ont été utilisés, l'un en téflon noté *S1-téflon* et l'autre en perspex noté *S2-perspex*.

Le choix de *S1-téflon* a été fait dans le but de s'affranchir des effets de friction liés au contact entre la surface inférieure de l'échantillon et le support utilisé.

Par ailleurs, nous avons réalisé un essai de séchage libre avec *S2-perspex* pour comparer les résultats obtenus avec ceux sur *S1-téflon* dans un premier temps, puis avec ceux présentés dans Wei (2014) dont les essais ont été effectués sur un support en perspex.

La surface des deux supports a été analysée au moyen du microscope confocal LEICA DCM3D. Cette analyse permet d'approcher, par des paramètres de mesures, la rugosité de surface. La figure II.39 présente la topographie en 3D de la surface des différents supports. Les couleurs représentent l'altitude de chaque point de la surface (axe Z) par rapport au plan (Z=0).

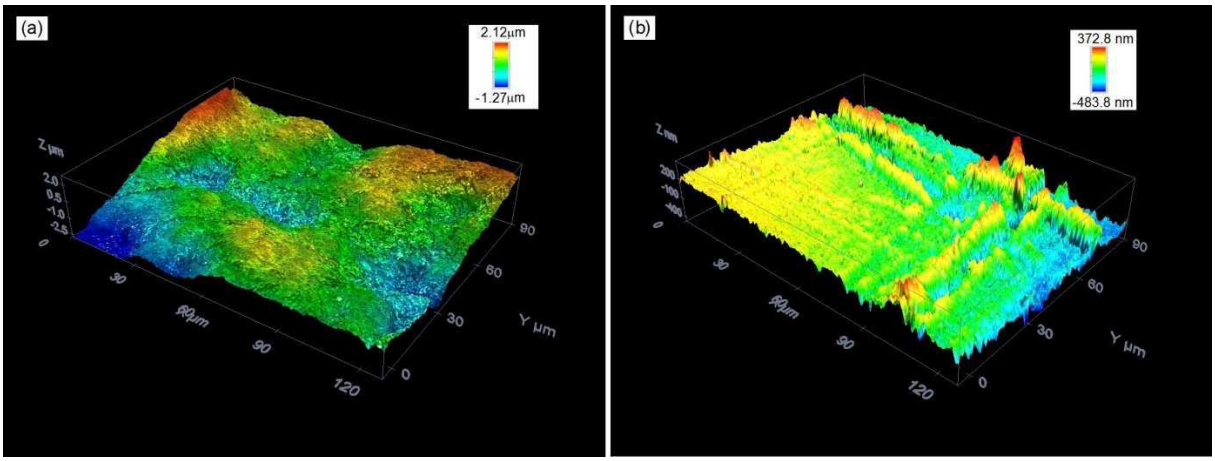


Figure II.39 : Topographie 3D de la surface donnée par le microscope confocal : (a) *S1-téflon*, (b) *S2-perspex*.

Afin d'expliquer la méthode de calcul des paramètres de rugosité tels que Sa, qui s'effectue par rapport à une surface moyenne notée M, nous avons représenté sur la figure II.40 la surface 2D de *S1-téflon* et un exemple de profile constituant une ligne de points appartenant à cette surface.

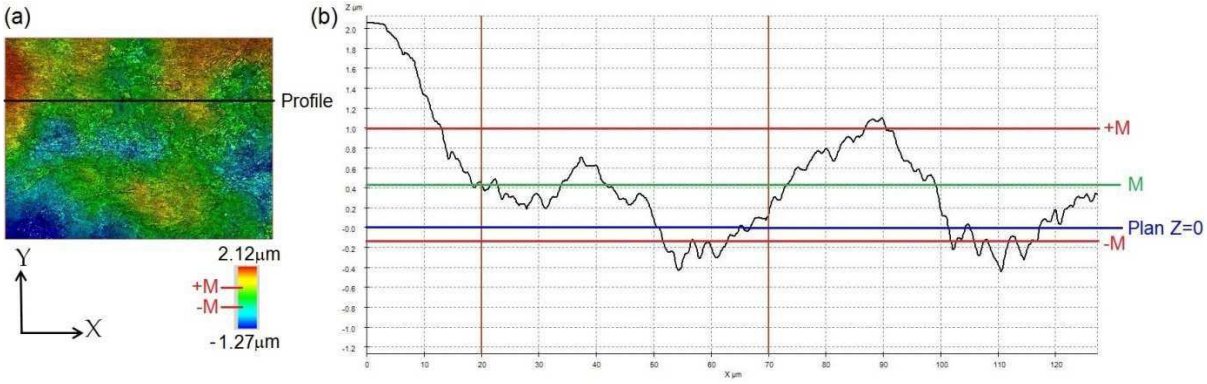


Figure II.40 : Exemple de profile obtenu sur *S1-téflon* : (a) position du profile dans le plan (X, Y) de la surface traitée, (b) altitude des points du profile par rapport au plan Z=0.

La courbe en figure II.40 (b) représente l'évolution de l'altitude des points composant le profile localisé sur la surface traitée en figure II.40 (a). La droite +M désigne la moyenne des altitudes positives se trouvant au dessus du plan Z=0. La droite -M quant à elle indique la moyenne des altitudes négatives se trouvant au dessous du plan Z=0. Ainsi, la droite M est déduite de la moyenne entre +M et -M. Dans ce cas, le paramètre calculé est Ra = 428.5 nm qui caractérise la rugosité du profile étudié.

C'est avec ce même processus que le paramètre de rugosité surfacique Sa est obtenu par rapport au plan moyen M. Le tableau II.9 donne les résultats de mesure sur les deux supports utilisés.

Tableau II.9 : Paramètres de l'analyse de surface des supports au microscope confocal.

Paramètres	***S1-téflon***	***S2-perspex***
Surface analysée (µm²)	127.32 × 95.45	127.32 × 95.45
Objectif	×100	×100
Sa (µm)	0.699	0.123

L'utilisation des deux supports dans les essais a permis d'établir la sensibilité de la mesure à la rugosité de la surface de contact matériau/support.

3- Programme d'essais :

Le tableau II.10 résume le programme des essais réalisés en dessiccation libre et leurs conditions expérimentales.

Tableau II.10 : Programme des essais de dessiccation libre.

Nom de l'essai (FD : free dessiccation)	T (°C)	HR (%)	Conditions de support et du mouchetis
FD-téfl	24.07	52.6	Mouchetis très dense + *S1-téflon*
FD-pers	22.6	55.3	Mouchetis très dense + *S2-perspex*
FD_{sm}-pers	22.4	59.05	Sans mouchetis (sm) + *S2-perspex*
FD_{mmd}-pers	22.6	58.8	Mouchetis moins dense (mmd) + *S2-perspex*

II.5.1.3 Dessiccation contrôlée

1- Système expérimental et acquisition d'images pendant l'essai :

Le système développé pour l'utilisation de la technique d'équilibre de vapeur est représenté sur la figure II.41. Ce dispositif est semblable à celui de la dessiccation libre. Cependant, afin de pouvoir imposer une valeur de succion, nous avons installé une chambre de contrôle confinée où sont introduits une solution saline et un hygromètre permettant de mesurer l'humidité relative et la température imposées. L'échantillon est mis en place à l'intérieur de cette chambre.

Pour ces essais, nous avons utilisé uniquement le support *S1-téflon*.

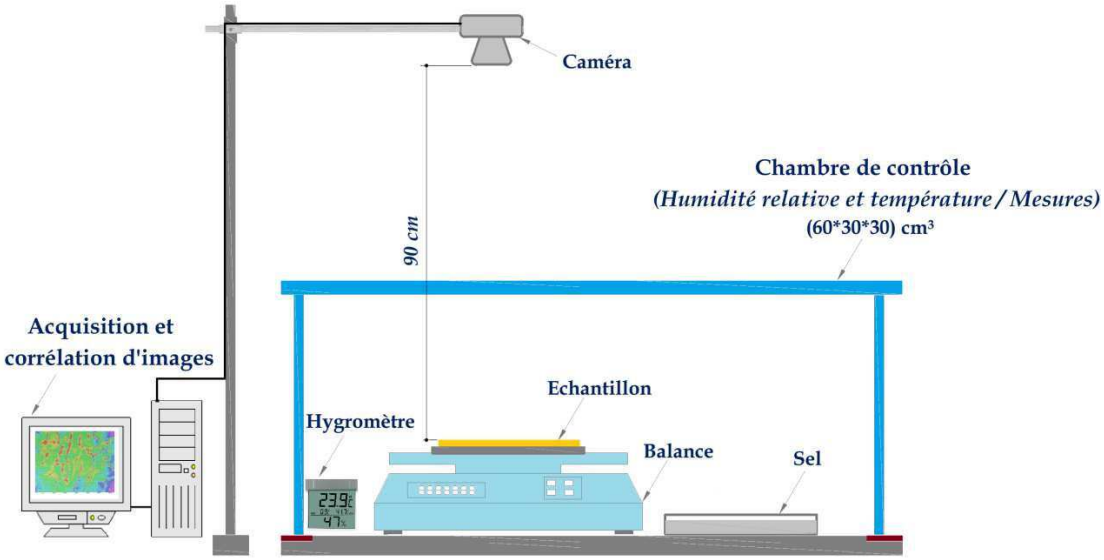


Figure II.41 : Schéma du dispositif expérimental de la technique d'équilibre de vapeur.

Les images sont prises par la caméra digitale à un intervalle régulier dépendant de la succion imposée (2 à 15 minutes).

La figure II.42 montre un exemple d'image sauvegardée au cours d'un essai de dessiccation contrôlée. Celle-ci montre la disposition des différents éléments contenus dans la chambre de contrôle et la surface de l'échantillon qui va être l'objet du traitement par corrélation d'images numériques.

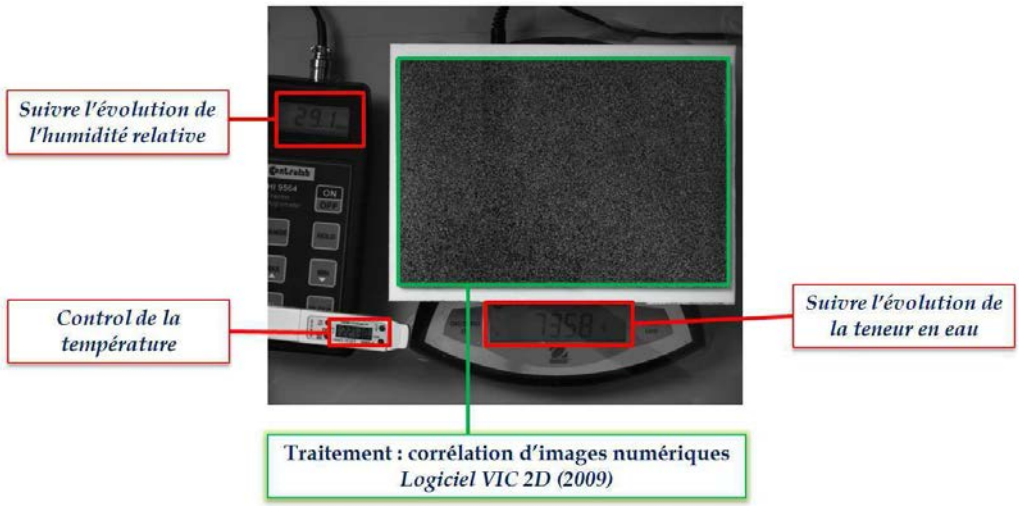


Figure II.42 : Exemple d'une image enregistrée au cours d'un essai de dessiccation contrôlée.

2- Choix des sels pour fixer la succion :

Afin que la technique d'équilibre de vapeur soit applicable, le choix des sels doit satisfaire deux conditions :

1- La première consiste à engendrer une incertitude de mesure sur la succion Δs_{glob} inférieure à 15% en utilisant la différentielle de l'équation II.16 (Delage et al., 1998).

$$d(u_a - u_w) = \frac{RT}{gM_w}\frac{d(HR\%)}{HR\%} \qquad [II.18]$$

2- La deuxième concerne la sensibilité de l'humidité relative aux fluctuations de la température au cours de l'essai. Comme la succion dépend de l'humidité relative (Eq. II.17). il faut choisir un sel pour lequel l'humidité relative imposée est la moins sensible aux fluctuations de la température.

Partant de cette base, nous avons fait le choix de trois sels permettant d'imposer différentes succions allant d'une valeur faible à une élevée.

Pour cela, nous avons utilisé trois sels :

- chlorure de sodium (NaCl), pour une valeur de la succion d'environ 38 MPa,

- carbonate de potassium (K_2CO_3), pour une valeur de la succion d'environ 110 MPa,

- hydroxyde de potassium (KOH), pour une valeur de la succion d'environ 361 MPa.

Nous avons réalisé, pour chaque sel, trois essais.

Le tableau II.11 présente les caractéristiques chimiques des différents sels ainsi que les dosages réalisés.

Tableau II.11 : Caractéristiques chimiques des solutions salines utilisées.

Solutions salines saturées				
Sels utilisés	**KOH**		**K_2CO_3**	**NaCl**
Masse volumique (g/cm3)	2.04		2.43	2,17
Masse molaire (g/mol)	56.11		138.21	58.44
Dosage	C1	C2	1 dosage	1 dosage
Masse du sel (g)	560	450	400	500
Volume d'eau (ml)	170	90	180	120
Concentration (mol/l)	22.454	25.824	8.395	24.415

La nomenclature adoptée pour les essais est formulée par :

***CD** (controlled desiccation)_**numéro d'essai** (1 à 3) - **valeur moyenne de s_{glob} (MPa)**.*

Ainsi dans le cas de la solution KOH nous avons réalisé un essai avec la concentration C1 (*CD1-s234*), et deux essais avec la concentration C2 (*CD2-s361* et *CD3-s361*).

Les mesures de température et d'humidité relative effectuées au cours du séchage et les succions obtenues pour l'ensemble des essais sont présentées dans le tableau II.12.

Les incertitudes de mesure de l'humidité relative ΔHR et de calcul de la succion Δs_{glob} sont indiquées en rouge. ΔHR est pris égale à 2% sur la base des résultats obtenus dans Delage et al. (1998). Les auteurs avaient comparé les différentes valeurs d'humidité relative données par différentes sources. Les résultats ont montré que la majorité des différences sont comprises entre 1 et 2%. Ainsi, nous avons choisi de prendre le maximum d'incertitude soit ΔHR= 2%. D'autre part, l'incertitude sur la succion Δs_{glob} est calculée à partir de l'équation II.18.

Tableau II.12 : Valeurs de température et d'humidité relative obtenues pour chaque essai.

CD : controlled desiccation		**Température (°C)**	**Humidité relative (%) ± 2%**	**Succion (MPa)** $s_{glob} \pm \Delta s_{glob}$
Sel utilisé	Nom de l'essai			
KOH	CD1-s234	21.7	17.9	234 ± 6.6%
	CD2-s361	20.7	6.9	362 ± 11%
	CD3-s361	22	7.1	360 ± 11%
K2CO3	CD1-s110	22.7	45.8	106 ± 5.7%
	CD2-s110	25.8	44.7	111 ± 5.7%
	CD3-s110	26	44.7	111 ± 5.7%
NaCl	CD1-s38	24.5	75.5	38 ± 9.8%
	CD2-s38	23	75.9	37 ± 10%
	CD3-s38	25.7	75.6	38 ± 9.8%

La première condition est vérifiée puisque l'incertitude maximale obtenue sur la succion est Δs_{glob} = 11% <15%.

Pour la deuxième condition, nous avons choisi de comparer ces valeurs à celles proposées par Delage et al. (1998).

L'étude comparative est présentée en figure II.43, elle montre que les valeurs de l'humidité relative ne sont pas affectées par les fluctuations (légères) de la température.

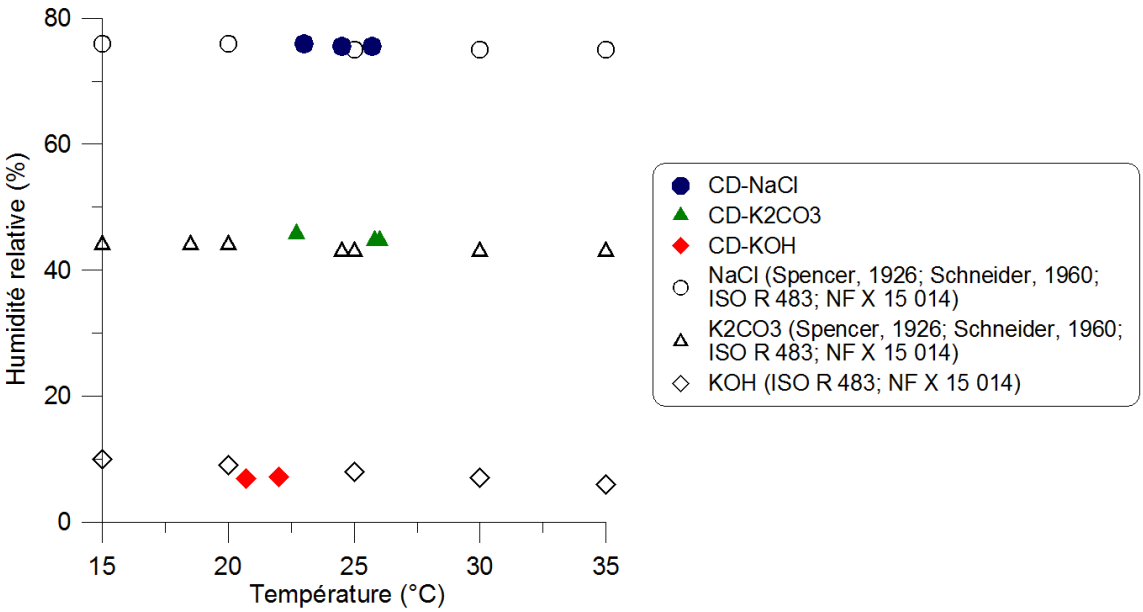


Figure II.43 : Sensibilité de l'humidité relative aux fluctuations de la température (Delage et al., 1998).

Les deux conditions, sur l'incertitude de la succion et sur la sensibilité de l'humidité relative aux variations possibles de la température, sont vérifiées pour les sels que nous avons choisis. Notre système permet donc l'utilisation de la technique d'équilibre de vapeur.

II.5.2. Méthode de corrélation d'images numériques

1- Principe de la méthode CIN :

L'utilisation de la corrélation d'images numériques requière une installation adéquate composée principalement d'une caméra digitale placée frontalement par rapport à l'échantillon étudié. Elle est connectée à un PC de pilotage, muni du logiciel de calcul Vic-2D qui assure la sauvegarde et le traitement des images.

Nous avons adapté cette installation à nos dispositifs expérimentaux permettant la réalisation des essais de dessiccation libre et contrôlée respectivement Fig. II.35 et Fig. II.41.

La figure II.44 représente le schéma de configuration expérimentale de la CIN et un organigramme des différentes étapes.

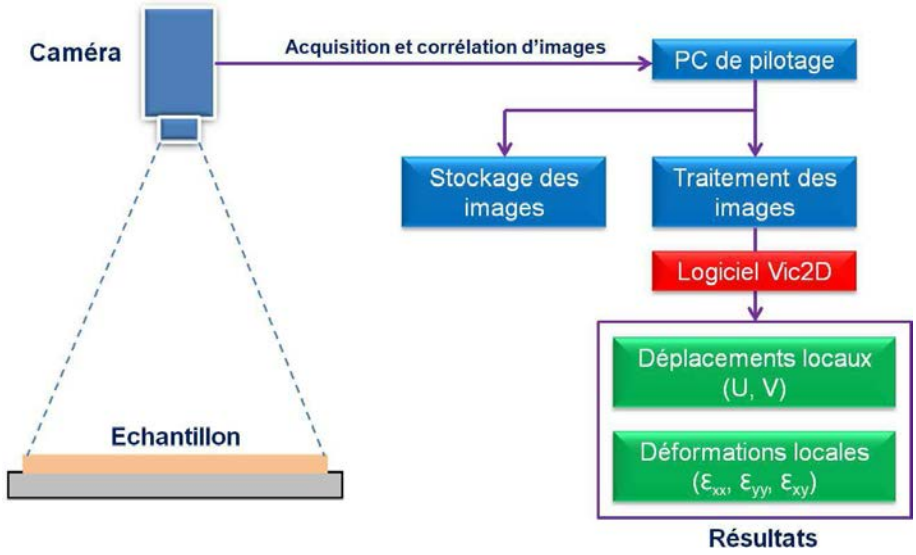


Figure II.44 : Organigramme des étapes de mesures par la corrélation d'images.

La technique de la CIN consiste à appairer deux images numériques représentant la surface plane d'un échantillon, sous sollicitation quelconque, à deux états distincts de déformation : un "état de référence" et un "état déformé". Dans cette étude, la déformation est due à une sollicitation hydrique (dessiccation).

L'intensité de la lumière réfléchie par l'échantillon peut être stockée comme un ensemble de numéros ou niveaux de gris dans le PC de pilotage (Sutton et al., 1986). Ces valeurs d'intensité sont sauvegardées dans des tableaux de taille standard de 512×512. Chaque valeur d'intensité est convertie, par des capteurs, en un nombre compris entre 0 et 255 (0 représente une intensité lumineuse nulle).

Remarque : le principe de la méthode de CIN est décrit plus en détail dans l'annexe 1.1.

2- Le logiciel Vic-2D :

Vic-2D assure le traitement des images enregistrées au cours du séchage. Dans un premier temps, l'opération consiste à définir les paramètres de calcul qui sont la calibration de l'échelle, le *Sebset et le Step.*

La calibration de l'échelle consiste à mettre en équivalence les valeurs en pixels renvoyées par le logiciel Vic-2D et les dimensions physiques (exprimées en millimètre ou en inches).

La figure II.45 représente un exemple de calibration d'échelle sur la longueur de l'échantillon soit 190 mm. En effet, la calibration s'effectue sur l'image de référence, la première image avant le début de séchage. Le principe consiste à sélectionner la distance par la ligne rouge (Fig. II.45) et introduire sa valeur en millimètre par exemple. Ainsi, la calibration est faite en indiquant l'équivalent en millimètre de chaque pixel de la surface à traiter par la CIN délimitée par le cadre bleu en Fig. II.45. En l'occurrence, dans ce cas, chaque pixel correspond à 0.11 mm.

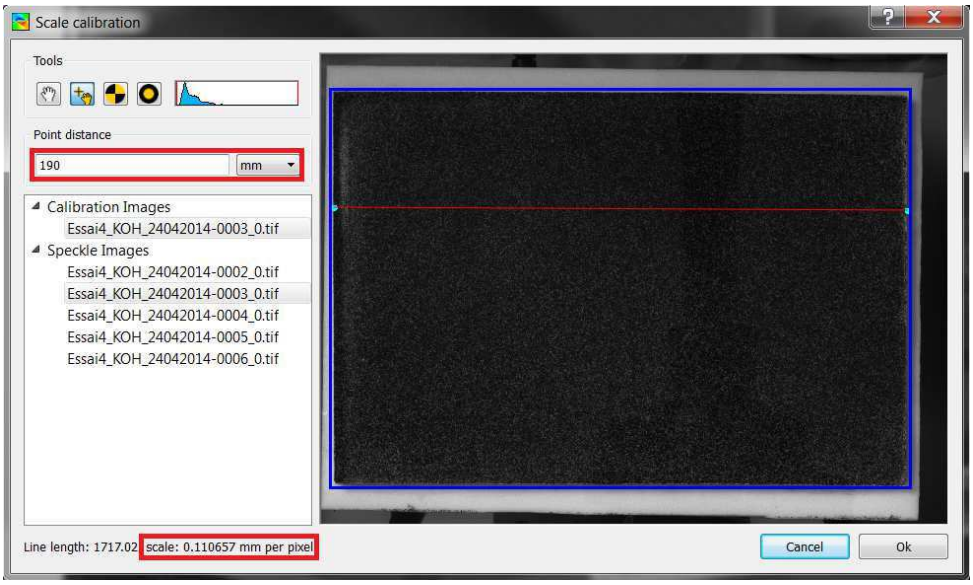


Figure II.45 : Calibration de l'échelle sur le logiciel Vic-2D.

Les deux autres paramètres servent à optimiser le calcul.

- Le premier, appelé *Sebset*, concerne la taille d'un sous-ensemble de l'image (Fig. II.46) permettant de suivre le déplacement entre les images. Le choix de la valeur du Sebset est conditionné par la densité du mouchetis appliqué. Il faut choisir une taille qui assure un motif suffisamment distinctif à l'intérieur du sous-ensemble.

- Le deuxième paramètre, appelé *Step*, contrôle le pas (1 à 5 pixels) entre les points inclus dans la zone de l'image sélectionnée et analysée par la corrélation. Le *Step* conditionne le temps de calcul, un pas de 1 pixel mettrait 25 fois plus de temps qu'un pas de 5 pixels pour effectuer l'analyse.

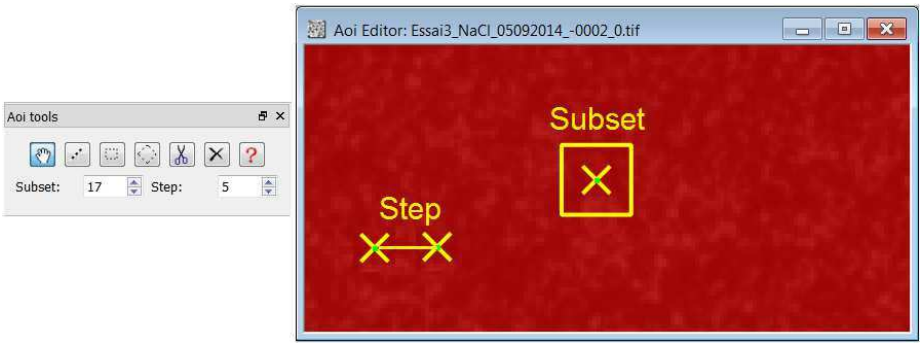


Figure II.46 : Choix des paramètres de calcul avec Vic-2D.

Dans cette étude, nous avons analysé une surface d'image de 1720×1170 pixels avec un *Sebset* de 17 pixels et un *Step* de 5 pixels.

II.5.3. Validation

Cette partie comprend les choix du mouchetis et de la lumière ainsi que l'influence de la chambre de dessiccation.

II.5.3.1 Influence du mouchetis et lumière

a- Mouchetis :

Le mouchetis est un paramètre qui permet de définir la sensibilité du phénomène observé. Pour la même configuration de séchage libre et les mêmes paramètres d'analyse, deux densités de mouchetis sont comparées en figure II.47.

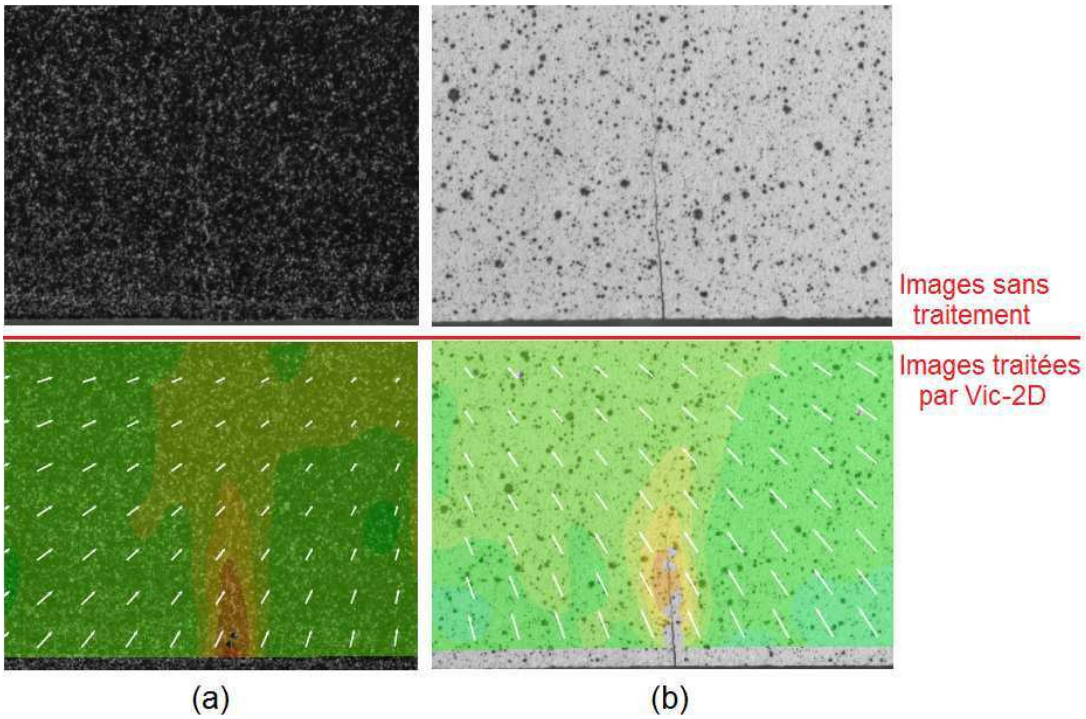


Figure II.47 : Choix du mouchetis : (a) mouchetis très dense, (b) mouchetis faiblement dense.

La densité du mouchetis influence directement l'analyse. Ainsi, pour pouvoir décrire le plus finement possible les mécanismes de fissuration, nous avons choisi de densifier le mouchetis avec une taille des tâches très réduite et homogène.

b- Lumière :

L'éclairage du système expérimental de dessiccation est assuré par l'utilisation d'un projecteur à LED 20W (marque Kilonewton) fixé sur un trépied (Fig. II.48).

Figure II.48 : Disposition et orientation de l'éclairage sur le système expérimental de la dessiccation.

Le type d'éclairage appliqué est une lumière diffuse de source blanche pour tenir compte du spectre de sensibilité des capteurs de la caméra noir et blanc. Ainsi les différents niveaux de gris sont clairement distingués sur les photographies enregistrées via le logiciel Vic-Snap 2010.

La diffusion de la lumière est obtenue par le biais d'un parapluie blanc qui permet à la lumière d'être répandue largement dans toutes les directions.

II.5.3.2 Transparence de la chambre de dessiccation vis-à-vis des mesures

Il s'agit, dans cette partie, de vérifier que la vitre supérieure de la chambre de dessiccation dans les essais de dessiccation contrôlée (Fig. II.41) n'influence pas le traitement et le calcul de la CIN.

Pour cela nous avons mené deux séries de mesures, avec et sans vitre, selon le programme schématisé sur la figure II.49 avec les mêmes conditions d'éclairage et de mouchetis.

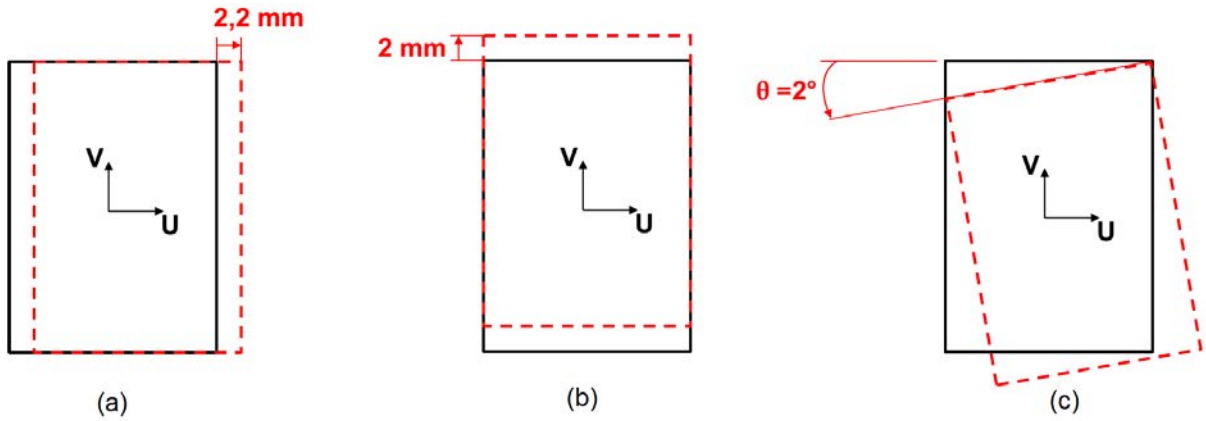


Figure II.49 : Déplacements et rotation imposés à l'échantillon.

L'essai consiste à appliquer au même échantillon, préparé dans les mêmes conditions décrites dans II.5.1.2 (§ préparation de l'échantillon), séparément :

- une translation U=2.2 mm dans le sens transversal (Fig. II.49 a),

- une translation V=2 mm dans le sens longitudinal (Fig. II.49 b),

- une rotation θ=2° par rapport à l'axe U (Fig. II.49 c).

La figure II.50 montre l'exemple du champ de déformation longitudinale ε_{xx} obtenu dans le cas de la rotation (Fig. II.49 c), avec et sans vitre. Pour cela, une surface d'image de 1720×1170 pixels a été traitée via Vic-2D avec un *Sebset* de 17 pixels et un *Step* de 5 pixels. Les vecteurs de couleur blanche indiquent la direction du déplacement.

Les autres résultats de cette vérification sont donnés en annexe 1.2.

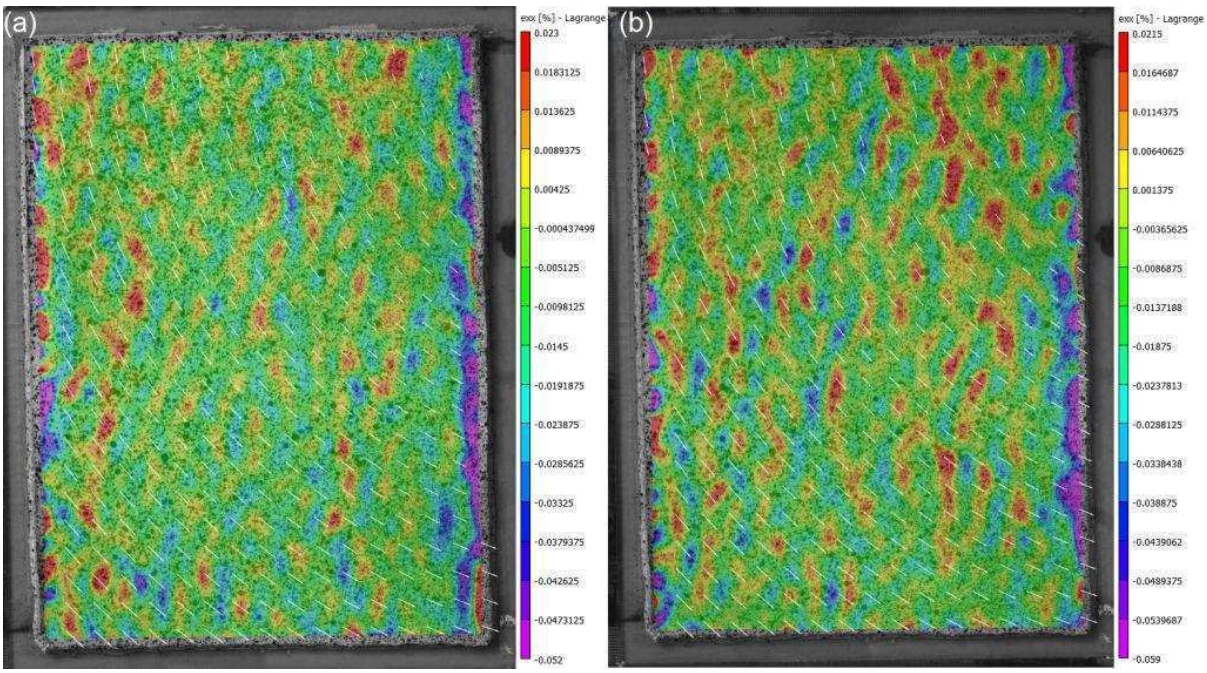


Figure II.50 : Déformations ε_{xx} dans le cas de la rotation : (a) sans vitre, (b) avec vitre.

Les valeurs maximale (en rouge) et minimale (en violet) des déplacements locaux et des déformations locales mesurées par le logiciel Vic-2D (Fig. II.50) sont présentées dans le tableau II.13.

Tableau II.13 : Mesures de déplacement et déformations locaux avec et sans vitre.

Configurations (Fig. II.51)		**Déplacements locaux**		**Déformations locales**		
		U (mm)	V (mm)	ε_{xx} (%)	ε_{yy} (%)	ε_{xy} (%)
A	Sans vitre	2.276 2.216	0.070 -0.019	0.028 -0.040	0.021 -0.029	0.023 -0.016
	Avec vitre	2.253 2.199	0.024 -0.009	0.032 -0.042	0.093 -0.092	0.027 -0.025
B	Sans vitre	0.006 -0.015	2.012 1.991	0.031 -0.034	0.019 -0.023	0.034 -0.029
	Avec vitre	0.001 -0.018	2.025 1.996	0.033 -0.054	0.224 -0.170	0.032 -0.026
C	Sans vitre	2.490 0.310	-0.860 -2.480	0.023 -0.052	0.015 -0.044	0.030 -0.021
	Avec vitre	2.510 0.310	-0.860 -2.490	0.021 -0.059	0.074 -0.074	0.028 -0.024

Les résultats obtenus montrent que la vitre n'affecte pas les mesures du champ des déplacements. En revanche, la présence de la vitre semble avoir un léger effet sur les mesures des déformations, ε_{yy} en particulier dans la configuration B (Fig. II.49 b).

Par ailleurs, les déplacements imposés dans les deux directions transversale (U=2.2 mm en Fig. II.49 a) et longitudinale (V=2 mm en Fig. II.49 b) sont très proches de ceux mesurés par le logiciel Vic-2D (valeurs en bleu dans le tableau II.13).

II.6. Essai de traction indirecte par flexion

Cette partie consiste à présenter le dispositif expérimental utilisé dans les essais de flexion. La confection et le conditionnement des éprouvettes d'argile sont également décrits dans cette partie.

II.6.1. Dispositif expérimental et principe de fonctionnement

Le dispositif expérimental utilisé pour les essais de flexion a été conçu et développé au laboratoire LEM3 par Katti (2012) dans le cadre de son stage de fin d'étude.

Le montage, présenté sur la figure II.51, a été spécialement adapté pour appliquer une flexion sur de petites poutrelles d'argile ou de roche de dimensions standardisées (35×10×10 mm^3).

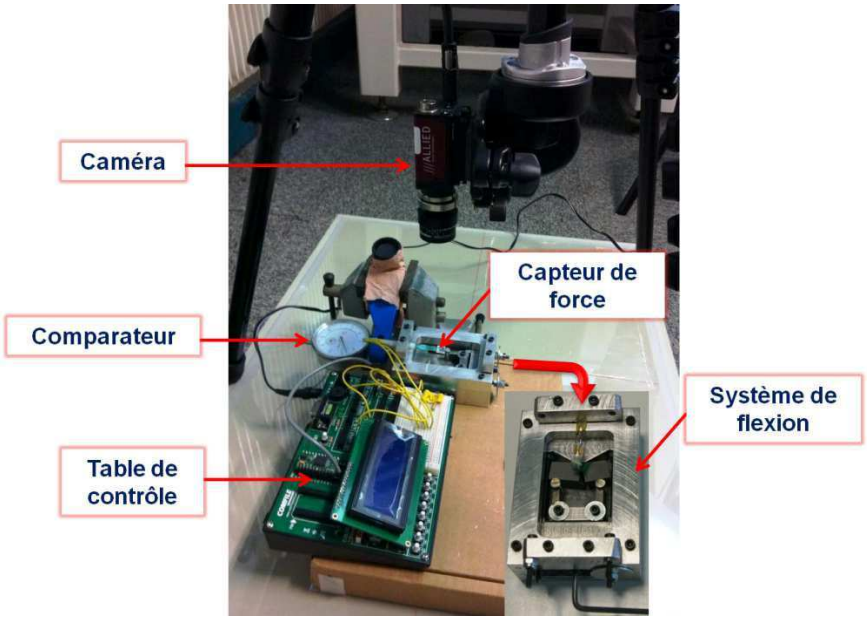


Figure II.51 : Photographie du dispositif expérimental des essais de flexion.

Le dispositif est composé principalement de quatre éléments :

- une caméra digitale pour l'analyse par corrélation d'images,
- un comparateur pour permettre la lecture du déplacement,
- le système de flexion,
- une boite d'acquisition équipée d'un capteur de force.

La figure II.52 présente le principe de fonctionnement du dispositif de flexion.

L'essai est mis en marche en tournant la vis de déplacement qui se traduit par la translation du cadre mobile, munie d'un capteur de force à une extrémité, sur lequel est fixé comparateur.

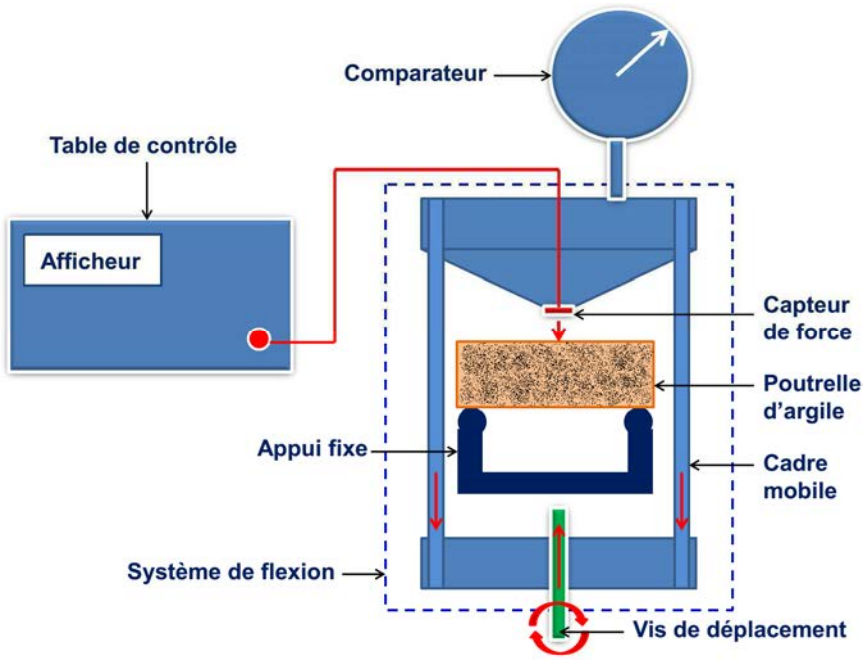


Figure II.52 : Principe de fonctionnement du système de flexion.

Le cadre mobile vient au contact de la poutrelle en appuyant sur le capteur de force. Le capteur de force renvoie la valeur de la tension qui s'affiche sur la table de contrôle.

Dès que le capteur de force se met au contact de l'échantillon l'essai commence. Il consiste à appliquer un déplacement avec un pas de 0.01 mm et à enregistrer les valeurs de tension d'une part, et des images sont d'autre part capturées par la caméra au cours de l'essai sur la surface supérieure de la poutrelle.

II.6.2. Préparation des échantillons

Les échantillons sont des poutrelles parallélépipédiques de dimensions (35×10×10) mm^3 ayant été préalablement soumis à une succion imposée.

Avant d'imposer la succion, les poutrelles sont découpées d'une carotte d'argile saturée et préconsolidée, de type P1 (Fig. II.3) décrite dans la partie II.1.2.

1- Découpe des échantillons :

La figure II.53 représente le processus de découpe des poutrelles suivant deux plans d'analyse :

- un plan vertical (V), dans le même sens que le chargement vertical de la préconsolidation.

- un plan horizontal (H) perpendiculaire à la direction du chargement de la préconsolidation.

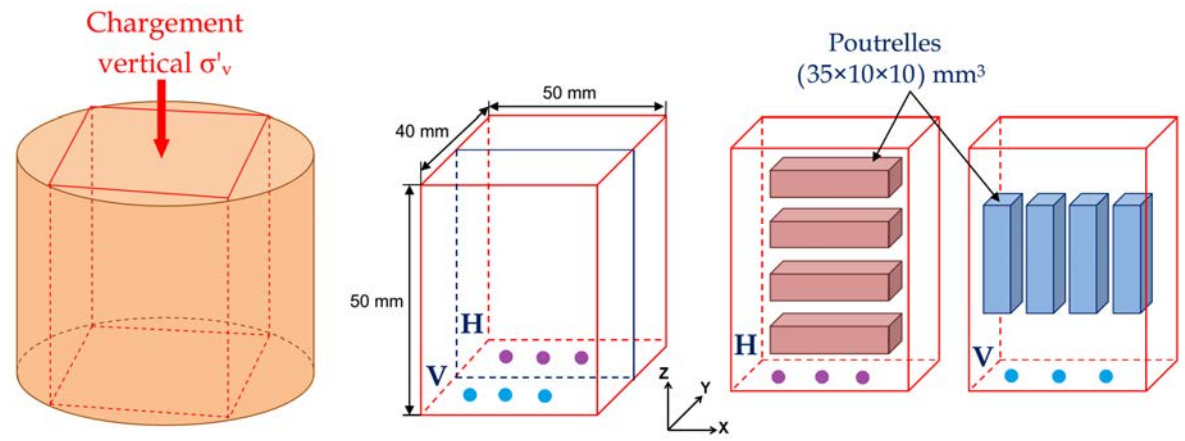


Figure II.53 : Schéma de découpe des poutrelles d'argile.

2- Imposition de succion :

Afin d'imposer une succion aux échantillons d'essai, les poutrelles découpées suivant le protocole ci-dessus sont conditionnées dans des dessiccateurs sous vide (Fig. II.54) et en présence de solution saline saturée.

Les mêmes solutions salines que celles utilisées dans les essais de dessiccation contrôlée (partie II.5.1.3, tableau II.11) ont été utilisées.

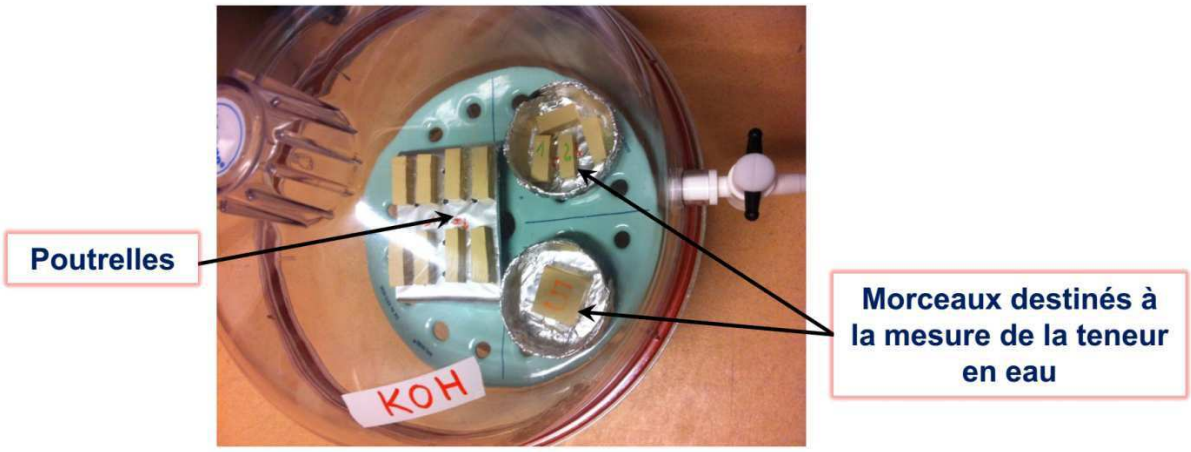


Figure II.54 : Imposition de la succion aux poutrelles découpées et aux échantillons destinés à la mesure de la teneur en eau dans le dessiccateur.

Quatre autres petits échantillons, découpés à partir de la même carotte de la figure II.55, sont posés à l'intérieur des coupelles circulaires et introduits dans le même dessiccateur que les poutrelles (Fig. II.54). Ces petits échantillons vont servir à mesurer la teneur en eau des poutrelles pendant le processus d'imposition de la succion. La mesure est effectuée chaque 24h par la double pesée.

La figure II.55 montre l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps des poutrelles sous forte succion imposée (361 MPa). Les résultats montrent une stabilisation de la teneur en eau pour les quatre mesures après 3 jours d'exposition à la succion imposée.

Pour les deux autres cas de succion imposée (110 MPa et 38 MPa), les variations de la teneur en eau des poutrelles sont reportées dans l'annexe 1.3.

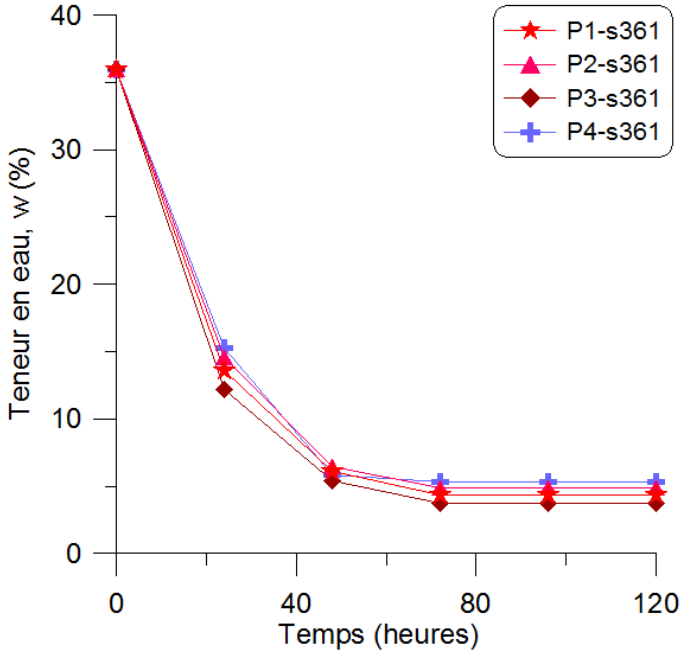


Figure II.55 : Evolution de la teneur en eau des poutrelles en fonction du temps d'exposition à la succion imposée (361 MPa).

Lorsque la phase de conditionnement est achevée, on réalise un mouchetis (par vaporisation d'une peinture aérosol de couleur noire) sur la surface de la poutrelle pour la CIN durant l'essai de flexion.

La figure II.56 montre un exemple de poutrelle mise en place dans le dispositif de flexion sur laquelle on a appliqué un mouchetis en adéquation avec les recommandations adoptées pour les essais de dessiccation (partie II.5.3.1 § a- mouchetis).

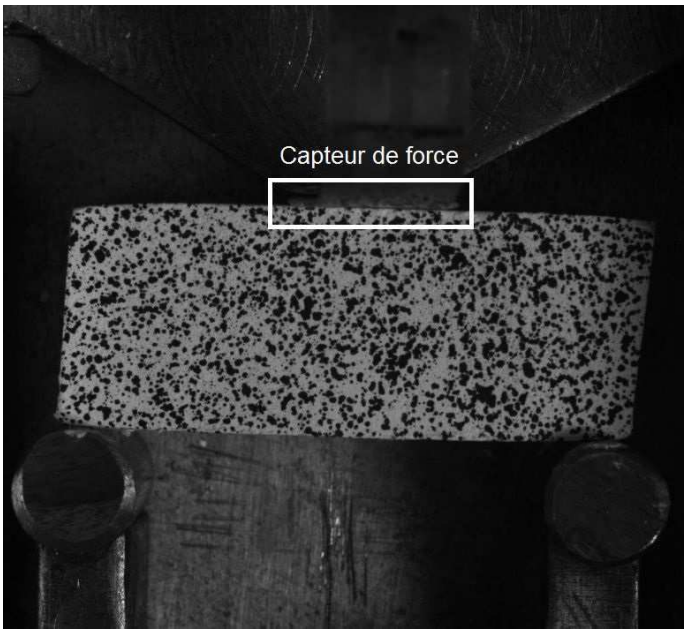


Figure II.56 : Exemple de mouchetis appliqué sur une poutrelle montée sur le dispositif de flexion.

II.6.3. Calibration du capteur de force

Le capteur de force est collé sur le cadre mobile du dispositif de flexion (Fig. II.58). Il permet, comme cela est expliqué plus haut, d'évaluer l'effort appliqué sur la poutrelle d'argile.

Le capteur, de type FSR1 (Lextronic), a une zone de détection de 6 mm de diamètre, ce qui facilite l'adaptation à notre dispositif. Ses dimensions ainsi que ses éléments constituants sont représentés sur la figure II.59.

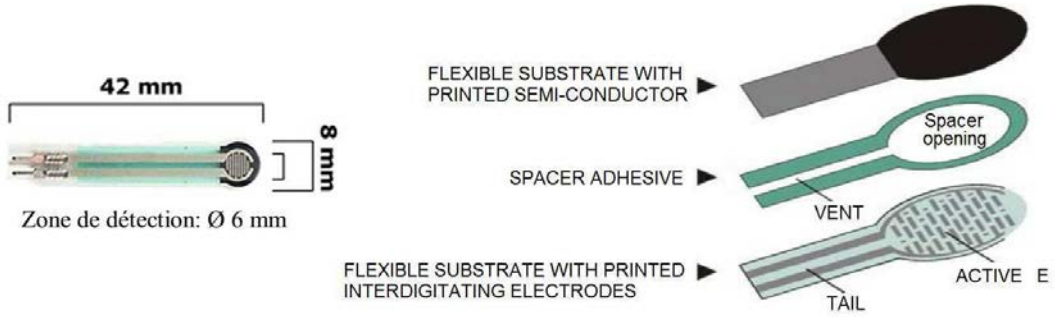


Figure II.57 : Caractéristiques du capteur de force FSR1 (Lextronic).

Lorsque le capteur de force est sollicité, il renvoie une valeur de tension T (Volts) à l'afficheur de la table de contrôle. Afin de convertir la tension en force F (Newton), des mesures de calibration ont été réalisées par différents opérateurs (Katti, 2012).

Le principe d'étalonnage du capteur FSR1, dont le système utilisé est présenté sur la figure II.58, consiste à le charger directement avec des poids étalons successifs, de masse connue, et de noter la tension correspondante disponible sur l'afficheur. Une fois le maximum de tension atteint (4 volts), un processus de déchargement des poids étalons et effectué en notant à chaque décharge la tension correspondante. Ainsi, nous obtenons une courbe d'étalonnage exprimée en termes de tension en fonction de la masse appliquée (force) sur un cycle de chargement-déchargement.

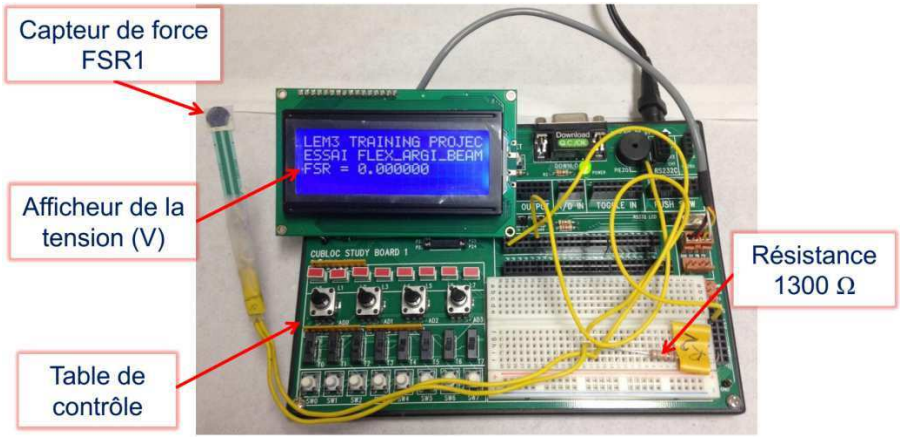


Figure II.58 : Photographie de la table de contrôle électronique utilisée pour l'étalonnage du capteur de force FSR1.

La figure II.59 présente les courbes de variation de la tension en fonction de la force appliquée sur le capteur en chargement-déchargement.

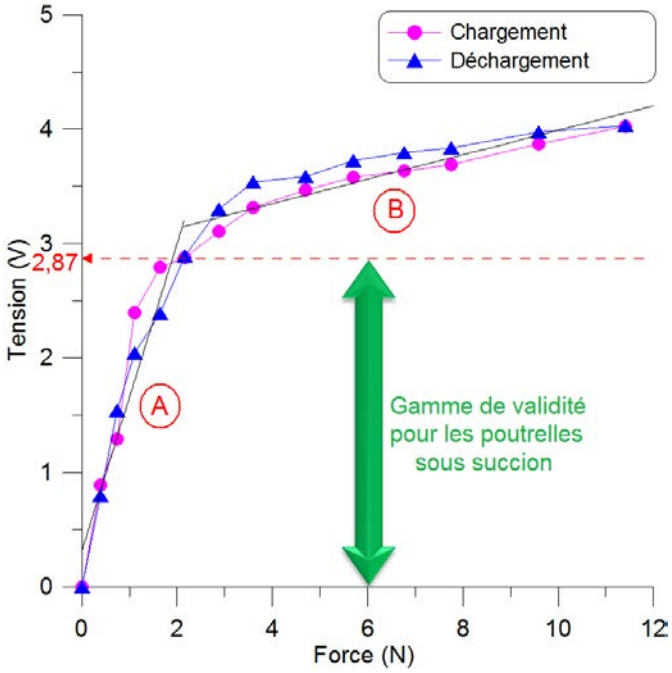


Figure II.59 : Courbes de calibration du capteur de force FSR1.

Les courbes montrent deux régions, où la variation est linéaire, identifiées par les droites A ($T < 2.87$ volts) et B ($T \geq 2.87$ volts).

Les équations de ces droites (Eq. II.29) permettent de définir la conversion de la tension (Volts) en force (Newtons) pour les essais de flexion.

$$\begin{cases} T = 1.344F + 0.309 \rightarrow (A) \\ T = 0.107F + 2.92 \rightarrow (B) \end{cases} \quad [II.29]$$

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les propriétés du matériau et les différentes techniques expérimentales qui seront employées dans la suite de cette étude.

- La méthodologie adoptée pour la confection des éprouvettes consolidées à partir d'un état initial de boue a été décrite.

Trois systèmes expérimentaux, entièrement développés au laboratoire, ont été présentés :

- Le premier, basé sur la technique d'insertion-substitution, permet d'effectuer des mesures acoustiques post-mortem sur des échantillons d'argile saturée. La validation de ce dispositif a été vérifiée par confrontation aux résultats des essais oedométriques.

- Le deuxième, basé sur la méthode de corrélation d'images numériques (CIN), permet de mesurer le champ des déplacements de l'argile au cours du séchage libre et contrôlé.

- Le troisième, basé sur la méthode de la flexion élastique, permet de réaliser des essais de traction indirecte par flexion sur des poutrelles d'argile, préalablement soumises à différentes succions initiales.

Chapitre III

Comportement mécanique de l'argile sur chemin triaxial

Chapitre III. Comportement mécanique de l'argile sur chemin triaxial

Sommaire :

Introduction……..164

III.1. Loi expérimentale phénoménologique sous différents chemins de contrainte…165

III.1.1. Chemins isotropes - Caractéristiques intrinsèques Cc, Cs……...165

III.1.2. Chemins à σ'_3=constante……166

III.1.3. Chemins à p'=constante……174

III.1.4. Discussion et comparaison entre les deux chemins triaxiaux……..180

III.2. Identification des propriétés élastiques par propagation d'onde ultrasonore en fonction du niveau de contrainte……191

III.2.1. Evolution de la vitesse d'onde V_p sur différents chemins triaxiaux……...191

III.2.2. Propriétés élastiques du niveau de contrainte fixe P2 - Influence du chemin de contrainte sur les propriétés élastiques du niveau P2……207

III.2.3. Effet de l'endommagement et du processus de rupture sur les propriétés élastiques……212

III.2.4. Discussion……215

Conclusion……216

Introduction

Ce chapitre est consacré à la caractérisation des propriétés élastiques de l'argile à différents niveaux de contrainte, et différents chemins de contrainte, par la méthode de propagation d'ondes ultrasons.

Le premier volet du chapitre concerne l'étude expérimentale du comportement de l'argile sur chemins triaxiaux. Il s'agit de réaliser des essais triaxiaux normalement consolidés et surconsolidés, en conditions drainées, avec des chemins à σ'_3 = constante et des chemins purement déviatoriques à p' = constante. Parmi ces essais, certains ont été effectués pour atteindre, suivant différents chemins, le même niveau de contrainte. Pour l'analyse du comportement en surconsolidé, nous avons choisi trois degrés de surconsolidation OCR = 3.3; 4 et 5 à partir d'une contrainte de consolidation p'_{ic} = 1000 kPa.

Le deuxième volet, dédié à l'identification des propriétés élastiques, intervient à la fin du chargement triaxial, après l'extraction de l'éprouvette d'argile de la cellule. Le protocole au complet est présenté sur la figure III.1.

Nous avons ensuite mené une série de mesures de la vitesse d'onde de compression sur des échantillons découpés suivant le schéma représenté sur la figure III.1 (b).

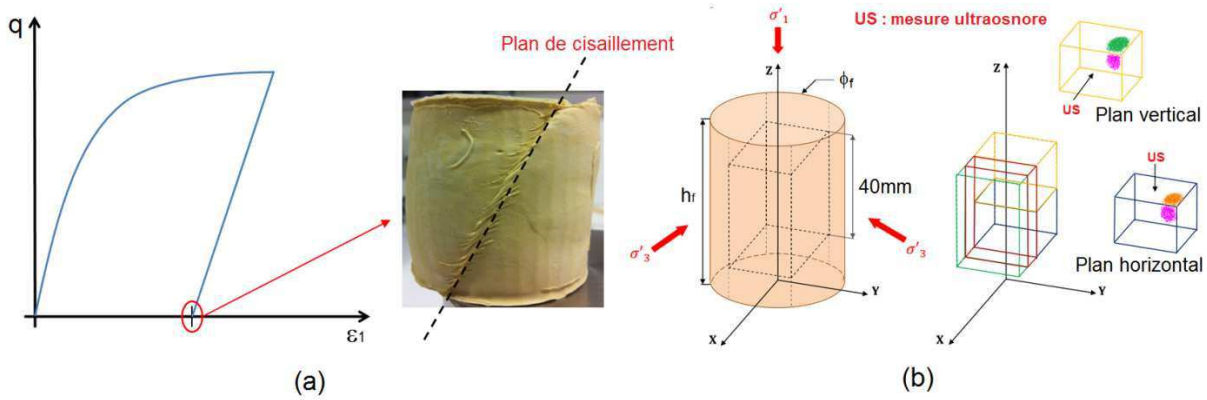


Figure III.1 : Mesure ultrasonore à la fin du chargement triaxial : (a) état final de l'éprouvette après déchargement triaxial, (b) découpe des échantillons pour les mesures ultrasons.

Les résultats de cette deuxième partie permettent de caractériser les propriétés élastiques du matériau après chargement triaxial, ainsi que leur évolution en fonction des chemins et des niveaux de contrainte.

III.1. Loi expérimentale phénoménologique sous différents chemins de contrainte

III.1.1. Chemins isotropes - Caractéristiques intrinsèques Cc, Cs

Les chemins de chargement et déchargement isotropes sont réalisés durant la phase de consolidation isotrope présentée dans le chapitre II.

Le calcul de la variation de l'indice des vides, avec [III.1] et [III.2], est fait à partir des variations de volume engendrées durant le chargement (notées $\Delta V_{0i,ch}$) et le déchargement (notées $\Delta V_{0i,déch}$) isotropes.

$$e_{0i,ch} = e_{00} - (1 + e_{00}).\frac{\Delta V_{0i,ch}}{V_{00}} \qquad [III.1]$$

$$e_{0i,déch} = e_{0f} - (1 + e_{0f}).\frac{\Delta V_{0i,déch}}{V_{0f}} \qquad [III.2]$$

V_{00} et e_{00} représentent respectivement le volume et l'indice des vides à l'état initial, V_{0f} et e_{0f} correspondent au volume et à l'indice des vides à la fin du chargement isotrope.

Remarque : Le chemin de chargement isotrope [III.1] est effectué en vue de réaliser un chemin triaxial normalement consolidé. En revanche, lorsqu'il s'agit de chemin triaxial surconsolidé, les deux chemins de chargement [III.1] et de déchargement [III.2] isotropes sont requis.

La figure III.2 représente sur le plan (e - logp') les variations de l'indice des vides en chargement et déchargement isotropes en fonction de la contrainte effective moyenne. Ces variations sont, sur le plan (e - logp'), linéaires sur les deux chemins isotropes. La pente est calculée sur chaque chemin expérimental, elle est notée Cc sur le chemin de chargement et Cs sur le chemin de déchargement. On peut donc énoncer que :

$$\begin{cases} C_c = -\dfrac{\Delta e_{ch}}{\Delta \log p'} \\ C_s = -\dfrac{\Delta e_{déch}}{\Delta \log p'} \end{cases} \qquad [III.3]$$

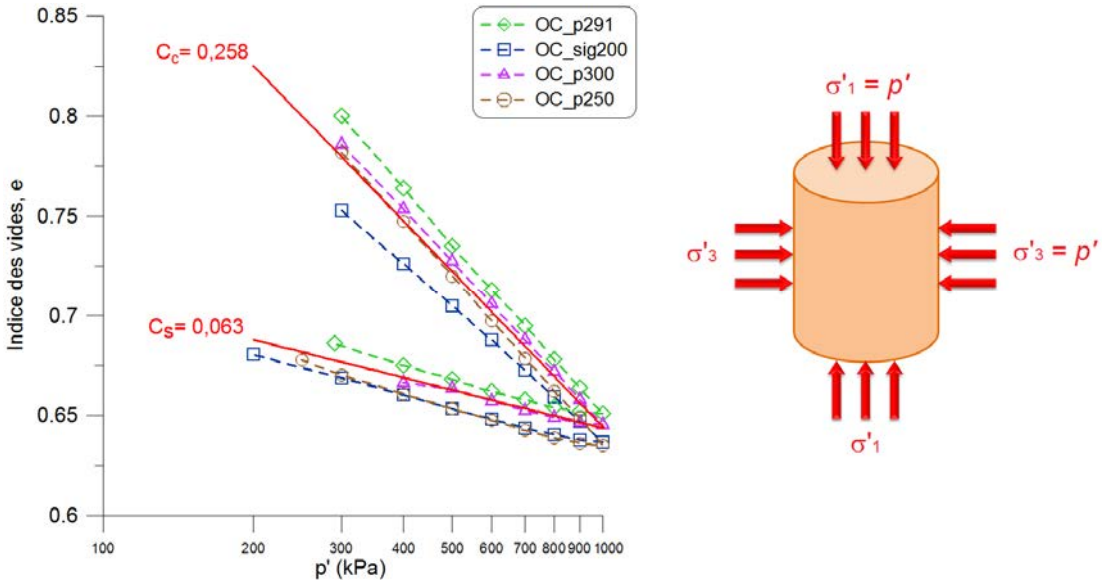


Figure III.2 : Evolution de l'indice des vides sur chemin isotrope.

Cc et Cs sont des valeurs intrinsèques au matériau, elles sont appelées respectivement indice de compression et indice de gonflement. Ils sont calculés à partir de la moyenne des indices obtenus pour chacune des courbes expérimentales.

Nous trouvons un indice de compression Cc_{moy} = 0.258, ce qui est proche de la valeur donnée par les corrélations de Biarez et Hicher (1994) correspondante à $Cc_{corrélation}$ = 0.243, calculée à partir de l'équation III.4. Pour la kaolinite les limites de liquidité et de plasticité sont respectivement w_L = 40% et w_p = 20%.

$$C_c = 0,009\,(w_L - 13) \qquad [III.4]$$

L'indice de gonflement Cs_{moy} est égal à 0.063. On constate que le rapport Cc/Cs = 4.1, ce qui est concordant aux valeurs prévues par la corrélation proposée par Biarez et Hicher (1994) (cas des argiles remaniées Cc/Cs = 4.1 à 6).

III.1.2. Chemins à σ'_3=constante

Nous avons réalisé différents chemins triaxiaux à σ'_3=constante en normalement consolidé et en surconsolidé. Les chemins se caractérisent par la valeur de la contrainte de consolidation p'_{ic} et également par le degré de surconsolidation OCR.

L'essai consiste à maintenir la contrainte radiale σ'_3 constante tout en augmentant la contrainte axiale σ'_1 engendrée par le déplacement de la base mobile à une vitesse imposée constante jusqu'à la rupture.

Le calcul de la vitesse d'écrasement, décrit dans le chapitre II (partie II.4.2), dépend du matériau étudié. Dans le cas du kaolin K13, elle est égale à V_{max} = 7.56×10^{-3} mm/min.

La figure III.3 représente l'état de contrainte imposé à l'éprouvette sur un chemin à σ'_3=constante.

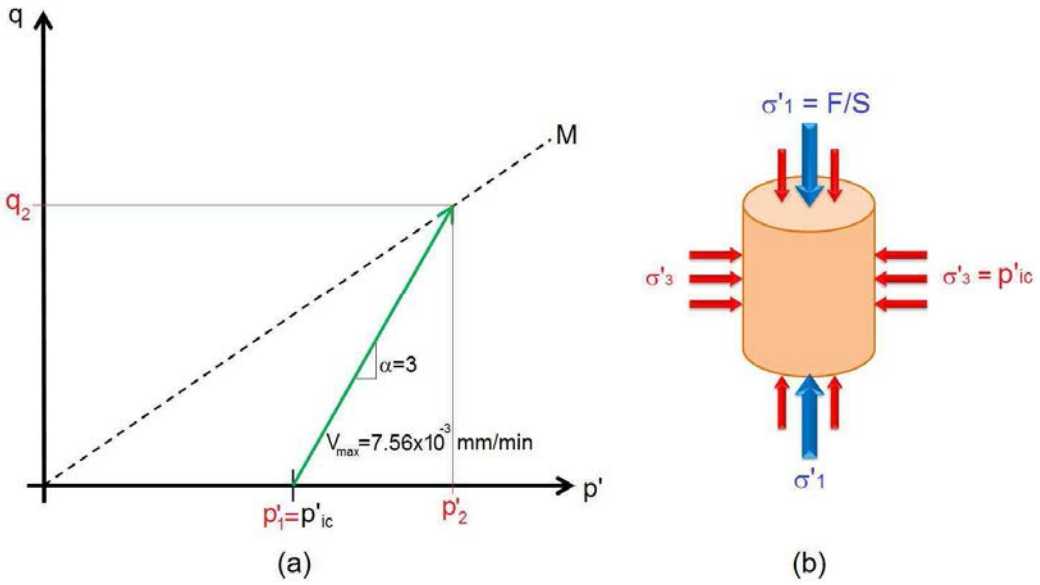


Figure III.3 : Etat de contrainte dans un chemin triaxial à σ'_3=constante.

III.1.2.1 Comportement normalement consolidé à σ'_3=constante

Cinq chemins à σ'_3=constante ont été réalisés en normalement consolidé à différentes contraintes de consolidation p'_{ic} avec une contre pression CP maintenue à 200 kPa. Parmi ces essais, un a été conduit jusqu'à un niveau de contrainte, fixé en dessous de l'état critique, désigné par P2. D'autre part, notons que l'essai NC-sig200 a été effectué deux fois (a et b). Le tableau III.1 présente les différentes caractéristiques de ces essais.

Tableau III.1 : Caractéristiques des essais σ'_3=constante normalement consolidés.

Nom de l'essai	p'_{ic} (kPa)	Indice des vides		
		Etat initial e_{00}	Fin de la consolidation isotrope e_0	Etat final e_f
NC-sig200$_a$	200	0.942	0.816	0.737
NC-sig200$_b$	200	0.924	0.758	0.695
NC-sig250	250	0.961	0.614	0.533
NC-sig250$_{P2}$	250	0.921	0.790	0.766
NC-sig290	290	0.966	0.805	0.724

Le comportement de l'argile est analysé à partir des quatre plans représentés sur la figure III.4 :

- [q - ε_1] : caractérise l'évolution du déviateur en fonction de la déformation axiale,

- [ε_v - ε_1] : caractérise l'évolution de la déformation volumique en fonction de la déformation axiale,

- [q - p'] : caractérise les chemins des contrainte,

- [e - log p'] : représente l'évolution de l'indice des vides en fonction de la contrainte effective moyenne.

Les essais montrent que les variations du déviateur en fonction de la déformation axiale sur le plan [q - ε_1] mettent en évidence un palier à la fin du chargement. Ce dernier caractérise la résistance maximale, qui croit lorsque la contrainte de consolidation p'_{ic} augmente.

Remarque : L'essai NC-sig250$_{P2}$ prend fin au niveau de contrainte que nous avons fixé, symbolisé par le point P2, il n'atteint pas la résistance maximale de l'éprouvette. Les coordonnées du point P2 sur le plan des contraintes [q - p'] sont q=160 kPa et p'=300 kPa.

Pour les autres chemins, la résistance maximale obtenue, quelque soit la valeur de la contrainte de consolidation, correspond à l'état critique dans le plan [q - p']. Cet état limite est caractérisé par la droite de pente M = 0.857, il est lié à l'angle de frottement interne ϕ'_{pp} par la relation suivante (Biarez et Hicher, 1994) :

$$\sin(\phi'_{pp}) = \frac{3M}{6+M} \qquad \text{[III.5]}$$

Notons que la valeur de la pente M (de 0.857) a été déduite de la régression entre l'origine (p'=0 et q=0) et tous les points correspondants aux déviateurs maximums (le palier sur le plan [q - ε_1]) de l'ensemble des essais normalement consolidés, y compris les essais purement déviatoriques.

L'angle de frottement interne du Kaolin K13 calculé dans notre étude est égal à 22°. Cette valeur est légèrement inférieure à celle obtenue sur la kaolinite P300, on peut citer 25° dans Bouziri (2007), 25.8° dans Hammad (2010), et 26.5° dans Hattab (1994) et Wahyudi (1991).

Ceci est peut-être dû à une difficulté d'atteindre l'état critique, du fait que la valeur prise pour l'élancement de l'éprouvette est prise égale à 1.5 et non de 1 comme c'est le cas dans la littérature citée ci-dessus.

Dans le plan [ε_v - ε_1], l'ensemble des essais montrent une contractance dans la déformation volumique et ce quelque soit la contrainte de consolidation p'_{ic}. Un palier est également identifié dans ce plan qui se traduit par un indice des vides critique e_c dans le plan [e - log p'].

Dans le plan [e - log p'], l'indice des vides est caractérisé par la droite de l'état critique, nommée CSL, qui est parallèle à la droite de consolidation isotrope ICL. La pente de la droite CSL est également Cc.

L'écart entre les deux droites défini par Δe_{max} est calculé :

$$\Delta e_{max} = e_{ICL} - e_{CSL} \qquad \text{[III.6]}$$

Nous avons obtenu Δe_{max} = 0.051, cette valeur est très proche des valeurs trouvées dans la littérature pour la kaolinite P300 : soit 0.05 dans Hattab (1994) et 0.056 dans Bouziri (2007).

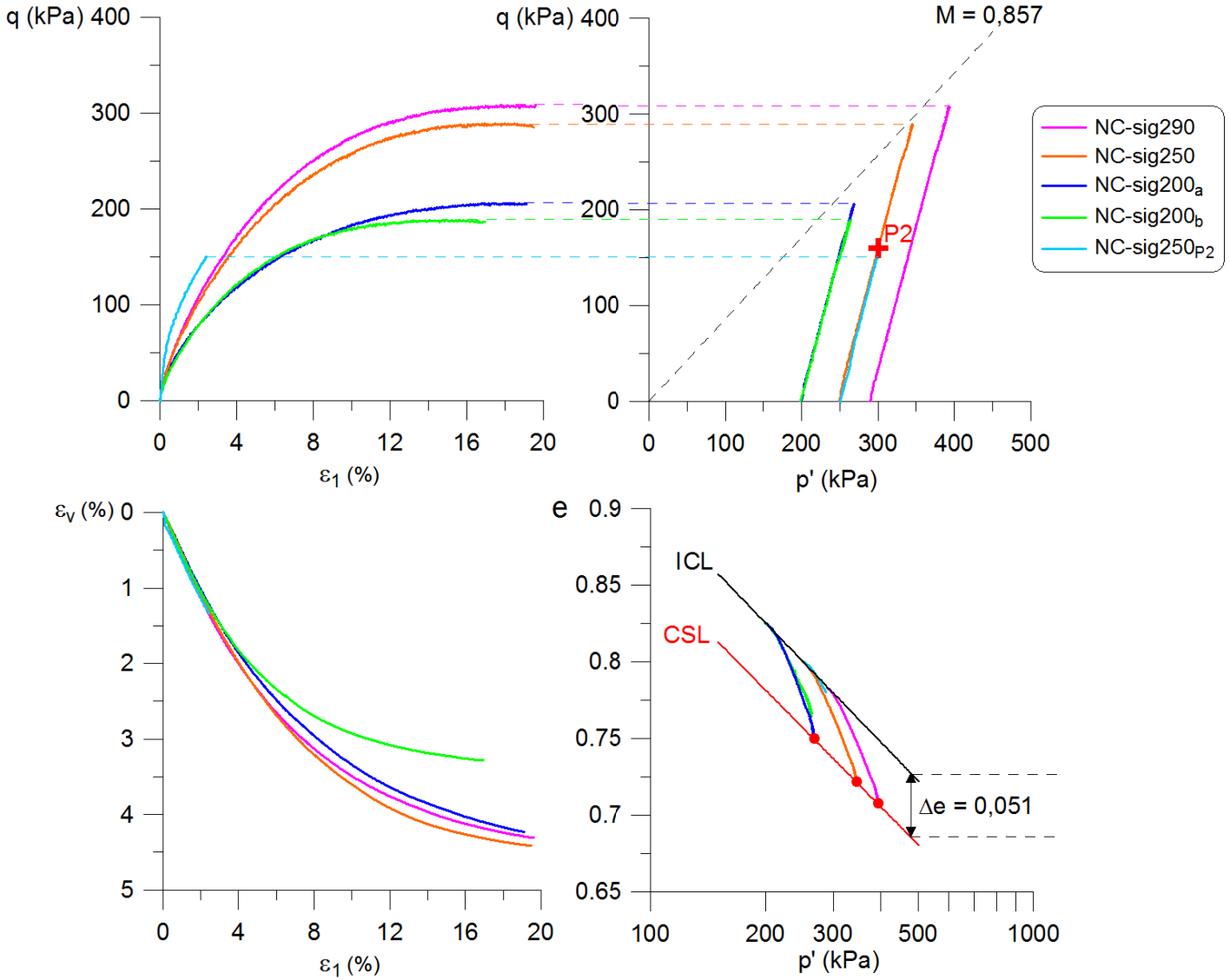


Figure III.4 : Comportement normalement consolidé du Kaolin K13 sur chemin triaxial à σ'_3=constante.

III.1.2.2 Comportement surconsolidé à σ'_3=constante

Deux essais à σ'_3=constante ont été réalisés sur des chemins surconsolidés à partir de différentes contraintes de consolidation qu'on notera p'_1, le chargement isotrope a été mené jusqu'à p'_{ic} = 1000 kPa.

Un essai a été conduit jusqu'à un niveau de contrainte, que nous avons fixé, correspondant au point P2 (le même niveau de contrainte que dans le cas normalement consolidé). Les différentes caractéristiques des essais sont présentées dans le tableau III.2.

Tableau III.2 : Caractéristiques des essais σ'_3=constante surconsolidés.

Nom de l'essai	OCR	p'_1 (kPa)	Indice des vides		
			Etat initial e_{00}	Fin de la consolidation isotrope e_0	Fin du chargement triaxial e_f
OC-sig200	5	200	0.857	0.691	0.707
OC-sig250	4	250	0.918	0.709	0.712
OC- $sig250_{P2}$	4	250	0.809	0.608	0.604

Les résultats de ces essais sont présentés sur la figure III.6 suivant les mêmes plans que pour les essais normalement consolidés.

Dans le plan [q - ε_1], un pic correspondant à la résistance maximale apparait dans les deux essais OC-sig200 et OC-sig250. Ce pic est suivi d'une chute importante du déviateur, puis semble tendre vers une stabilisation appelée résistance "résiduelle". Ceci est dû au développement d'un plan de cisaillement avec localisation. La figure III.5 illustre l'état de l'éprouvette à la fin de l'essai OC-sig200, caractérisé par la présence d'une localisation avec fissure ouverte.

Figure III.5 : Photographie de l'éprouvette d'argile à la fin de l'essai OC-sig200 (OCR =5).

L'essai $OC\text{-}sig250_{P2}$ prend fin à un niveau de contrainte symbolisé par le point P2, fixé en dessous de l'état critique, à p'= 300 kPa et q= 160 kPa. Il n'atteint pas le pic du déviateur.

Le comportement dans le plan [ε_v - ε_1] est composé de deux phases :

- La première phase correspond à une déformation volumique positive $\varepsilon_v > 0$ (diminution de volume) qui caractérise la contractance.

- La deuxième phase intervient au moment où la déformation volumique change de signe et devient négative $\varepsilon_v < 0$ (augmentation de volume). Ceci caractérise la dilatance.

Notons que le passage du comportement contractant au comportement dilatant dans le plan [ε_v - ε_1] intervient avant que le déviateur atteint sa valeur maximale dans le plan [q - ε_1].

Ces deux phases (contractance puis dilatance) se traduisent dans le plan [e - log p'] par deux évolutions de l'indice des vides : une diminution suivant globalement la droite de gonflement Cs dans la phase de contractance, puis, une augmentation faible caractérisée par une difficulté à atteindre l'indice des vides critique de plasticité parfaite (CSL) dans la phase de dilatance. Ceci peut être expliqué par les déformations localisées, observées dans le plan [q - ε_1], et dont l'effet est une chute très marquée du déviateur.

Dans le plan [q - p'], la résistance maximale de le chemin « OC-sig200 » dépasse la droite d'état critique définie par la droite de pente M (caractérisée précédemment dans les essais normalement consolidés). En revanche, le chemin « OC-sig250 » n'atteint pas la droite M en raison d'apparition des déformations localisées survenues trop tôt, ce qui fait chuter le déviateur.

Le « OC-sig250$_{P2}$ », pour lequel le niveau de contrainte avait été fixé, atteint le point P2 en dessous de la droite M. Notons que ce chemin dépasse légèrement le point P2 en raison d'une erreur de programmation du point final de l'essai.

En conclusion, sur un chemin triaxial à σ'_3=constante surconsolidé, le phénomène de développement des déformations localisées provoque des discontinuités cinématiques fragilisant ainsi l'intégrité du matériau.

L'élancement de l'éprouvette est un paramètre qui influence sensiblement le phénomène de localisation des déformations. Des travaux antérieurs (Biarez et Hicher, 1994) montrent que pour un élancement de 2 les déformations cessent d'être homogènes à partir d'un certain point (ici noté F) marquant le début de stabilisation de la dilatance dans le plan [ε_v - ε_1], et l'apparition des déformations localisées.

Nous avons représenté le point "F" sur la figure III.6 dans les plans [ε_v - ε_1], ainsi que sa correspondance dans le plan [e - logp'].

Dans le plan [ε_v - ε_1], l'évolution de la déformation volumique tend vers une stabilisation après le point "F", et la dilatance est prématurément stoppée, ce qui se traduit par une incapacité à atteindre la droite de l'état critique CSL dans le plan [e - logp']. Ce résultat montre le développement de déformations localisées dans l'échantillon. Des études antérieures ont en effet montrées qu'un élancement faible aura tendance à retarder le phénomène de localisation. Biarez et Hicher (1994) ont montré qu'en passant d'un élancement de 2.2 à 0.5 la dilatance continue d'augmenter et ne se stabilise pas

prématurément dans le plan [ε_v - ε_1]. Dans le plan [e - logp'] l'indice des vides continue à évoluer se rapprochant de la droite de l'état critique CSL.

Le comportement est associé au pic, puis une chute importante du déviateur est clairement mise en évidence dans le plan [q - ε_1].

Nous avons opté pour des conditions expérimentales permettant au mieux le développement d'une rupture progressive lors du chargement, mais sans précipiter d'une manière brutale la localisation (cas des échantillons dont l'élancement est ≥ 2). Un élancement de 1.5 est dans ce cas intéressant.

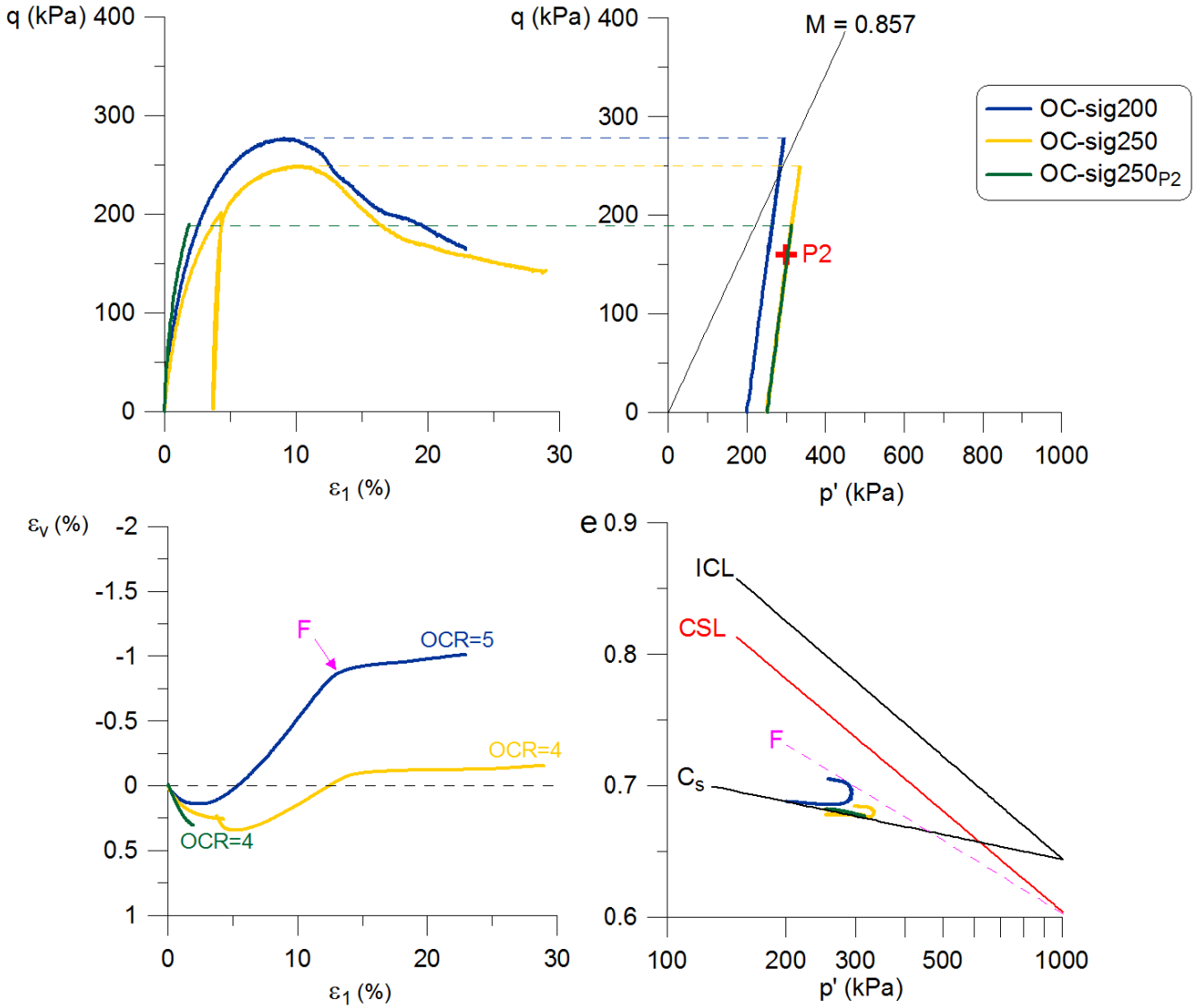


Figure III.6 : Comportement surconsolidé du Kaolin K13 sur chemin triaxial à σ'_3=constante.

III.1.3. Chemins à p'=constante

Les essais à p'=constante ont été réalisés sur des chemins normalement consolidés et surconsolidés.

Après un chargement (ou chargement puis déchargement dans le cas d'essai surconsolidé) isotrope jusqu'à une contrainte de consolidation p'_{ic}, l'essai consiste à maintenir la contrainte moyenne effective p' constante au cours du chargement. Ce chemin est appelé purement déviatorique.

Dans le plan [q - p'] représenté sur la figure III.7 (a), le chargement est réalisé par un taux d'écrasement U_{max}, défini par déviateur final (q_2) à atteindre sur la durée de la phase de cisaillement Δt fixée en fonction du matériau. Contrairement au chemin précedent à σ'_3=constant, à p'=constant le chargement est réalisé à contrainte imposée et non à déplacement imposé.

Remarque : les vitesses d'écrasement moyennes V_{max} en (mm/min) ont été estimées pour tous les essais et présentées en annexe 2.1.

L'état de contrainte imposé à l'éprouvette d'argile est représenté sur la figure III.7 (b).

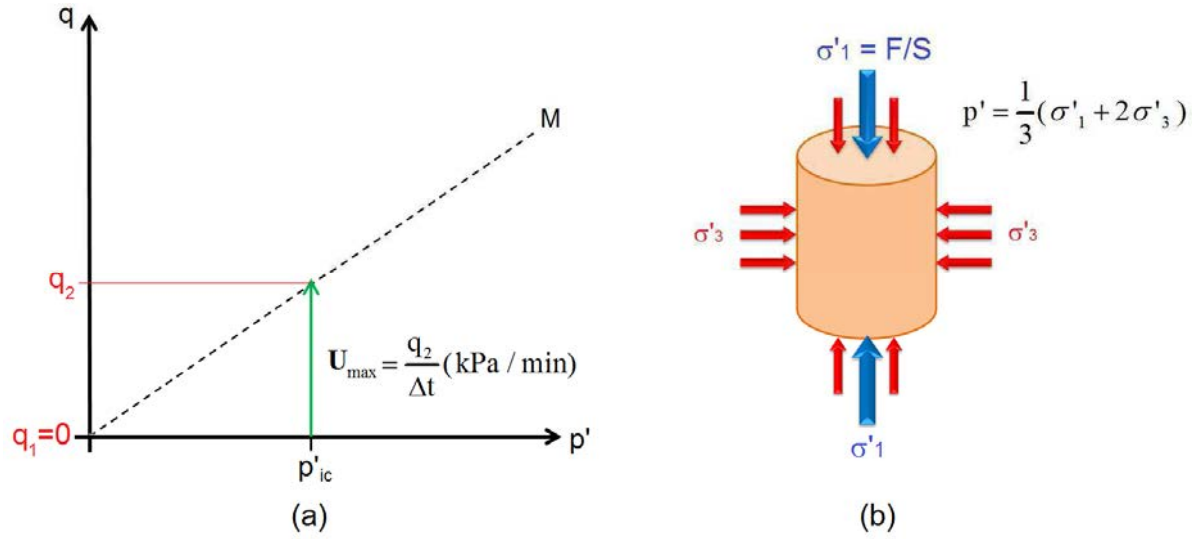


Figure III.7 : Etat de contrainte dans un chemin triaxial à p'=constante.

L'analyse du comportement sur chemin purement déviatorique est effectuée sur les mêmes plans définis pour le comportement sur chemin classique à σ'_3=constante (Fig. III.4 et Fig. III.6). Sur ces plans, nous reportons la droite d'état critique M sur le plan [q - p'], ainsi que sa projection CSL dans le plan [e - log p'], caractérisées sur les chemins normalement consolidés.

III.1.3.1 Comportement normalement consolidé à p'=constante

Six chemins à p'=constante ont été réalisés en normalement consolidé à différentes contraintes de consolidation p'_{ic}. Un essai, NC-p300$_{P2}$, a été conduit jusqu'au niveau de

contrainte désigné par le point P2. Par ailleurs, dans le cas du chemin NC-p290, deux essais ont été réalisés (a et b).

Les différentes caractéristiques des essais sont décrites dans le tableau III.3.

Tableau III.3 : Caractéristiques des essais p'=constante normalement consolidés.

Nom de l'essai	p'_{ic} (kPa)	U_{max} (kPa/min)	Indice des vides		
			Etat initial e_{00}	Fin de la consolidation isotrope e_0	Fin du chargement triaxial e_f
NC-p200	200	0.026	0.959	0.834	0.801
NC-p250	250	0.040	0.959	0.815	0.777
NC-p290$_a$	290	0.063	0.950	0.803	0.778
NC-p290$_b$	290	0.060	0.956	0.812	0.781
NC-p300	300	0.039	0.930	0.776	0.735
NC-p300$_{P2}$	300	0.035	0.893	0.758	0.738

Nous avons synthétisé sur la figure III.8, le comportement normalement consolidé du Kaolin K13 sur chemins p'=constante.

Les résultats montrent que sur le plan [q - ε_1], les chemins se stabilisent au niveau de leur résistance maximale. Ceci se traduit, sur le plan [q - p'], par la progression verticale des chemins qui atteignent un état proche de l'état l'état critique, défini par la droite de pente M. L'essai NC-p300$_{P2}$ a été conduit jusqu'au point P2 au niveau des contraintes où p'=300 kPa et q=160 kPa.

Sur le plan [ε_v - ε_1], les courbes mettent en évidence une contractance de la déformation volumique.

Sur le plan [e - log p'], la variation de volume de l'éprouvette, due uniquement à l'évolution du déviateur, induit une réduction de l'indice des vides appelée contractance. Cette décroissance de l'indice des vides progresse vers la droite de l'état critique CSL, définie précédemment par les essais à σ'_3=constante.

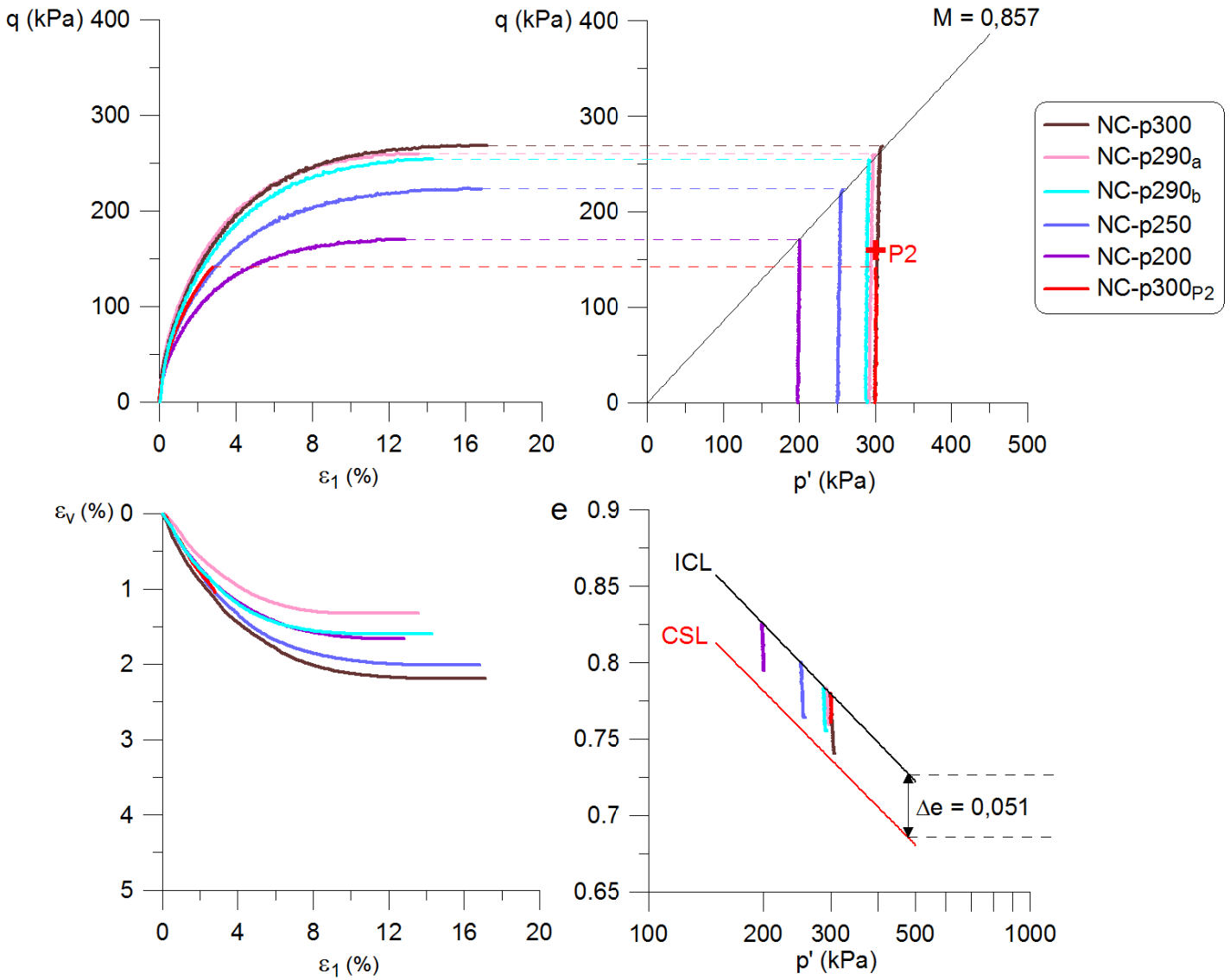


Figure III.8 : Comportement normalement consolidé du Kaolin K13 sur chemin triaxial à p'=constante.

III.1.3.2 Comportement surconsolidé à p'=constante

Pour cette partie, nous avons réalisé quatre chemins purement déviatoriques à différentes contraintes de consolidation p'_1, le chargement isotrope ayant été mené jusqu'à p'_{ic}=1000 kPa. L'essai OC-$p300_{P2}$ a été conduit jusqu'au niveau de contrainte désigné par le point P2, où p'=300 kPa et q=160 kPa. Les caractéristiques de ces essais sont décrites dans le tableau III.4.

Tableau III.4 : Caractéristiques des essais p'=constante surconsolidés.

Nom de l'essai	OCR	p'_1 (kPa)	U_{max} (kPa/min)	Indice des vides		
				Etat initial e_{00}	Fin de la consolidation isotrope e_0	Fin du chargement triaxial e_f
OC-p250	4	250	0.030	0.918	0.703	0.728
OC-p290	3.45	290	0.052	0.930	0.691	0.711
OC- p300	3.33	300	0.031	0.965	0.723	0.753
OC-$p300_{P2}$	3.33	300	0.037	0.966	0.727	0.741

La figure III.9 présente les résultats des essais dans les différents plans permettant d'analyser le comportement de l'argile sur chemin triaxial.

Comme conséquence du mode de chargement à contrainte imposée réalisé dans les chemins à p'=constante, on peut voir qu'excepté l'essai OC-$p300_{P2}$ (pour lequel le chemin a été volontairement stoppé), les chemins effectués dans le plan [q - ε_1] ont tous une difficulté à exhiber un pic et décroissance de q. Le même constat peut être fait sur l'évolution de la déformation volumique.

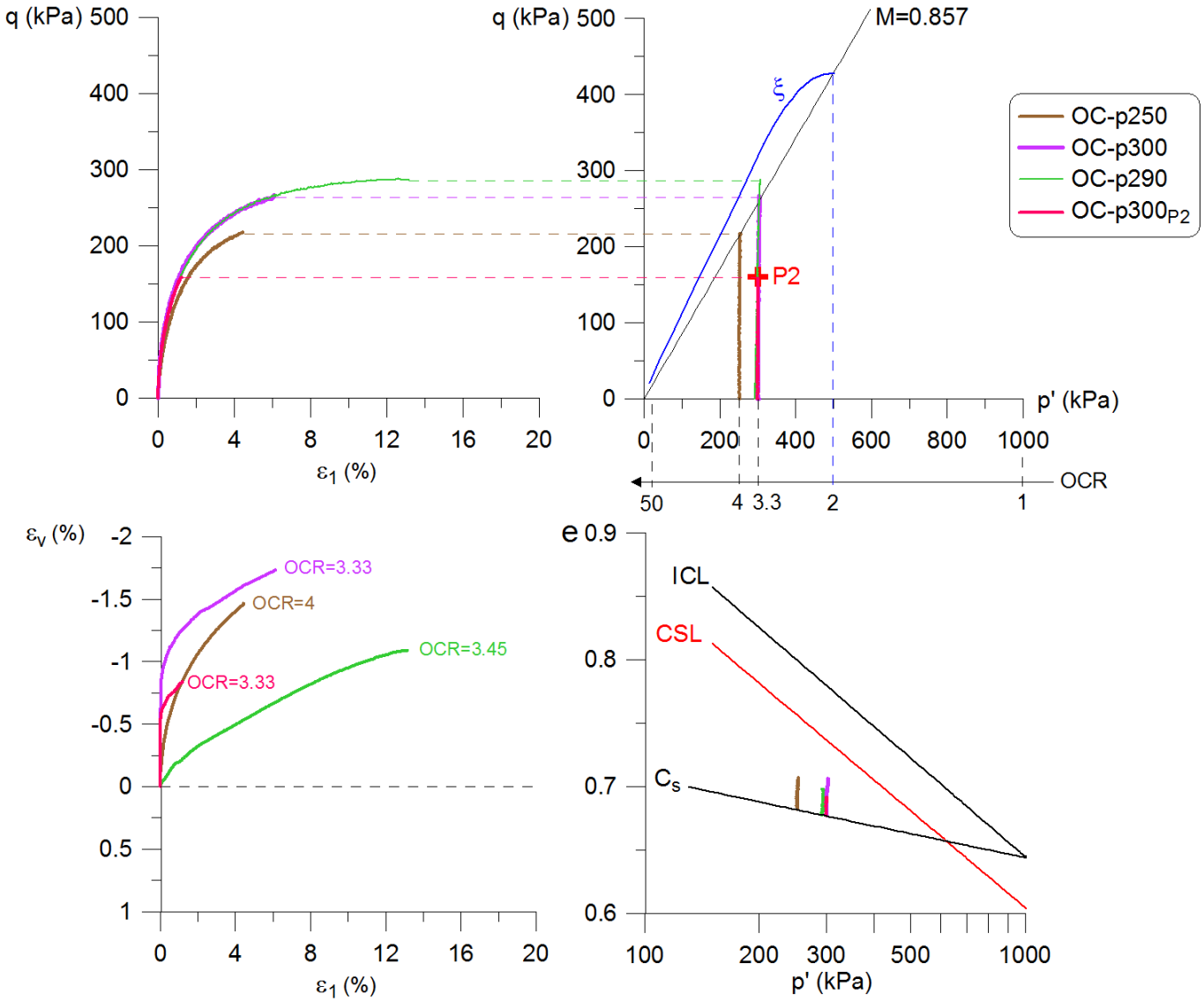


Figure III.9 : Comportement surconsolidé du Kaolin K13 sur chemin triaxial à p'=constante.

Dans le plan [ε_v - ε_1], les évolutions de la déformation volumique montrent un comportement dilatant (ε_v < 0). A la fin du chargement, nous pouvons constater que la déformation volumique n'est stabilisée dans aucun essai.

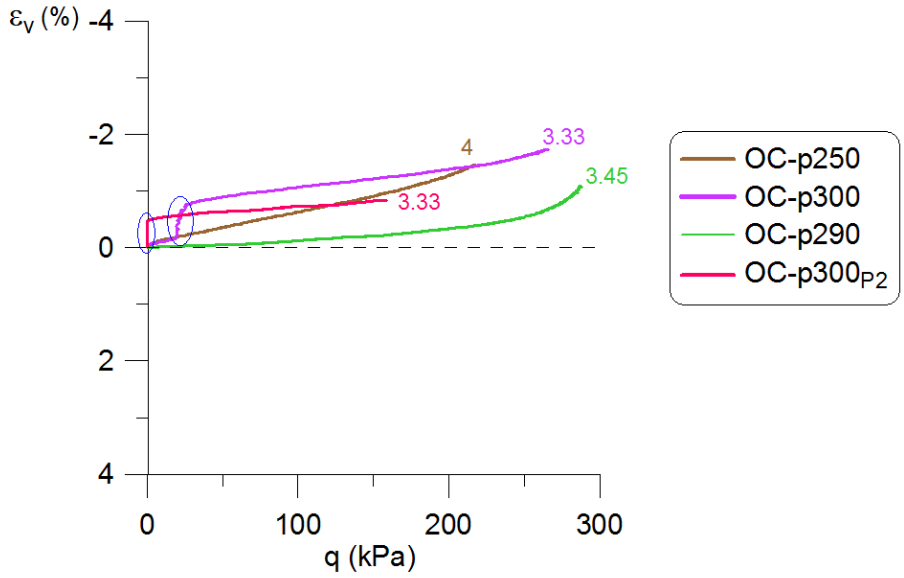


Figure III.10 : Variations de la déformation volumique en fonction du déviateur.

Hormis l'essai OC-p290 qui exhibe une phase à volume constant, ces résultats expérimentaux (Fig. III.10) ne présentent généralement pas de domaine à volume constant, en début du chargement, comme on peut le voir dans les résultats de Hattab & Hicher (2004) (voir chapitre I, section I.3.1.4).

Dans ces essais, la dilatance apparaît dès le début du chargement, avec parfois des sauts très marqués comme on peut l'observer dans les essais OC-P300 et OC-P300$_{P2}$ (sauts indiqués par des ellipses).

La variation de la déformation volumique observée dans le plan [ε_v - ε_1], en particulier l'absence de stabilisation à la fin du chargement, induit dans le plan [e - log p'] (Fig. III.9) des chemins qui n'atteignent pas la droite d'état critique CSL.

Ces essais montrent que le mode du chargement triaxial (à contraintes ou à déplacement imposé) affecte les résultats obtenus dans les déformations volumiques. Certains phénomènes comme l'état critique ou l'état caractéristique, mis en évidence dans les argiles surconsolidées lorsque le chargement est à déplacement imposé, ne sont plus observés lorsque le chargement est à contrainte imposée.

Notons que dans nos essais, l'état critique est difficile à obtenir également en raison de l'élancement de 1.5 choisi dans cette étude.

III.1.4. Discussion et comparaison entre les deux chemins triaxiaux

III.1.4.1 Comparaison entre les chemins à p'=constante et à σ'_3=constante

Différents chemins de contrainte ont été réalisés dans cette étude, dans différentes conditions, en normalement consolidé ou en surconsolidé. Nous allons dans ce qui suit analyser plus en détail, et en les comparant, les comportements présentés par ces chemins normalement consolidés et surconsolidés. Pour cela nous nous sommes fortement basés sur des études antérieures, en particulier celles réalisées dans les années 90 à l'Ecole Centrale Paris, par l'équipe de J. Biarez et P-Y Hicher (Hicher et Biarez 1994 ; Hattab et Hicher 2004).

1- Comportement normalement consolidé :

La figure III.11 présente les chemins à p'=constante et à σ'_3=constante effectués à différentes contraintes de consolidation p'_{ic} en condition normalement consolidée.

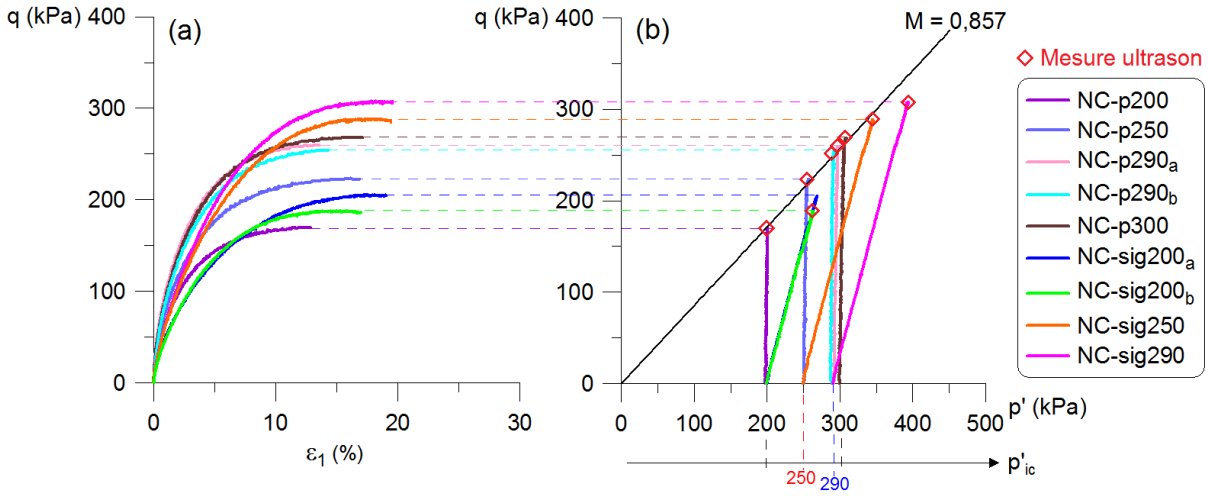


Figure III.11 : Chemins purement déviatoriques et à σ'_3=constante dans les plans [q - ε_1] et [q - p'].

Les résultats montrent que l'évolution du déviateur dans le plan [q -ε_1] se stabilise à la fin du chargement au niveau d'un état ultime. Ce dernier est caractérisé par une valeur du déviateur qui augmente avec la contrainte de consolidation p'_{ic} quelque soit le chemin triaxial (exemple, entre p'_{ic} = 200kPa et p'_{ic} = 250kPa, q_{max} (NC-p250) > q_{max} (NC-p200) sur Fig. III.11 b). D'autre part, pour une valeur donnée de p'_{ic}, la valeur du déviateur de l'état ultime sur un chemin à σ'_3=constante est supérieure à celle obtenue suivant un chemin purement déviatorique (exemple, pour p'_{ic} = 250kPa, q_{max} (NC-sig250) > q_{max} (NC-p250) sur Fig. III.11 b).

Dans le plan [q - p'], ce résultat se traduit par l'évolution de tous les chemins vers l'état critique, défini une droite unique M, quelque soit la contrainte de consolidation p'_{ic}.

Remarque : les mesures ultrasons effectuées sur les chemins normalement consolidés sont localisées par des losanges rouges dans le plan [q - p'], très proches de la droite M. Notons qu'il n'y avait pas eu de mesure ultrason dans l'essai NC-sig200$_a$.

L'analyse des variations de la déformation volumique et de l'indice des vides est représentée sur la figure III.12 dans les deux plans [ε_v -ε_1] et [e - log p'].

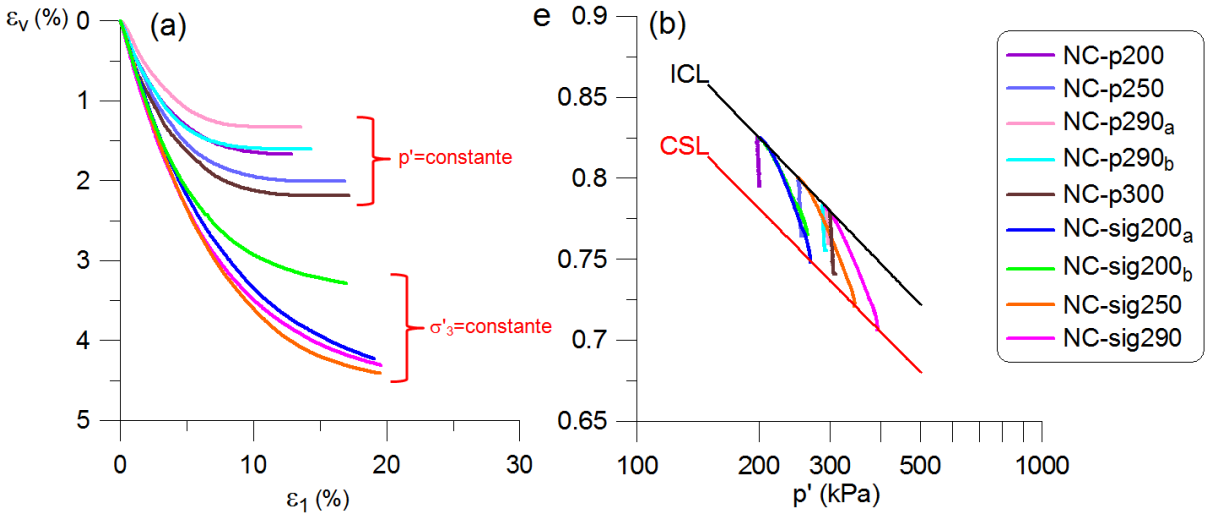


Figure III.12 : Variations de la déformation volumique et de l'indice des vides pour les chemins normalement consolidés dans les plans [ε_v - ε_1] et [e - log p'].

Dans le plan [ε_v - ε_1], les chemins purement déviatoriques et les chemins à σ'_3=constante exhibent une contractance ($\varepsilon_v > 0$). Par ailleurs, pour une contrainte de consolidation p'_{ic} donnée, la contractance est plus importante dans les essais à σ'_3=constante en raison du couplage entre les mécanismes isotrope et déviatoire.

Complément 1 :

La déformation volumique peut être exprimée en fonction de ses deux composantes :

$$\varepsilon_v = \varepsilon_v^{(p')} + \varepsilon_v^{(q)} \qquad [III.7]$$

Une composante de la déformation volumique $\varepsilon_v^{(p')}$ est induite par la partie isotrope de la contrainte, et une composante $\varepsilon_v^{(q)}$ est induite par la partie déviatorique de la contrainte.

Dans un chemin purement déviatorique, la déformation volumique est due uniquement à l'évolution du déviateur puisque $\varepsilon_v^{(p')} = 0$.

En revanche, sur un chemin à σ'_3=constante, la déformation volumique est provoquée par les deux parties, la partie isotrope et la partie déviatorique. Ainsi, dans tous les cas d'essais normalement consolidés, la contractance sur chemin à σ'_3=constante est supérieure à celle obtenue sur chemin à p'=constante (Fig. III.12 a).

La figure III.13 (b) présente les résultats sur le plan [e - log p'].

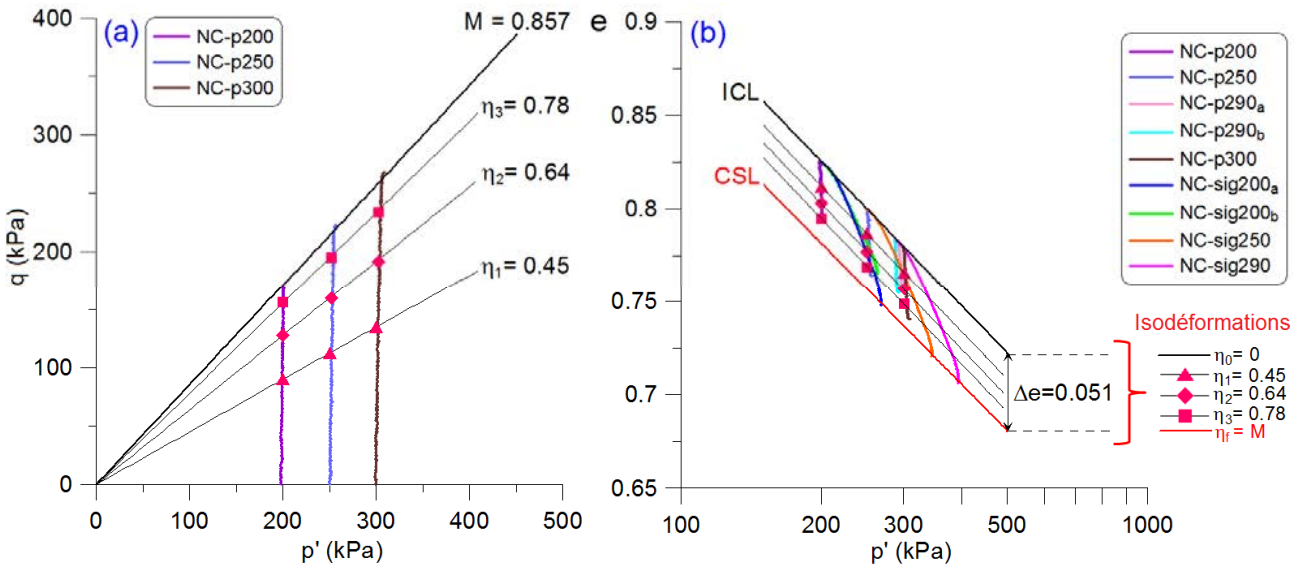


Figure III.13 : Iso-déformations : (a) construction des points dans le plan [q - p'], (b) variations de l'indice des vides pour les chemins normalement consolidés dans le plan [e - logp'].

Nous avons représenté les iso-déformations, caractérisées par le paramètre η_i = q/p' (i=0 à n), dans une bande de largeur Δe_{max} = 0.051 comprise entre la droite de consolidation isotrope (ICL) où η_0 = 0 et la droite de l'état critique (CSL) où η_f = M = 0.857.

Les résultats montrent que toutes les iso-déformations calculées, à partir des chemins à p'=constante, sont parallèles à la droite CSL.

Complément 2 : la construction de chacune des iso-déformations a été effectuée à partir de trois points expérimentaux indiqués sur la figure III.13 (b) par les différents symboles. Chaque trois points ont été obtenus d'abord dans le plan [q - p'] par l'intersection de trois chemins à p'=constante choisis avec la droite η_i = q/p' (i=1 à 3) donnée (Fig. III.13 a). Une fois que tous les points aient été définis par un couple (q, p'), on identifie la valeur de l'indice des vides associée à ce couple. Ainsi, les points sont reportés dans le plan [e - log p'] et caractérise l'iso-déformation correspondante identifiée par une variation dans ce plan linéaire (Fig. III.13 b).

2- Comportement surconsolidé :

Les chemins surconsolidés réalisés à p'=constante et σ'_3=constante sont représentés sur la figure III.14. Nous avons intégré dans le plan [q - p'] la courbe de la résistance maximale ξ, établie par Hattab et Hicher (2004), mais que les chemins n'arrivent pas à atteindre car l'homogénéité des déformations n'est pas maintenue de la même façon dans les deux campagnes d'essai. L'homogénéité des déformations dans nos éprouvettes n'est rapidement plus assurée comme le montrent les résultats sur le plan [ε_v - ε_1].

Rappelons que tous les chemins à σ'_3=constante ont été réalisés à déplacement imposé, et les chemins à p'=constante à contrainte imposée. C'est pourquoi nous observons un pic dans les résultats des chemins à σ'_3=constante, et pas dans ceux à p'=constante. Mis à part cet aspect, les résultats dans le plan [q -ε_1] semblent cohérents entre eux.

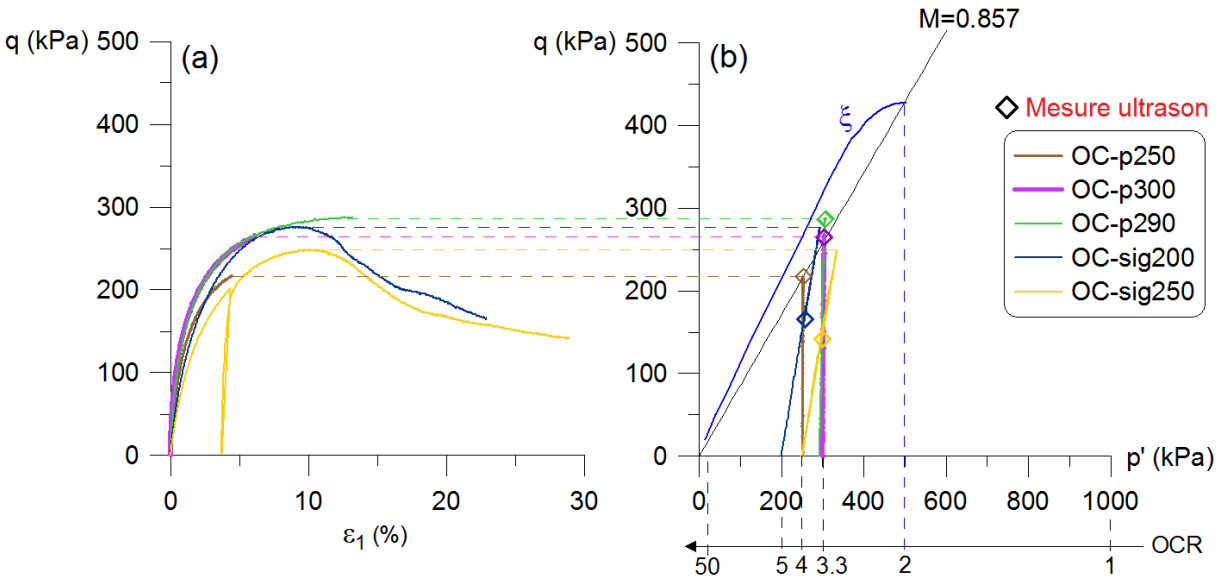


Figure III.14 : Présentation des chemins purement déviatoriques et à σ'_3=constante dans les plans [q - ε_1] et [q - p'].

Dans le plan [q - p'] nous avons marqué les points concernés par les mesures ultrasons sur les différents chemins.

La figure III.15 présente l'évolution de volume de l'échantillon sur chemins à p'=constante et à σ'_3=constante dans les deux plans [ε_v - ε_1] et [e - log p'].

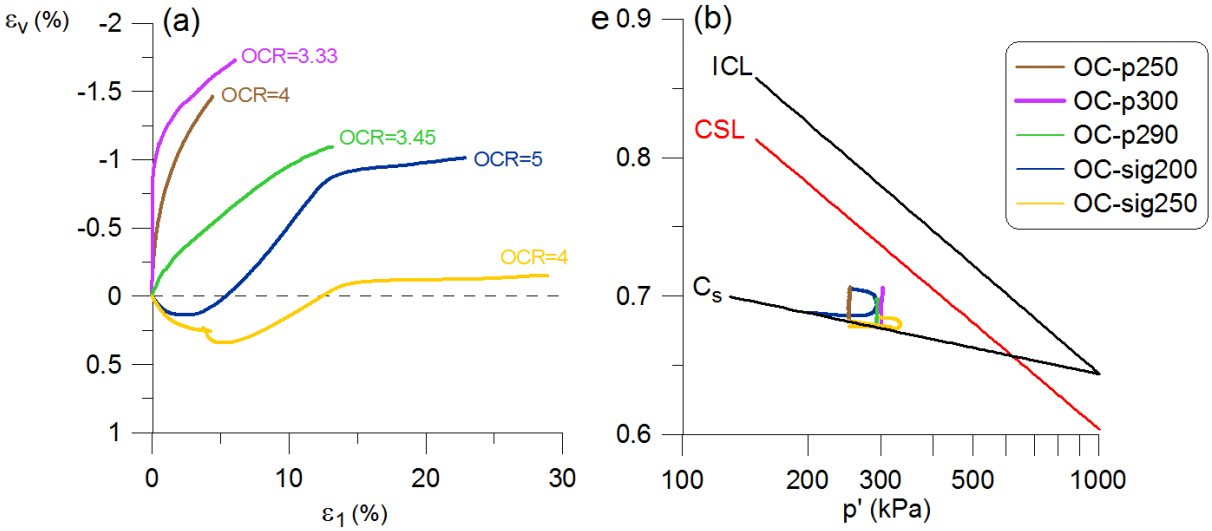


Figure III.15 : Variations de la déformation volumique et de l'indice des vides pour les chemins surconsolidés dans les plans : (a) [ε_v - ε_1] et (b) [e - log p'].

Dans le plan [ε_v - ε_1], les chemins à p'=constante mettent en évidence une dilatance (ε_v < 0) au cours du chargement triaxial. En revanche, les chemins à σ'_3=constante exhibent d'abord une contractance (ε_v > 0) au début du chargement puis une dilatance avant un plateau montrant que nous avons atteint une localisation dans l'échantillon.

Dans le plan [e - log p'] (Fig. II.15 b) l'évolution de l'indice des vides des chemins à σ'_3=constante dans la phase de contractance suit approximativement la droite Cs.

3- Contractance et dilatance :

La représentation des variations de la déformation volumique en fonction de du déviateur (Fig. III.16) permet de mettre en évidence les phénomènes de contractance et de dilatance. Nous avons sur ce plan séparé les chemins à p'=constante et à σ'_3=constante.

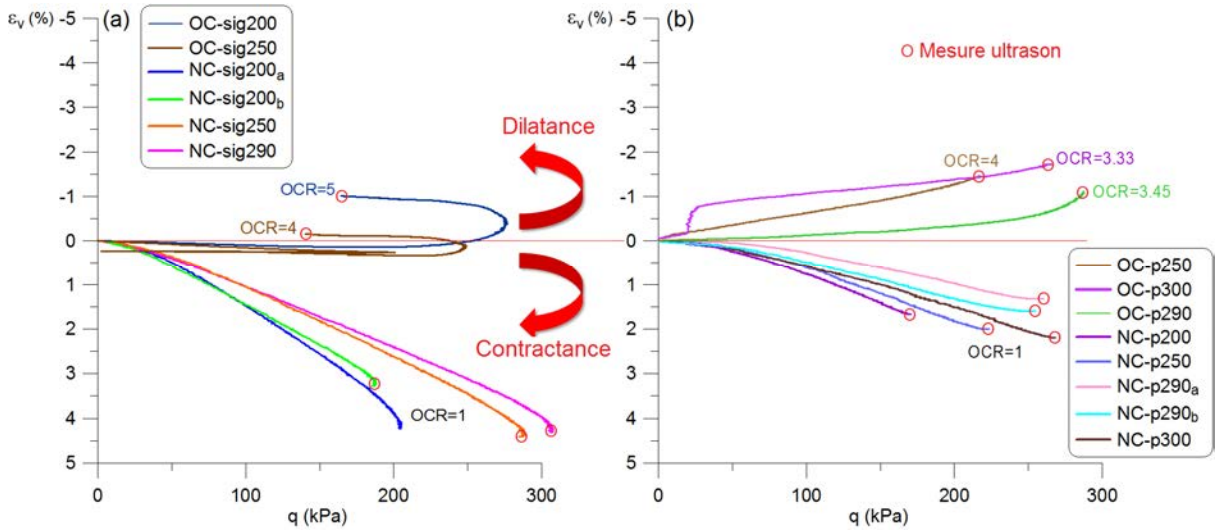


Figure III.16 : Variations de la déformation volumique en fonction du déviateur en normalement consolidés et en surconsolidé sur les chemins à : (a) σ'_3=constante et (b) p'=constante.

Sur chemins à σ'_3=constante (Fig. III.16 a), la contractance obtenue à la fin du chargement est en moyenne de 4.2% dans le comportement normalement consolidé. Les deux essais surconsolidés OC-sig200 et OC-sig250 marquent une légère dilatance, après la phase de contractance, prématurément stoppée comme nous l'avons indiqué précédemment.

Sur les chemins purement déviatoriques (Fig. III.16 b), la contractance obtenue en normalement consolidé (1.9% en moyenne) est deux fois moins importante que celle induite sur chemins à σ'_3=constante. Dans les essais surconsolidés, la déformation volumique est uniquement de nature dilatante jusqu'à -1.5% en moyenne à la fin du chargement.

Les points encerclés sur la figure III.16 représentent en termes de déformation volumique (contractance ou dilatance) les points correspondant aux mesures ultrasons (qui ont été réalisées après déchargement de l'échantillon).

III.1.4.2 Analyse des chemins fixés au même niveau de contrainte P2 avec différentes conditions de chargement

Le point P2 représente un niveau de contrainte fixe à q= 160 kPa et p'=300 kPa dans le plan des contraintes [q - p'] ce qui correspond à un rapport des contraintes η= 0.53 et à un rapport η/M = 0.62. Quatre chemins à p'=constante et σ'_3=constante ont été programmés pour atteindre le point P2 en normalement consolidé et en surconsolidé.

1- Comportement normalement consolidé :

La figure III.17 présente le comportement normalement consolidé des chemins réalisés jusqu'au point P2 dans les plans [q - ε_1] et [q - p'].

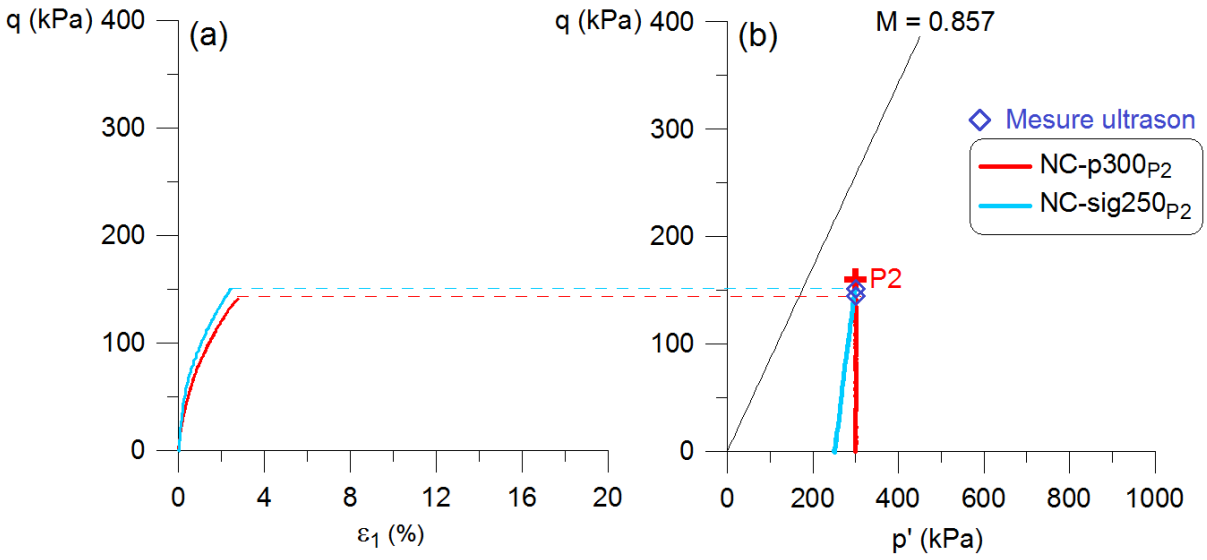


Figure III.17 : Présentation des chemins conduits au point P2 en normalement consolidé dans les plans [q - ε_1] et [q - p'].

Dans le plan [q - ε_1] (Fig. III.17 a), l'évolution du déviateur des deux chemins NC-sig250$_{P2}$ et NC-p300$_{P2}$ a bien atteint le même niveau de contrainte du point P2. Ceci correspond dans le plan [q - p'] (Fig. III.17 b) a un niveau situé en dessous de la droite M.

La déformation volumique est représentée sur la figure III. 18 dans les plans [ε_v - ε_1] et [e - log p'].

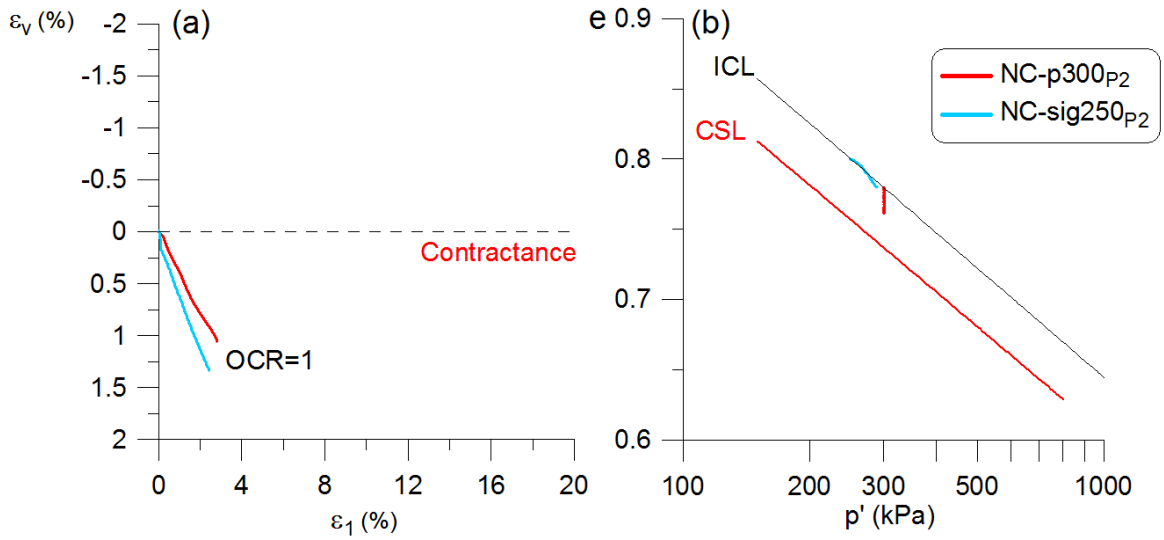


Figure III.18 : Variations de volume de l'éprouvette au point P2 en normalement consolidé dans les plans [ε_1 - ε_v] et [e - log p'].

Les résultats montrent une contractance de 1.2% pour NC-sig250$_{P2}$ (σ'_3=constante) et de 0.3% pour NC-p300$_{P2}$ (p'=constante) dans le plan [ε_1 -ε_v]. Ceci se traduit par une diminution de l'indice des vides dans le plan [e - log p'] dans les deux cas avec Δe= 0.020 pour NC-sig250$_{P2}$ et Δe= 0.019 pour NC-p300$_{P2}$.

2- Comportement surconsolidé :

Le point P2 a été fixé à un degré de surconsolidation OCR= 3.3 (sur chemin à p'=constante) et une contrainte de consolidation de 1000 kPa. Les trois domaines de comportement dilatant, pseudo-élastique volumique et contractant établis par Hattab et Hicher (2004) ont été reportés sur le plan [q - p'], (Fig. III.19). Ainsi, le point P2 se trouve dans le domaine de dilatance.

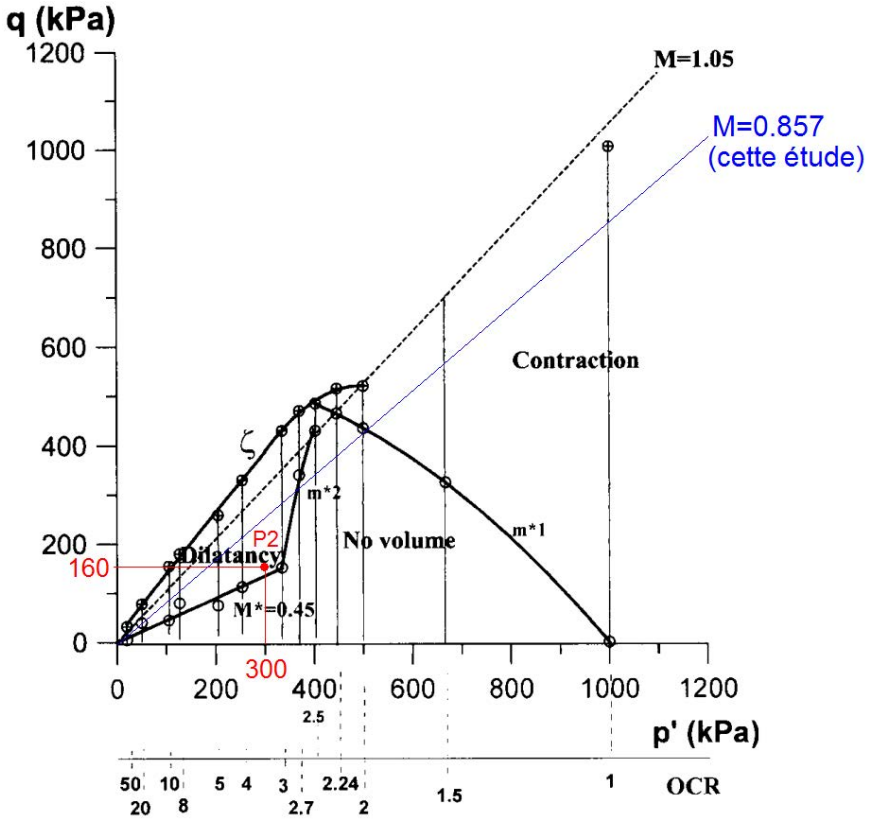


Figure III.19 : Localisation du point P2 dans les domaines de contractance et de dilatance établis dans le plan [q - p'] par Hattab et Hicher, 2004.

Les chemins surconsolidés pour rejoindre le point P2 ont été réalisés à p'=constante et σ'_3=constante. Les contraintes de consolidations p'_1 sont les mêmes que celles effectuées en normalement consolidé, avec p'_1= 250 kPa pour le chemin à σ'_3=constante (OC-sig250$_{P2}$) et p'_1 = 300 kPa pour le chemin à p'=constante (OC-p300$_{P2}$).

La figure III.20 présente l'évolution de déviateur en fonction de la déformation axiale d'une part [q - ε_1] et de la contrainte moyenne effective d'autre part [q - p'].

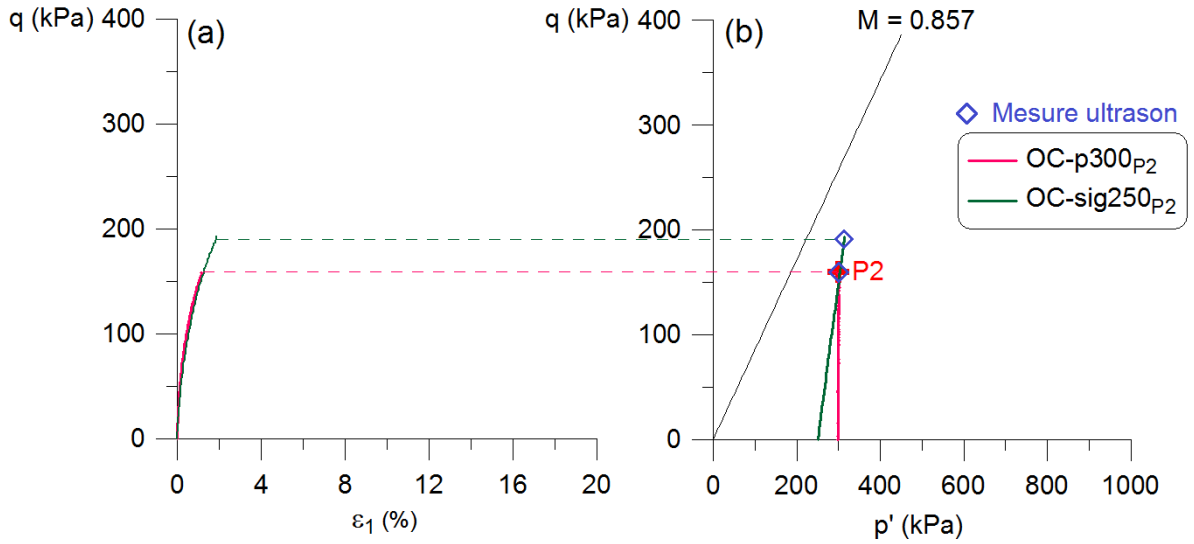


Figure III.20 : Chemins surconsolidés conduits au point P2 dans les plans [q - ε_1] et [q - p'].

Le chemin purement déviatorique OC-p300$_{P2}$ atteint exactement le point P2 au niveau de contrainte fixé (q = 160 kPa). En revanche, nous ne parvenons pas à atteindre précisément le point P2 sur les chemins à σ'_3=constante, comme on peut le voir sur l'essai OC-sig250$_{P2}$. Il faudrait tenir compte de cette difficulté dans l'interprétation des résultats.

L'évolution de la déformation volumique et de l'indice des vides sont représentés sur la figure III.21 dans les plans [ε_1 -ε_v] et [e - log p'].

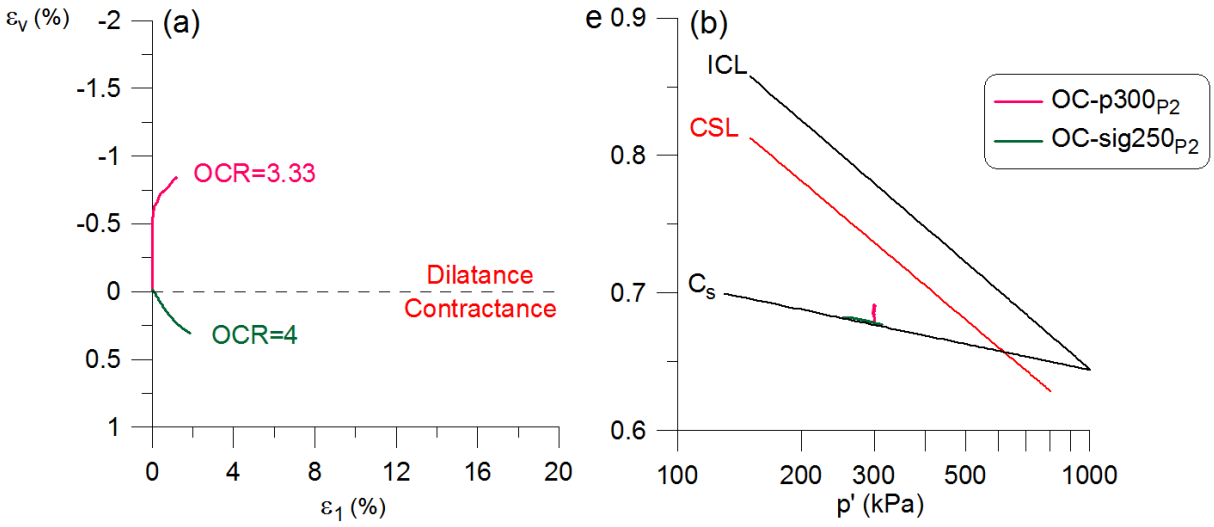


Figure III.21 : Variations de volume de l'éprouvette au point P2 en surconsolidé dans les plans [ε_1 - ε_v] et [e - log p'].

Sur le chemin OC-p300$_{P2}$ (OCR = 3.33), la déformation volumique dans le plan [ε_1 -ε_v] marque une dilatance très marquée concordante avec les résultats obtenus dans Hattab et Hicher (2004) et le positionnement du point P2 dans le domaine de dilatance (Fig. III.19). En revanche, une contractance a été mis en évidence sur le chemin OC-sig250$_{P2}$ (OCR = 4).

Cette contractance de OC-sig250$_{P2}$ correspond dans le plan [e - log p'] à un chemin qui suit la droite Cs, ce qui suppose que le chemin n'a pas encore quitté le comportement pseudo-élastique. Cela signifie que la partie déviatorique de la contrainte $\varepsilon_v^{(q)}$ ne s'est pas encore activée et que la partie isotrope $\varepsilon_v^{(p')}$ est seule responsable de la contractance induite.

3- Contractance et dilatance au même niveau de contrainte :

Nous avons reporté sur la figure III.22 les variations de la déformation volumique plastique (ε^p_v) en fonction du déviateur, sur les quatre chemins qui ont conduit au point P2. Ce choix permet la comparaison des déformations volumiques entre les deux chemins, l'un à σ'_3=constante et l'autre à p'=constante, en retenant uniquement la partie déviatoire.

Sur chemin à σ'_3=constante :

$$\varepsilon_v^p = \varepsilon_v - \frac{C_s}{1+e_0}\log\left(\frac{p'}{p'_{ic}}\right) \qquad \text{[III.8]}$$

Avec :

ε_v : déformation volumique,

Cs : indice de gonflement,

e_0 : indice des vides après la phase de consolidation isotrope,

p'_{ic} : contrainte de consolidation,

p' : contrainte effective moyenne.

Sur chemin à p'=constante :

$$\varepsilon_v^p = \varepsilon_v \qquad \text{[III.9]}$$

Les points (ronds) sur la figure montrent les points de mesures ultrasons avec la nature de la déformation volumique (contractance ou dilatance) qu'a subie l'échantillon avant son déchargement mécanique.

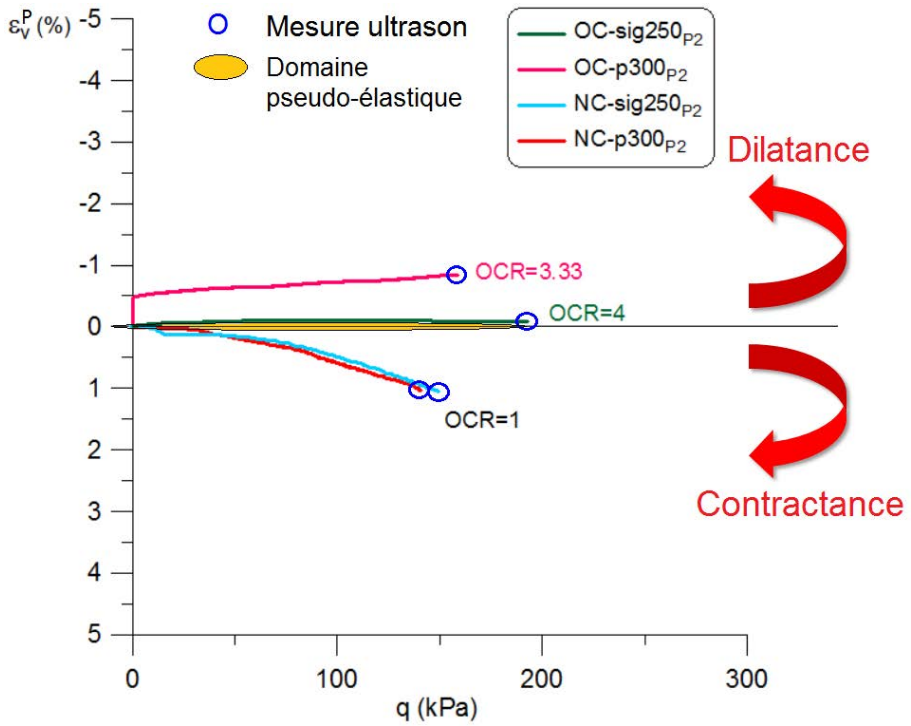


Figure III.22 : Déformation volumique en fonction du déviateur au point P2 suivant différents chemins.

Les chemins réalisés en normalement consolidé (OCR=1) montrent clairement un comportement contractant, les courbes par ailleurs sont très proches.

Sur les chemins surconsolidés, nous pouvons distinguer :

- une légère dilatance pour l'essai à σ'_3=constante OC-sig250$_{P2}$ (OCR=4) due à la partie déviatorique de la contrainte $\varepsilon_v^{(q)}$.

- une dilatance marquée par un sursaut de -0.5% au début du chargement pour l'essai à p'=constante (que l'on peut attribuer au mode de chargement à contrainte imposée). Le domaine à volume constant est plus difficile à atteindre dans ce cas de chargement.

Conclusion :

Dans cette première partie du chapitre, nous avons identifié la loi expérimentale phénoménologique de l'argile sous différents chemins triaxiaux avec les principaux résultats obtenus suivants :

- Sur chemins surconsolidés à σ'_3=constante, la rupture de l'échantillon a été identifiée par le développement d'un plan de cisaillement avec localisation en fin de chargement. Elle est caractérisée par une chute importante du déviateur après le pic, qui tend à se stabiliser au niveau d'une résistance "résiduelle". Sur chemins surconsolidés à p'=constante, le mode de chargement triaxial affecte les résultats obtenus dans les déformations volumiques. Par conséquent, le phénomène de l'état caractéristique, que l'on peut observer dans les argiles surconsolidées lorsque le chargement est à déplacement imposé, devient difficile d'accès lorsque le chargement est à contrainte imposée.

- Les mécanismes de déformation volumique ont été identifiés. La déformation est de nature contractante sur chemins normalement consolidés. En revanche, sur chemins surconsolidés, elle dépend du chemin de contrainte conduit. Elle est caractérisée par une dilatance uniquement due à la composante déviatorique de la contrainte sur chemin à p'=constante. Tandis que sur chemin à σ'_3=constante, elle débute d'abord par une contractance due à la partie isotrope de la contrainte, puis change de signe et le comportement devient dilatant.

- A un niveau de contrainte fixé sur le plan des contraintes (point P2), mais atteint par différents chemins triaxiaux, nous constatons que pour les chemins normalement consolidés, la déformation volumique de nature contractante est équivalente, alors que pour les chemins surconsolidés, la déformation plastique est de nature dilatante et dépend du chemin des contraintes suivi pour atteindre P2. Dans cet exemple, le comportement est faiblement dilatant (à vérifier après correction des résultats) lorsque le chemin est σ'_3=constante, et dilatant lorsqu'il est à p'=constante.

III.2. Identification des propriétés élastiques par propagation d'onde ultrasonore en fonction du niveau de contrainte

III.2.1. Evolution de la vitesse d'onde V_p sur différents chemins triaxiaux

Les mesures de vitesse d'onde de compression V_p ont été réalisées sur des échantillons découpés à partir des éprouvettes obtenues à la fin du chargement triaxial, sur différents chemins. Pour réaliser ces mesures, nous avons utilisé le mode opératoire décrit dans le chapitre II (section II.3.1).

Rappelons que toutes les mesures sont effectuées après déchargement mécanique de l'éprouvette. Les résultats sont alors exprimés en fonction des indices des vides après déchargement. Néanmoins pour des questions pratiques, les points d'essai ultrasons sur les plans [q - p'] sont représentés sur les chemins des contraintes, à des niveaux de contraintes que l'échantillon avait atteint avant déchargement.

III.2.1.1 Chemins isotropes

Les mesures ont d'abord été effectuées sur des chemins isotropes, illustrés dans le plan des contraintes [q - p'] sur la figure III.23 (b). Les noms des essais sont présentés sous la forme ISO-p'_{ic} avec une indication du plan à travers lequel l'onde est propagée (V pour le plan vertical, parallèle au chargement, et H pour le plan horizontal perpendiculaire au chargement). On retrouvera ces notations en Fig III.1.

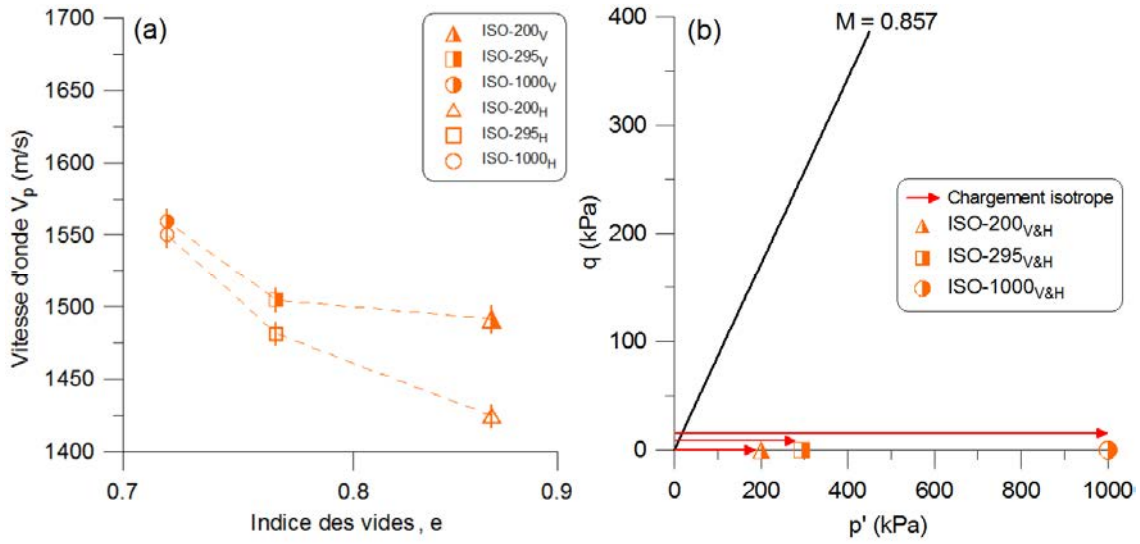


Figure III.23 : Mesures ultrasonores sur chemins isotropes : (a) vitesse d'onde de compression en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins isotropes dans le plan [q - p'].

Les variations de la vitesse d'onde de compression obtenues sur chemins isotropes à différentes contraintes de consolidation sont représentées sur la figure III.23 (a) dans le plan [log e - V_p]. L'incertitude sur la mesure est également reportée sur les points expérimentaux. Le calcul de l'erreur de mesure a été développé dans le chapitre II, section II.3.2.1 (équation II.9).

Les résultats montrent une évolution croissante de la vitesse avec la diminution de l'indice des vides due à la contrainte isotrope.

Les valeurs de vitesse d'onde de compression apparaissent plus élevées suivant le plan vertical ($V_{p\text{-}V}$) par rapport à celles obtenues suivant le plan horizontal ($V_{p\text{-}H}$). En revanche, cette différence tend à diminuer à mesure que la contrainte isotrope augmente. Ainsi, la nuance ($V_{p\text{-}V}$ - $V_{p\text{-}H}$) passe de 66.7 m/s dans ISO-200 à 9.3 m/s dans ISO-1000. Ceci nous renseigne sur l'existence d'une anisotropie structurale :

- initiale, non affectée par le chargement isotrope à faibles contraintes;

- induite, qui dépend uniquement de la contrainte isotrope appliquée et tend vers l'isotropie à fortes contraintes.

Anisotropie structurale :

L'évaluation de l'anisotropie élastique induite par le chargement dépend des vitesses d'onde de compression mesurées $V_{p\text{-}V}$ et $V_{p\text{-}H}$. Thomsen (1986) a défini plusieurs paramètres permettant d'identifier l'anisotropie élastique. Dans le cas de notre étude, nous proposons d'utiliser le paramètre de la vitesse d'onde de compression (χ) :

$$\chi = \frac{V_{p\text{-}V}^2 - V_{p\text{-}H}^2}{2V_{p\text{-}H}^2} \qquad \text{[III.8]}$$

La figure III.24 montre les variations du paramètre de l'anisotropie élastique χ associées aux différents chemins isotropes en fonction de l'indice des vides final.

Une anisotropie $\chi = 0$ indique la propriété d'isotrope.

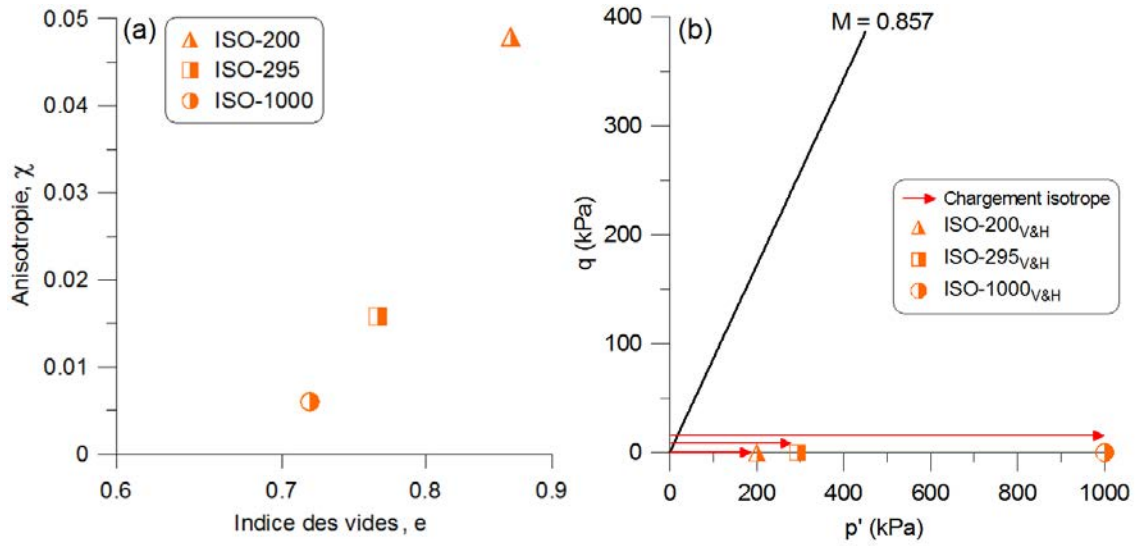


Figure III.24 : Anisotropie élastique : (a) variations du paramètre χ en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins isotropes dans le plan [q - p'].

Les résultats montrent des niveaux d'anisotropie relativement faibles (< 10^{-1}) quelque soit la contrainte isotrope appliquée. Cependant, une influence du niveau de chargement isotrope est mise en évidence en comparant les trois chemins, on montre une tendance à l'isotropie lorsque la contrainte isotrope augmente. Ce résultat est cohérent avec les études effectuées sur la même argile par Hicher et al. (2000), Bouziri (2007) et Hammad (2010). Ces travaux, dont quelques observations au MEB sont présentées sur la figure III.25, montrent une réorientation des particules argileuses au cours du chargement isotrope et la tendance vers une isotropie structurale. L'anisotropie de l'état initiale est due à la préparation de l'échantillon, par l'influence de la sédimentation et de la consolidation dans le consolidomètre. Cette anisotropie est définie comme une anisotropie initiale (chapitre II, section II.3.2.2).

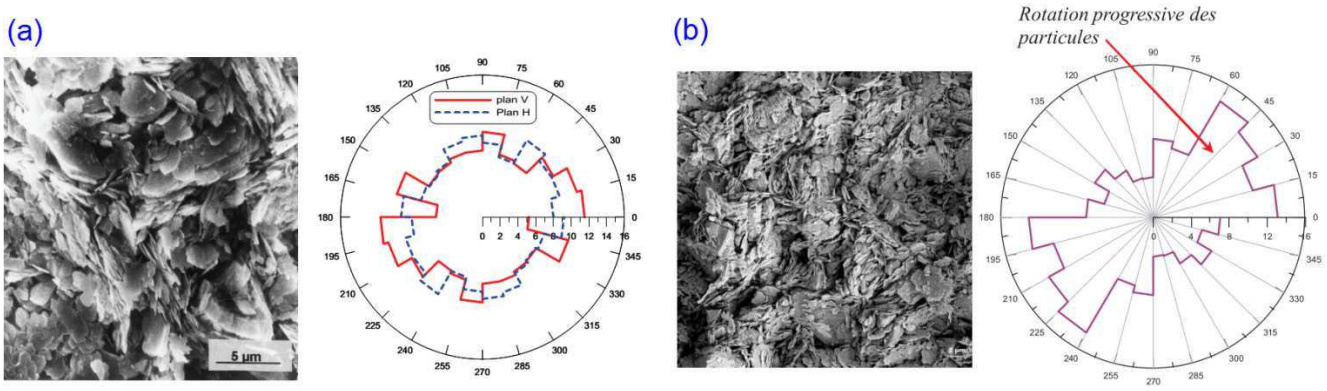


Figure III.25 : Observations au MEB de la kaolinite sur chemins isotropes : (a) p'_{ic} = 300 kPa (Hicher et al., 2000), (b) p'_{ic} = 1400 kPa (Bouziri, 2007).

L'anisotropie observée à l'état initial est également en accord avec les observations effectuées par Sivakumar et al. (2002) au microscope électronique à balayage MEB (chapitre I, section I.1.2.2). Les auteurs montrent également que l'anisotropie initiale de structure est liée aux conditions de préparation de l'argile.

Conclusion :

Les résultats expérimentaux ont permis de montrer qu'à faibles niveaux de contrainte l'anisotropie initiale, due à la préparation du matériau, persiste. A fortes contraintes, le chargement provoque le désordre des orientations de particules permettant d'avoir une isotropie structurale, et ainsi une vitesse d'onde de compression suivant le plan vertical équivalente à la vitesse d'onde de compression suivant le plan horizontal.

Enfin, la vitesse d'onde de compression (quelque soit la direction d'onde V ou H) augmente avec l'augmentation de la contrainte isotrope, ce qui montre une rigidité (par densification) du matériau.

III.2.1.2 Chemins à σ'_3=constante

Dans cette partie, les mesures ultrasonores concernent les chemins triaxiaux à σ'_3=constante, présentés en début du chapitre.

→ Propriétés élastiques à l'état ultime :

1- Chemin normalement consolidé

Sur le plan des contraintes [q - p'], représenté sur la figure III.26 (b), nous avons identifié les points où la mesure a été effectuée sur chemins normalement consolidés σ'_3=constante. Les vitesses d'onde de compression mesurées en ces points sont reportées en fonction de l'indice des vides final dans le plan [V_p - e] (Fig. III.26 a).

Remarque : les vitesses d'ondes de compression obtenues sur chemins isotropes sont également reportées dans tous les plans [V_p - e].

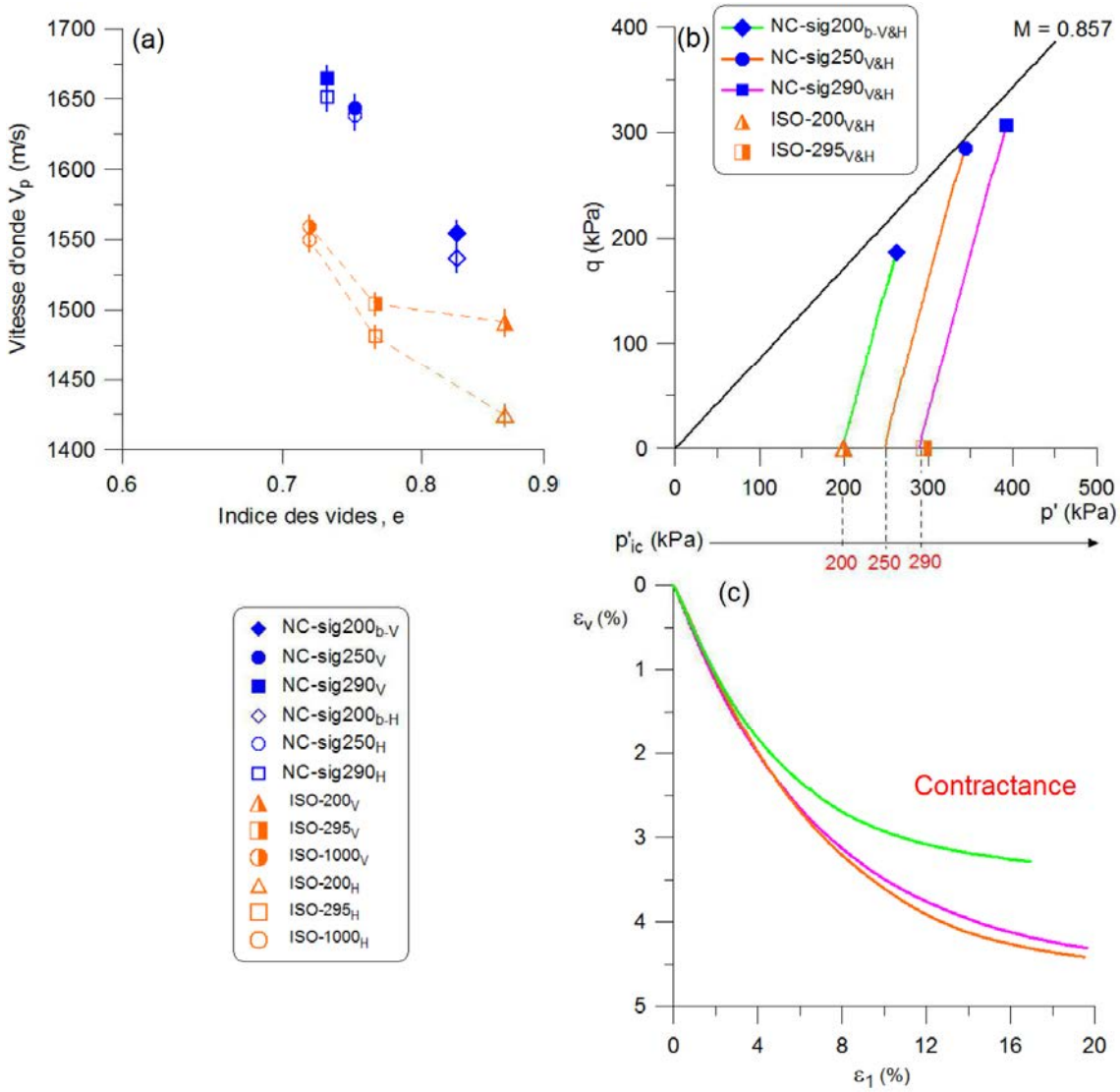


Figure III.26 : Propriétés élastiques à l'état ultime sur chemins normalement consolidés à σ'_3=constante : (a) vitesse d'onde de compression en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins de contrainte dans le plan [q - p'].

Les mesures effectuées proches de l'état critique montrent que :

- Quelque soit la contrainte de consolidation, pour un chemin donné, la valeur de la vitesse obtenue sur le plan V est très proche de celle obtenue sur le plan H.

- La vitesse d'onde croît à mesure que la contrainte de consolidation augmente. En moyenne, la vitesse obtenue sur le chemin NC-sig200$_a$ est faible de 100 m/s par rapport aux autres chemins.

Ce résultat est cohérent avec les résultats mécaniques, présentés en figure III.7, qui montrent un palier de résistance maximale en augmentation avec la contrainte de consolidation. La contractance obtenue en fin de chargement induit une densification de l'éprouvette par rapport à son état après consolidation isotrope.

La figure III.27 (a) montre globalement une isotropie proche de l'état critique. Ce résultat n'est pas soutenu par les observations de la microstructure, effectuées par Bouziri (2007) par exemple, qui montrent une orientation privilégiée et très marquée des particules argileuses, par bandes, de 40° environ par rapport au plan horizontal. Ces plans privilégiés ne sont pas perceptibles lorsque la mesure est orientée suivant les deux plans, horizontal et vertical, que nous avons choisis.

Il serait intéressant ici de mesurer la vitesse à travers le plan de localisation (macroscopique), et comparer avec les résultats obtenus ici.

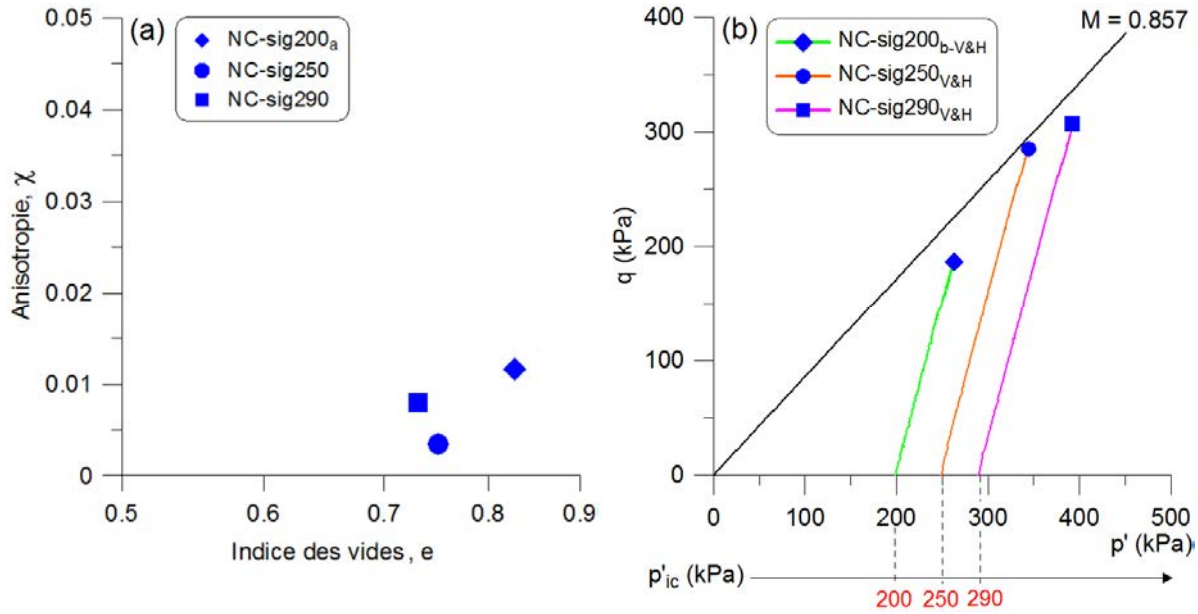


Figure III.27 : Anisotropie élastique : (a) variations du paramètre χ en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins normalement consolidés à σ'_3=constante dans le plan [q - p'].

2- Chemin surconsolidé

Sur chemins surconsolidés, les vitesses d'onde de compression mesurées sont reportées sur la figure III.28 en fonction de l'indice des vides final.

Les points de mesures sont indiqués dans le plan [q - p'] ainsi que dans le plan [q - ε_1].

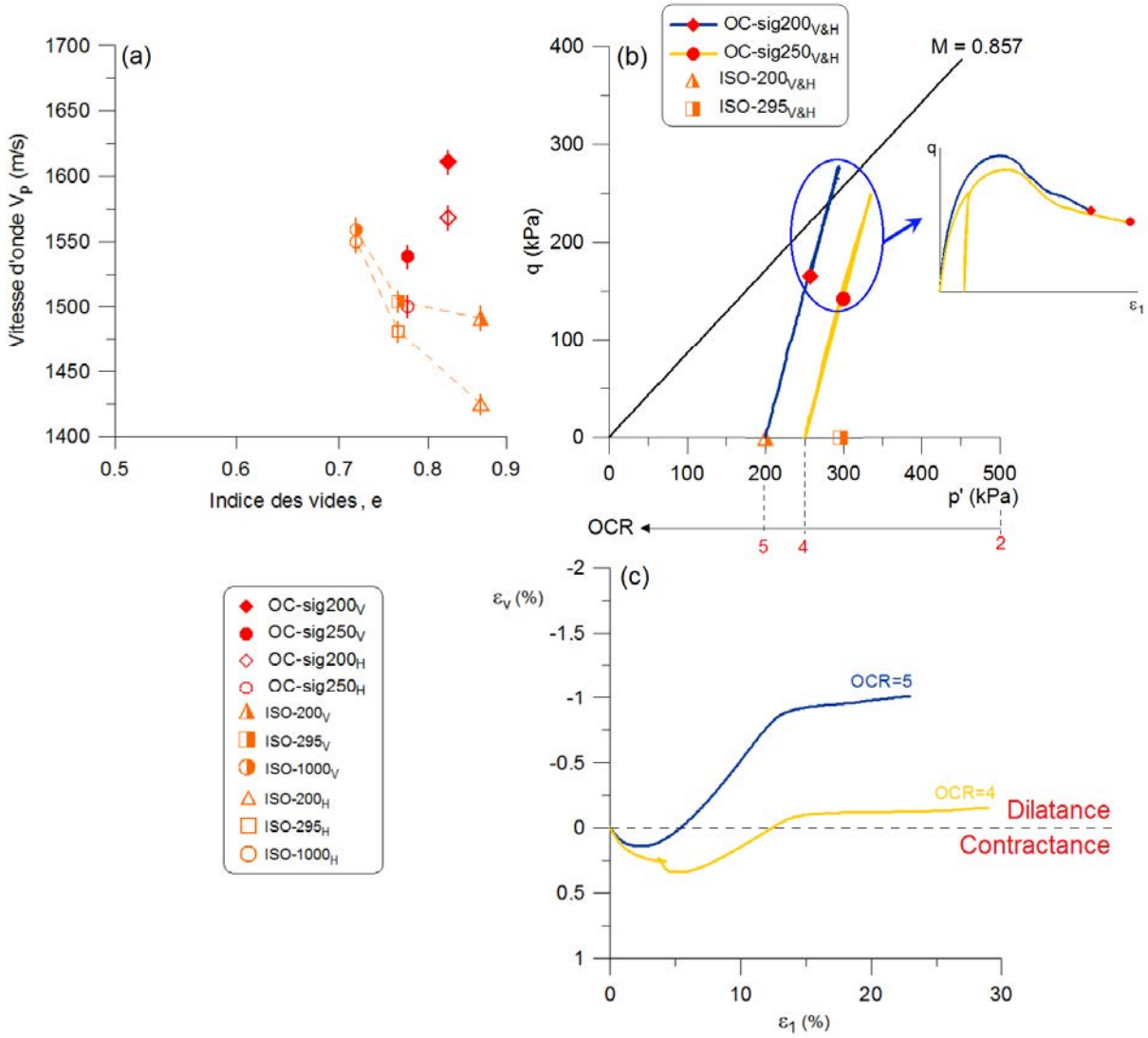


Figure III.28 : Propriétés élastiques sur chemins surconsolidés à σ'_3=constante : (a) vitesse d'onde en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins de contrainte dans le plan [q - p'].

En fonction du degré de surconsolidation, la vitesse d'onde mesurée dans OC-sig200 (OCR=5) est supérieure à celle obtenue dans OC-sig250 (OCR=4). Une légère différence entre les vitesses d'onde de compression associées au plan vertical et au plan horizontal est obtenue. Elle vaut en moyenne 43 m/s pour OC-sig200 (OCR=5) et 38 m/s pour OC-sig250 (OCR=4).

La nuance de vitesses d'onde de compression entre les plans vertical et horizontal de l'éprouvette se traduit par le paramètre de l'anisotropie χ en fonction de l'indice des vides final sur la figure III.29.

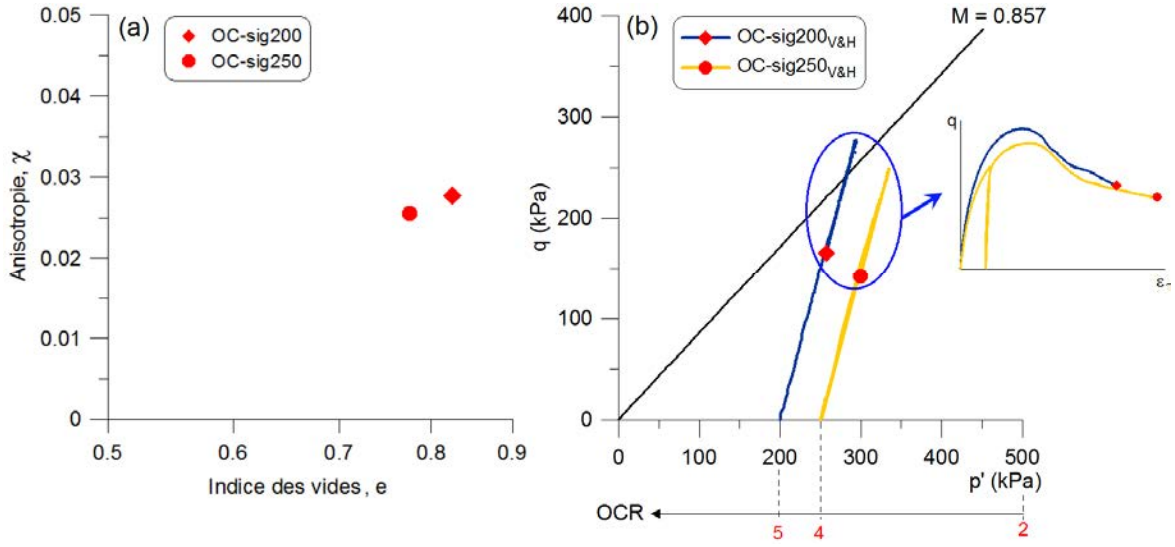


Figure III.29 : Anisotropie élastique : (a) variations du paramètre χ en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins surconsolidés à σ'_3=constante dans le plan [q - p'].

L'anisotropie élastique calculée montre une légère différence (3×10^{-3}) entre les deux chemins mais semble rester supérieure dans OC-sig200 (OCR=5).

On pourrait se poser la question de la relation entre le niveau de surconsolidation, le type d'endommagement, et l'anisotropie des propriétés élastiques obtenues en fin du chargement. Ces essais à eux seuls ne permettent pas de répondre précisément à cette question.

A l'échelle de l'éprouvette, les essais en condition surconsolidée ont donné une localisation de la déformation en fin du chargement après un phénomène de dilatance. Des études antérieures montrent une relation entre l'endommagement et l'organisation des particules argileuses, ces dernières s'orientent suivant les directions des microfissures comme l'ont montré les résultats de Bouziri (2007). Une étude comparative entre les résultats de la figure III.28, qui indiquent les valeurs de la vitesse d'onde du matériau endommagé d'une part, et les observations de la microstructure, au MEB par exemple, d'autre part, serait intéressante.

3- Comparaison entre les chemins normalement consolidés et surconsolidés

Afin de voir l'impact de la surconsolidation, nous avons analysé les essais NC-sig250 et OC-sig250 (OCR=4). Ces chargements sont menés sur même chemin, après consolidation isotrope, l'un en normalement consolidé et l'autre en surconsolidé.

La figure III.30 présente les vitesses d'onde de compression en fonction de l'indice des vides final mesurées sur chacun des deux chemins représenté dans le plan des contrainte [q - p'].

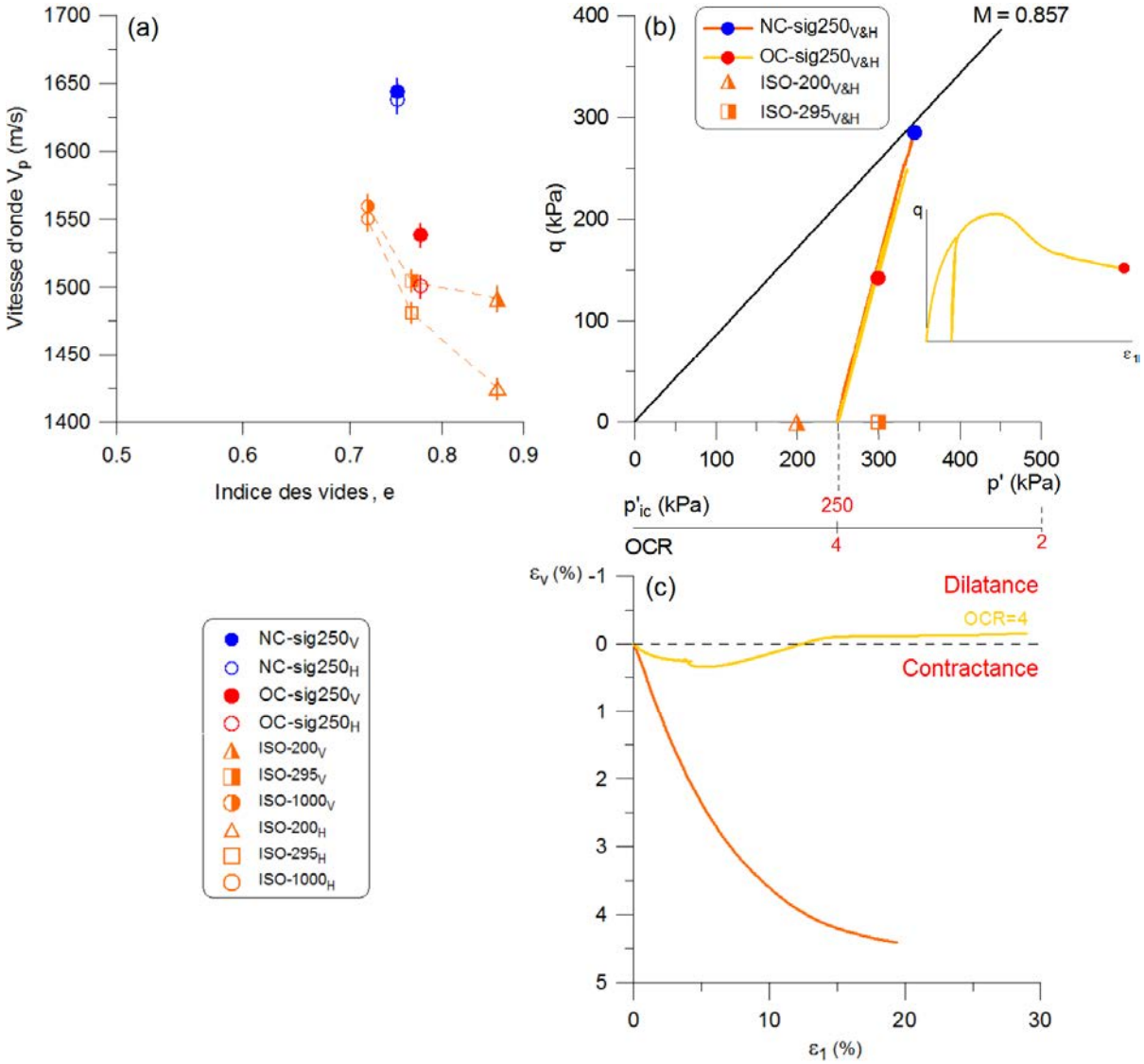


Figure III.30 : Propriétés élastiques sur chemins à σ'_3=cste de même contrainte de consolidation
(a) vitesse d'onde de compression en fonction de l'indice des vides final,
(b) chemins de contrainte.

Partant d'une même contrainte de consolidation (p'_{ic} ou p'_1 = 250 kPa), la vitesse d'onde de compression obtenue sur le chemin normalement consolidé est supérieure à celle mesurée sur le chemin surconsolidé. D'autre part, en normalement consolidé, la vitesse du plan vertical est équivalente à celle obtenue sur le plan horizontal, alors qu'en surconsolidé les vitesses d'onde de compression semblent différentes.

III.2.1.3 Chemins purement déviatoriques

Nous présentons dans cette partie l'évolution de la vitesse d'onde sur chemins purement déviatoriques normalement consolidés et surconsolidés.

→ Propriétés élastiques à l'état ultime :

1- Chemin normalement consolidé

Les vitesses d'onde de compression mesurées sont reportées sur la figure III.31 en fonction de l'indice des vides final en indiquant les points de mesures dans le plan [q - p'].

Les vitesses d'onde de compression enregistrées sont globalement supérieures à celles mesurées en chargement isotrope. Les vitesses mesurées sur les chemins dont la contrainte de consolidation est environ 300 kPa sont très proches hormis pour l'essai NC-p300.

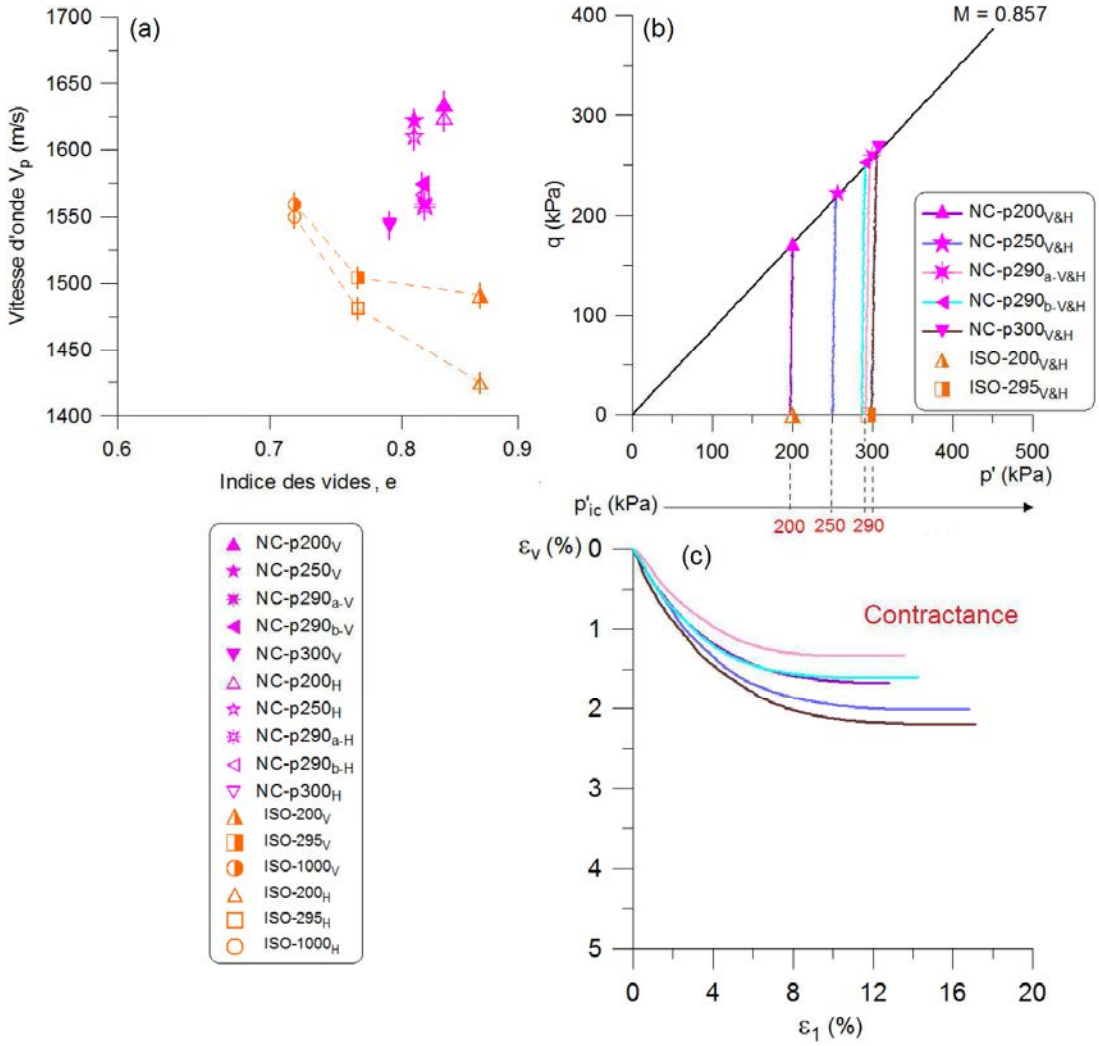


Figure III.31 : Propriétés élastiques sur chemins normalement consolidés à p'=constante : (a) vitesse d'onde en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins de contrainte dans le plan [q - p'], (c) variations de volume dans le plan [ε_v - ε_1].

La figure III.32 montre une intensité de l'anisotropie faible sur l'ensemble des chemins ($\chi < 10^{-2}$).

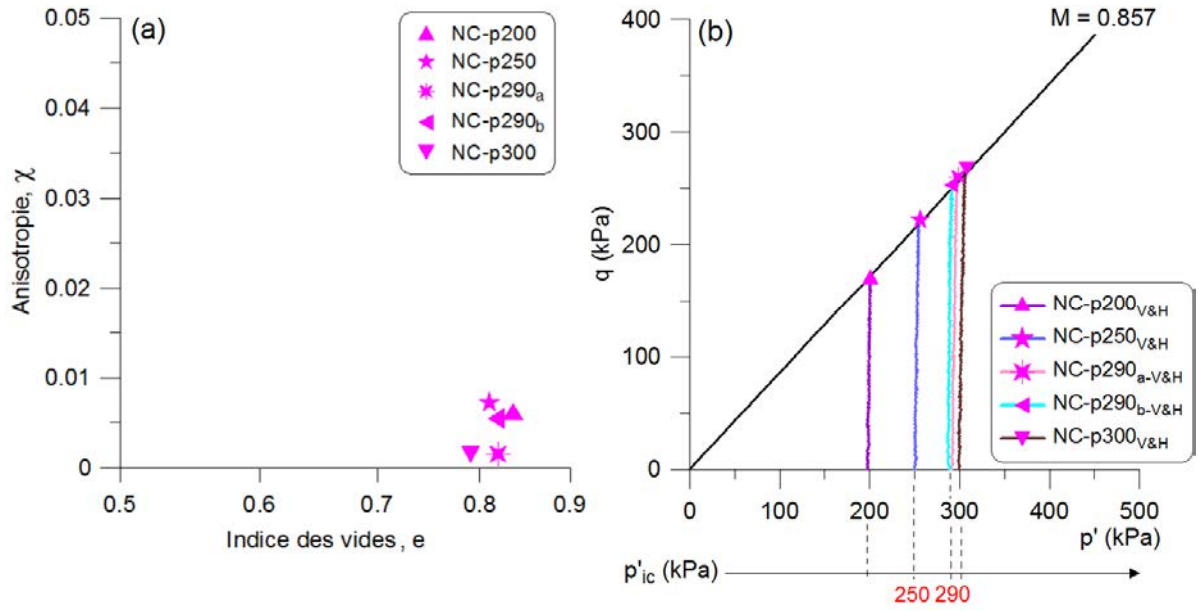


Figure III.32 : Anisotropie élastique : (a) variations du paramètre χ en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins normalement consolidés à p'=constante dans le plan [q - p'].

2- Chemin surconsolidé

Dans le comportement surconsolidé, les vitesses d'onde de compression mesurées sur les différents chemins réalisés sont présentées sur la figure III.33.

Les valeurs obtenues montrent un niveau de vitesse d'onde faible qui semble équivalent à celui obtenu après le chargement isotrope. Les vitesses d'onde de compression quasi-équivalentes, sont inférieures à celles obtenues en normalement consolidé. Le phénomène de dilatance, qui caractérise le comportement surconsolidé, induit une rupture de type diffuse sous forme de microfissures identifiées par l'orientation privilégiée des particules argileuses.

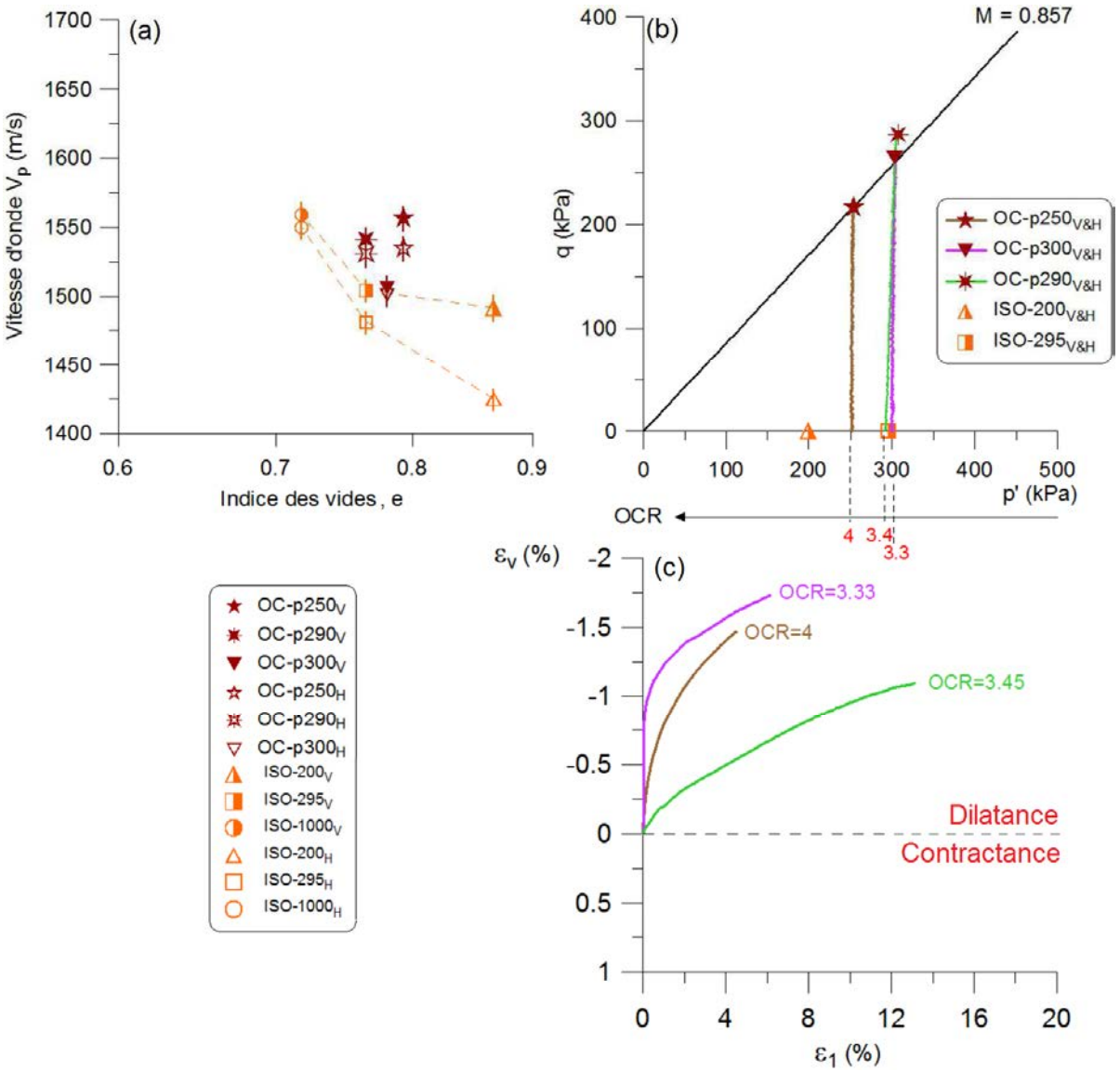


Figure III.33 : Propriétés élastiques sur chemins surconsolidés à p'=constante : (a) vitesse d'onde en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins de contrainte dans le plan [q - p'], (c) variations de volume dans le plan [ε_v - ε_1].

L'analyse de la différence entre les vitesses d'onde de compression du plan verticale et du plan horizontal est représentée sur la figure III.34 via le paramètre d'anisotropie χ.

Sur chemins surconsolidés à p'=constante, l'anisotropie reste faible comprise entre 5×10^{-3} et 15×10^{-3}.

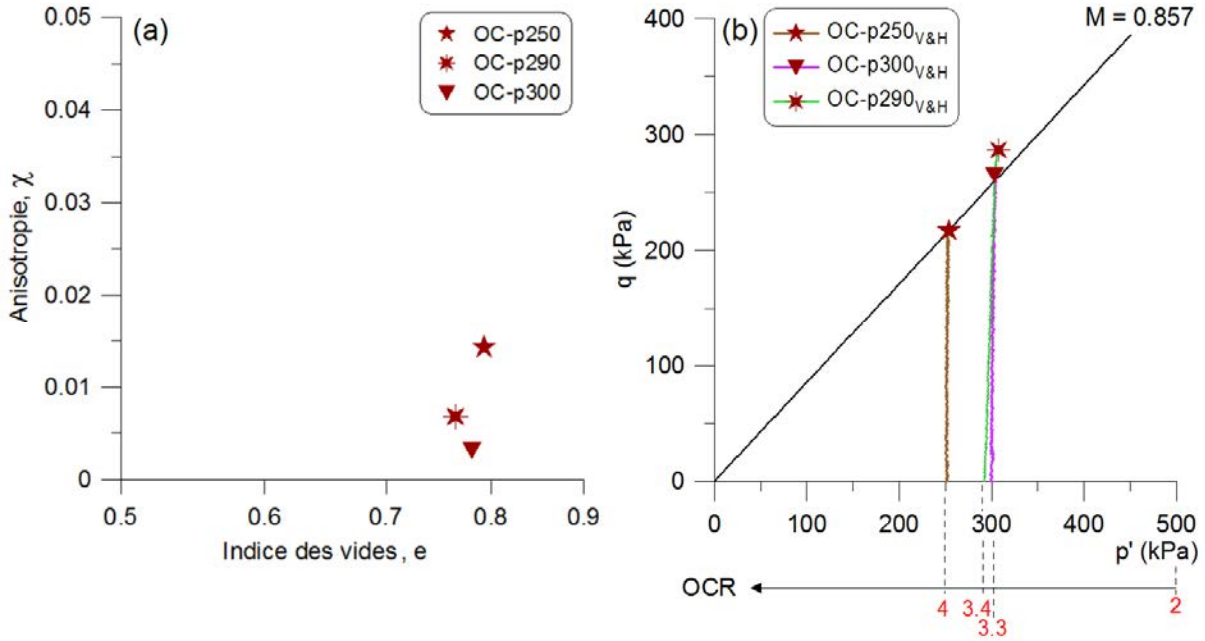


Figure III.34 : Anisotropie élastique : (a) variations du paramètre χ en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins surconsolidés à p'=constante dans le plan [q - p'].

3- Comparaison entre les chemins normalement consolidés et surconsolidés

Dans la même perspective qui consiste à comparer les comportements normalement consolidé et surconsolidé, nous avons analysé les vitesses d'onde de compression mesurées sur deux chemins initiés à partir de la même contrainte de consolidation. Sur la figure III.35, les vitesses associées à la contrainte de consolidation, p'_{ic} ou p'_1 = 250 kPa, sont présentées en fonction de l'indice des vides.

Les résultats montrent que la vitesse d'onde obtenue sur le chemin normalement consolidé NC-p250 est supérieure à celle mesurée sur le chemin surconsolidé OC-p250. Cette différence vaut en moyenne 70 m/s entre les deux chemins.

D'autre part, la différence entre les vitesses d'onde du plan horizontal et du plan vertical est plus importante sur le chemin surconsolidé OC-p250.

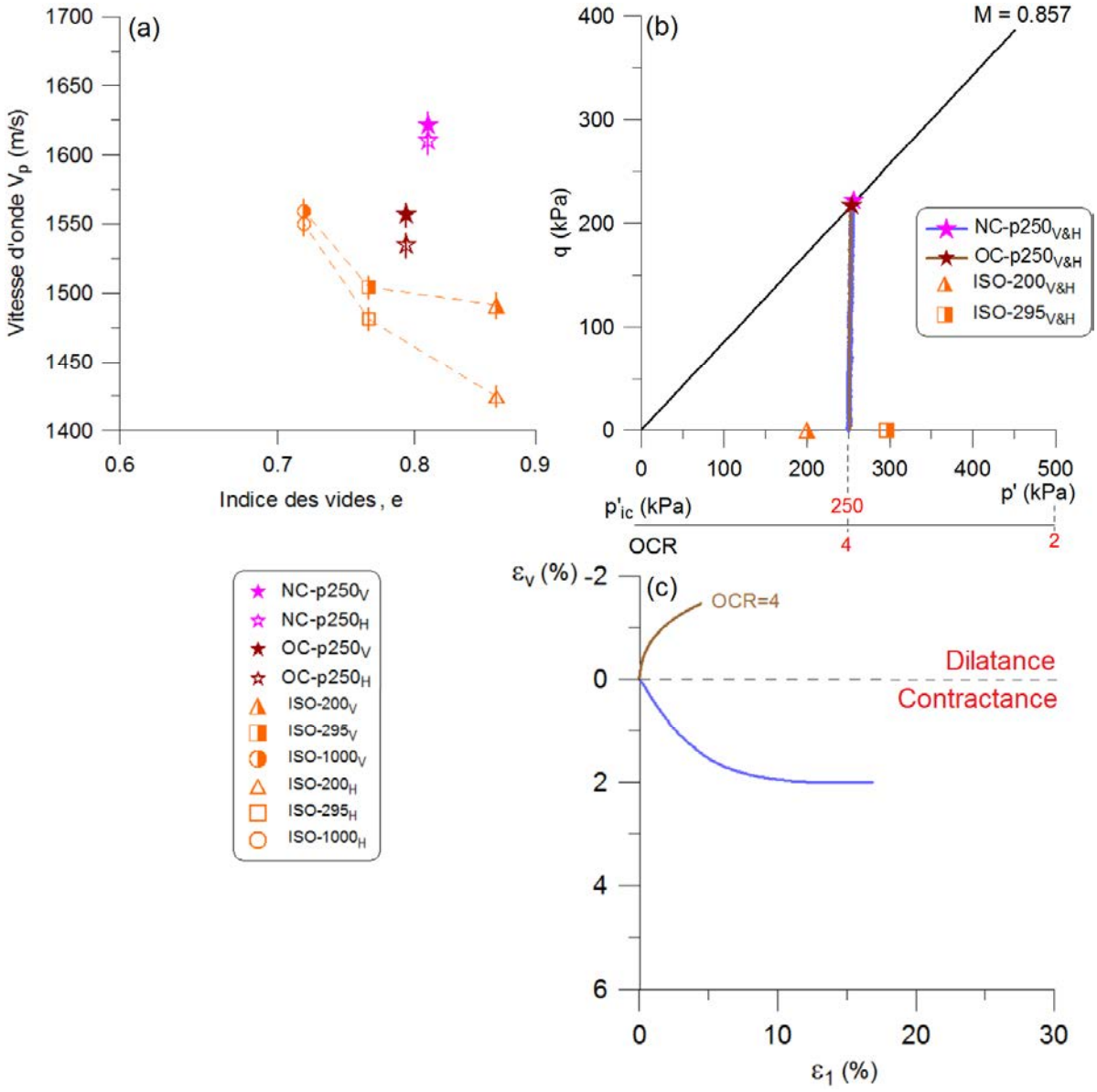


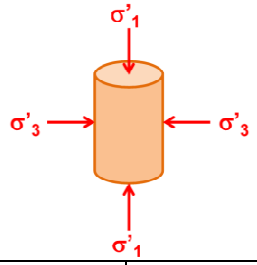
Figure III.35 : Propriétés élastiques sur chemins à σ'_3=cste de même contrainte de consolidation (a) vitesse d'onde en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins de contrainte dans le plan [q - p'], (c) variations de volume dans le plan [ε_v - ε_1].

III.2.1.4 Etude de l'état ultime et différents chemins de contrainte

1- Cas normalement consolidé

Afin d'analyser l'effet du chemin de contrainte, nous avons synthétisé dans le tableau III.5 les caractéristiques définissant chaque chemin.

Tableau III.5 : Comparaison de l'état de contrainte sur différents chemins (phase de cisaillement).

Caractéristiques	σ'_3=constante	p'=constante
Etat de contrainte		
Mode du chargement	Déplacement imposé	Contraintes imposées
Vitesse d'écrasement	V_{max} = 7,56×10^{-3} mm/min	$U_{max} = \frac{q_f}{\Delta t}$ kPa/min
Déformation volumique	$\varepsilon_v = \varepsilon_v^{(q)} + \varepsilon_v^{(p')}$	$\varepsilon_v = \varepsilon_v^{(q)}$

L'étude consiste à confronter les vitesses d'onde obtenues sur deux chemins, l'un à p'=constante et l'autre à σ'_3=constante, effectués à partir de la même contrainte de consolidation p'_{ic}.

Dans la série d'essais triaxiaux que nous avons réalisée, nous pouvons mener l'analyse en normalement consolidé pour trois essais à p'_{ic} (200, 250 et 290 kPa) sur six chemins à σ'_3=constante et à p'=constante représentés sur la figure III.36 (b). Les vitesses d'onde obtenues à la fin de chaque chemin de contrainte sont représentées sur la figure III.36 (a) en fonction de l'indice des vides après déchargement triaxial.

Les résultats montrent une influence du chemin de contrainte, conduit à partir d'une même contrainte de consolidation p'_{ic}, sur l'évolution de la vitesse d'onde.

Pour une contrainte de consolidation donnée, la vitesse mesurée sur un chemin à σ'_3=constante est supérieure à celle obtenue sur un chemin à p'=constante à l'exception de p'_{ic}=200 kPa, où l'essai NC-sig200$_b$ était au début de cette étude programmé pour s'arrêter à ce niveau de contrainte et donc n'a pas été conduit jusqu'à l'état ultime.

Ceci peut être expliqué par la contractance du matériau provoquée uniquement par la partie déviatorique de la contrainte sur chemin à p'=constante (Tab. III.5). Ainsi, la contractance induite sur chemin purement déviatorique est moins importante que celle provoquée sur un chemin à σ'_3=constante où la déformation volumique dépend des deux composantes isotrope et déviatorique (Tab. III.5) comme on peut le constater sur la figure III.36 (c).

La contractance confère à l'échantillon une densification, caractérisée par une diminution de l'indice des vides, permettant à la vitesse d'onde mesurée d'être élevée.

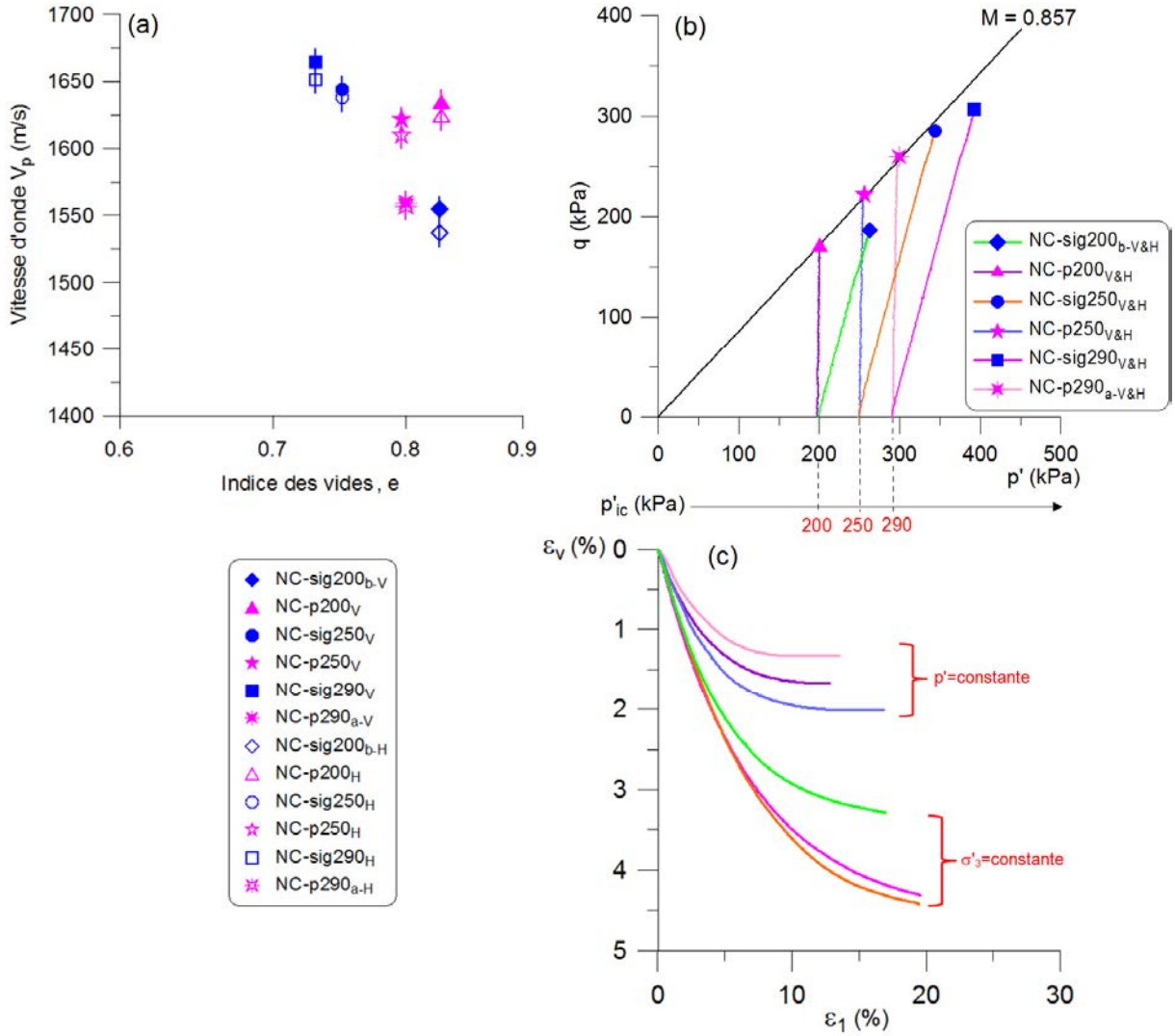


Figure III.36 : Effet du chemin de contrainte en normalement consolidé : (a) vitesse d'onde en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins de contrainte dans le plan [q - p'], (c) variations de volume dans le plan [ε_v - ε_1].

2- Cas surconsolidé

En surconsolidé, nous avons choisi de traiter une combinaison de chemins, à p'=constante et σ'_3=constante, entre OC-sig250 et OC-p250.

La figure III.37 présente les vitesses d'onde mesurées en fonction de l'indice des vides en ces points localisés dans le plan [q - p'].

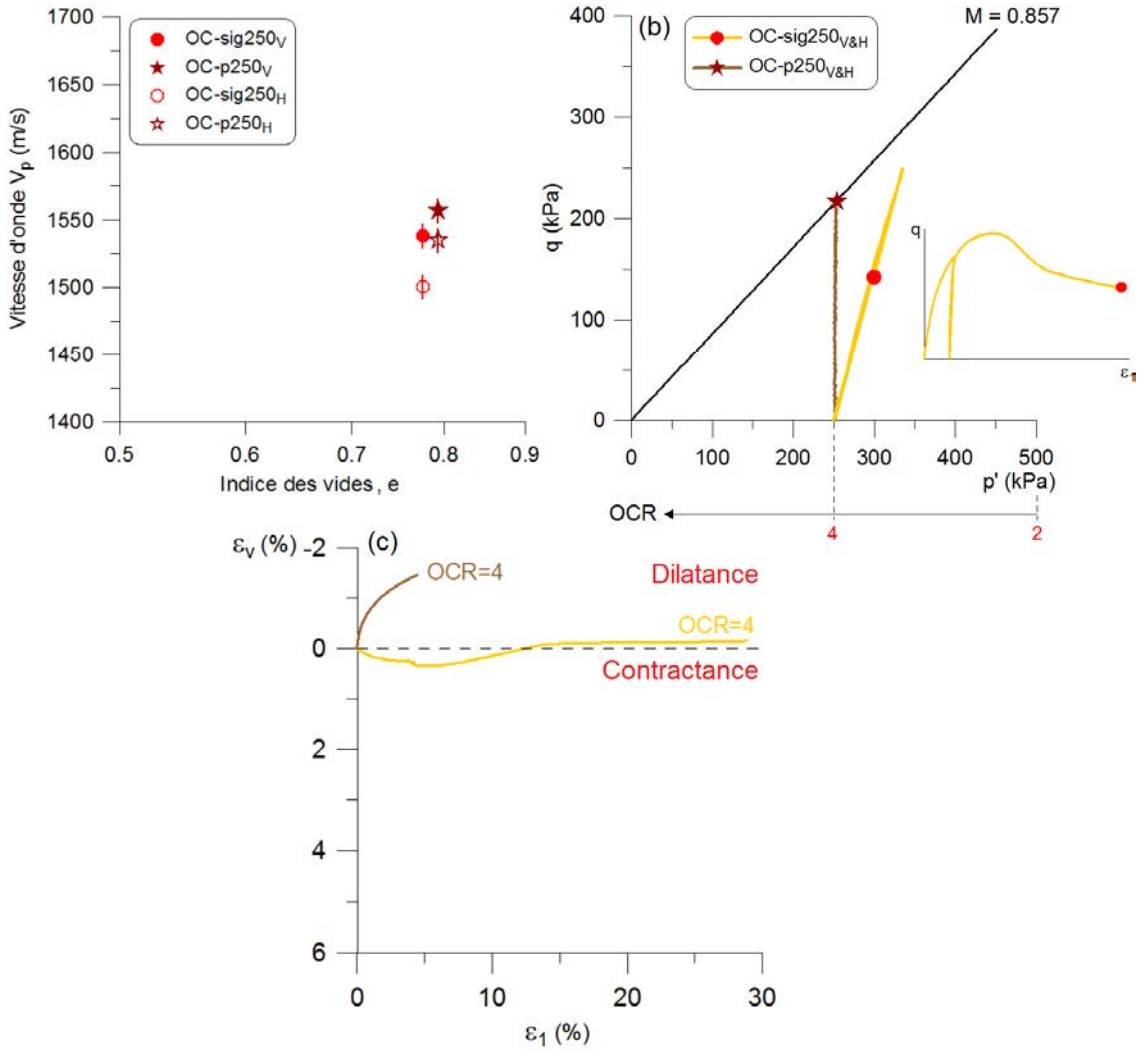


Figure III.37 : Effet du chemin de contrainte en surconsolidé : (a) vitesse d'onde en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins de contrainte dans le plan [q - p'].

Pour un même degré de surconsolidation OCR=4, les vitesses d'ondes mesurées à la fin des deux chemins sont proches. En effet, en surconsolidé, la déformation volumique met en évidence le phénomène de dilatance (Fig. III.37 c). Ce dernier est plus marqué sur le chemin purement déviatorique (OC-p250) où la déformation volumique, provoquée par la seule composante déviatorique de la contrainte, est négative dès le début du chargement. En revanche, sur un chemin classique à σ'_3=constante, la déformation volumique débute par une légère contractance induite par la composante isotrope de la contrainte puis passe en dilatance lorsque la composante déviatorique de la contrainte s'active.

La vitesse d'onde de compression dans OC-sig250 est légèrement inférieure à celle obtenue dans OC-p250. Ceci peut être dû au développement de microfissures dans l'échantillon, à la fin du chemin OC-sig250, et à la chute du déviateur après le pic. La différence entre les vitesses d'onde de compression horizontale et verticale vaut 38 m/s dans OC-sig250 contre 22 m/s dans OC-p250.

III.2.2. Propriétés élastiques du niveau de contrainte fixe P2 - Influence du chemin de contrainte sur les propriétés élastiques du niveau P2

Dans cette partie, nous allons nous focaliser sur les mesures de vitesse d'onde effectuées au niveau de contrainte symbolisé par le point P2, atteint par quatre chemins de contrainte en normalement consolidé et en surconsolidé.

Rappelons l'état de la déformation volumique plastique au niveau de contrainte du point P2 établie dans la première partie de ce chapitre (III.1.4.2) sur la figure III.38 en fonction du déviateur.

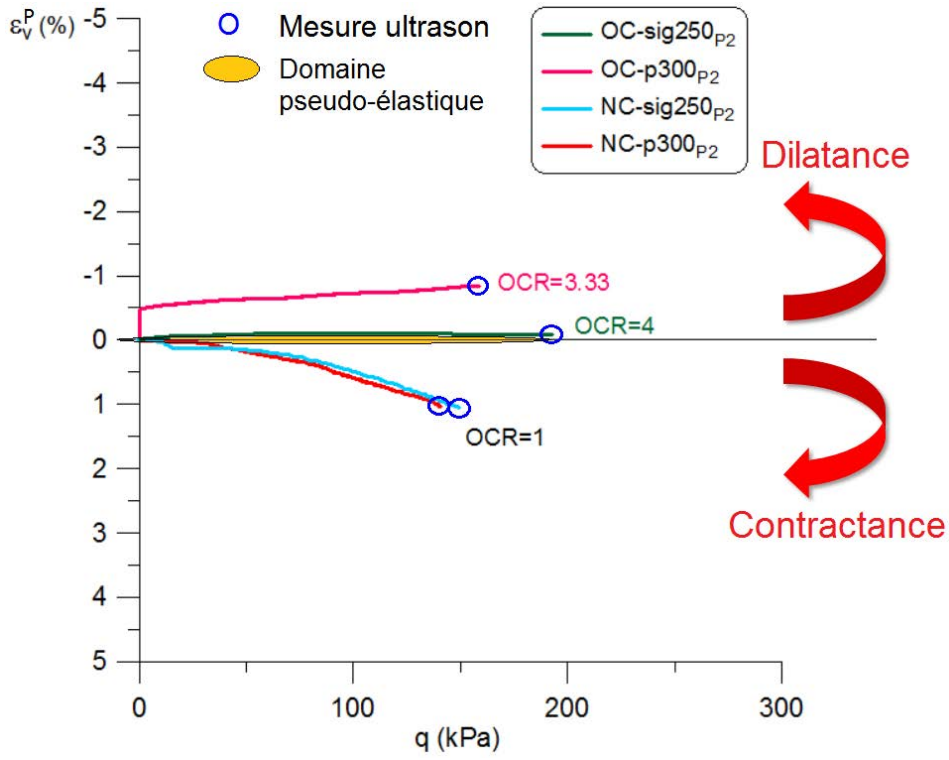


Figure III.38 : Déformation volumique plastique en fonction du déviateur au point P2 suivant différents chemins.

1- Cas normalement consolidé

La figure III.39 (b) représente le plan des contrainte [q - p'] sur lequel nous avons reporté les deux chemins conduisant au point P2 en normalement consolidé. Les vitesses d'onde obtenues sont présentées en fonction de l'indice des vides sur la figure III.39 (a).

Les valeurs de vitesse d'onde (Fig. III.39 a) mesurées sont très proches au même niveau de contrainte du point P2. Les chemins normalement consolidés donnent une vitesse moyenne de 1539 m/s entre les essais NC-sig250$_{P2}$ et NC-p300$_{P2}$.

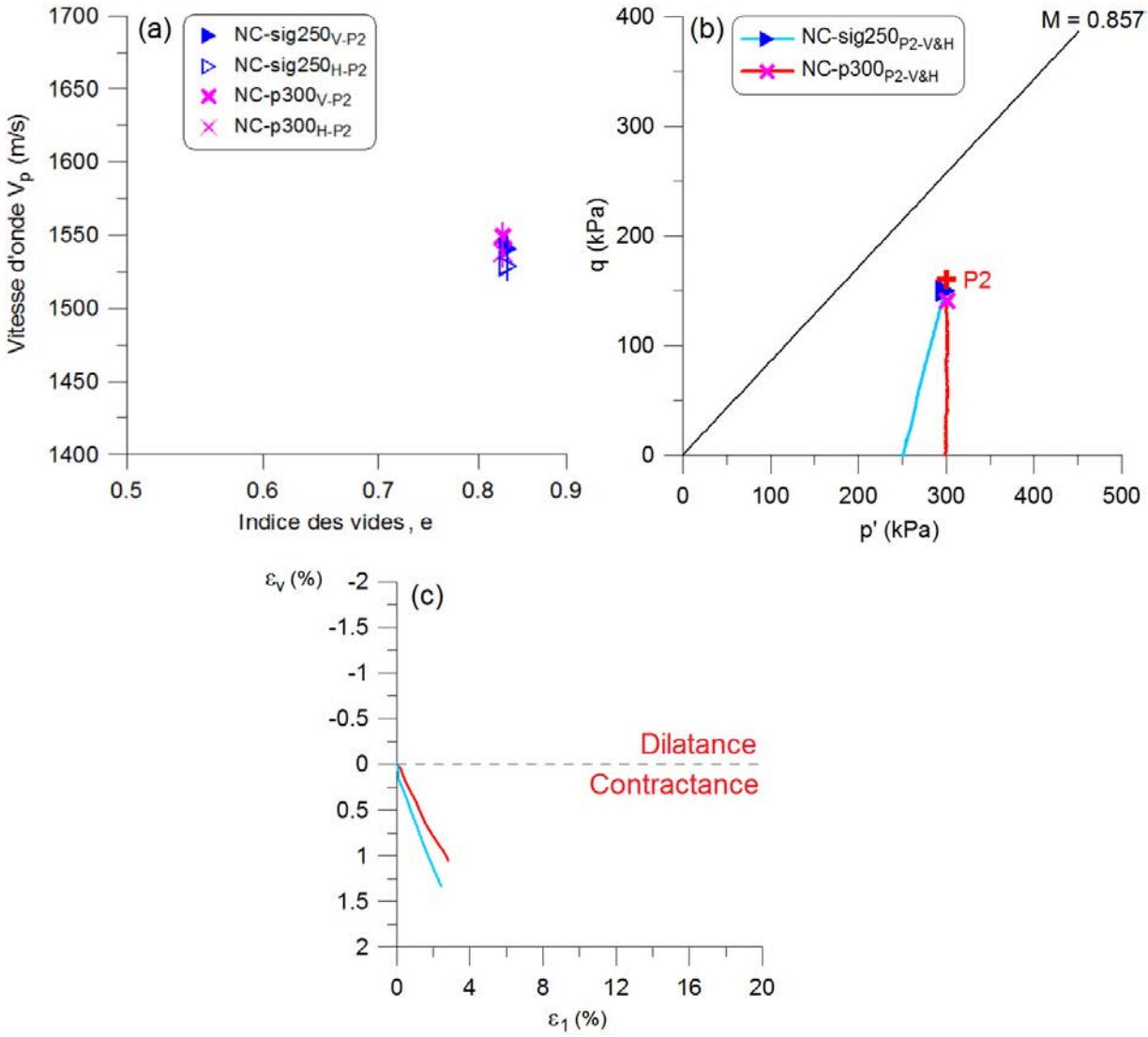


Figure III.39 : Propriétés élastiques au point P2 sur chemins normalement consolidés : (a) vitesse d'onde en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins de contrainte dans le plan [q - p'], (c) variations de volume dans le plan [ε_v - ε_1].

Sur les chemins NC-sig250$_{P2}$ et NC-p300$_{P2}$ la déformation volumique au point P2 est très proche, et de nature contractante comme on peut le constater sur la Fig. III.39 (c). Ce qui peut expliquer les résultats des vitesses d'ondes.

2- Cas surconsolidé

Les vitesses d'onde mesurées sur les deux chemins surconsolidés prenant fin au point P2 sont reportées sur la figure III.40 avec la localisation des points de mesure dans le plan [q - p']. Due à des difficultés expérimentales, l'essai OC-sig250$_{P2}$ dépasse légèrement le niveau de contrainte du point P2 souhaité.

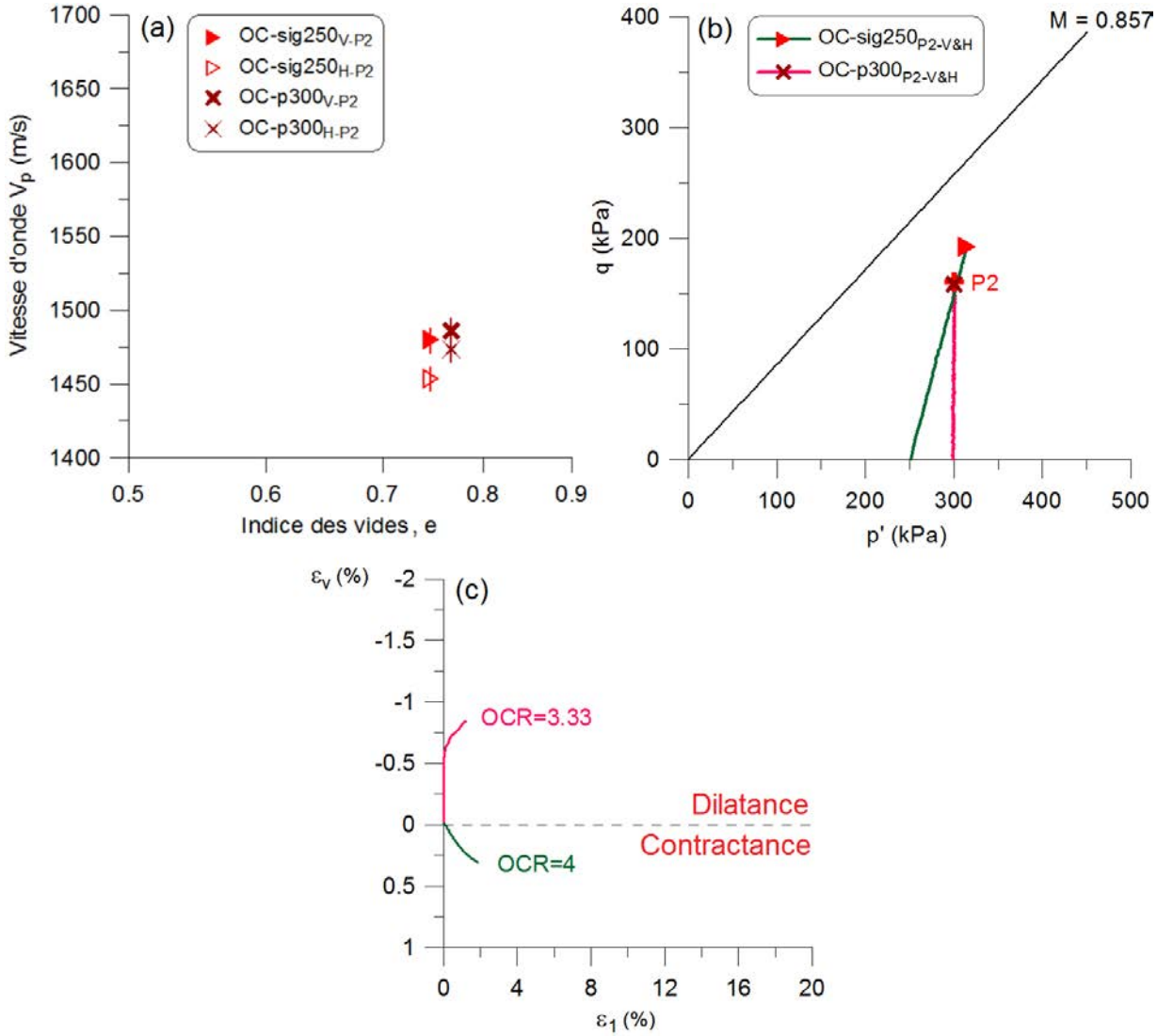


Figure III.40 : Propriétés élastiques au point P2 sur chemins surconsolidés : (a) vitesse d'onde en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins de contrainte dans le plan [q - p'], (c) variations de volume dans le plan [ε_v - ε_1].

Les chemins surconsolidés OC-sig250$_{P2}$ et OC-p300$_{P2}$ mettent en évidence une vitesse d'onde moyenne de 1473 m/s.

3- Comparaison entre les chemins normalement consolidés et surconsolidés

Les mesures de vitesses d'onde effectuées au niveau de contrainte du point P2 sur les différents chemins, normalement consolidés et surconsolidés, sont présentées sur la figure III.41.

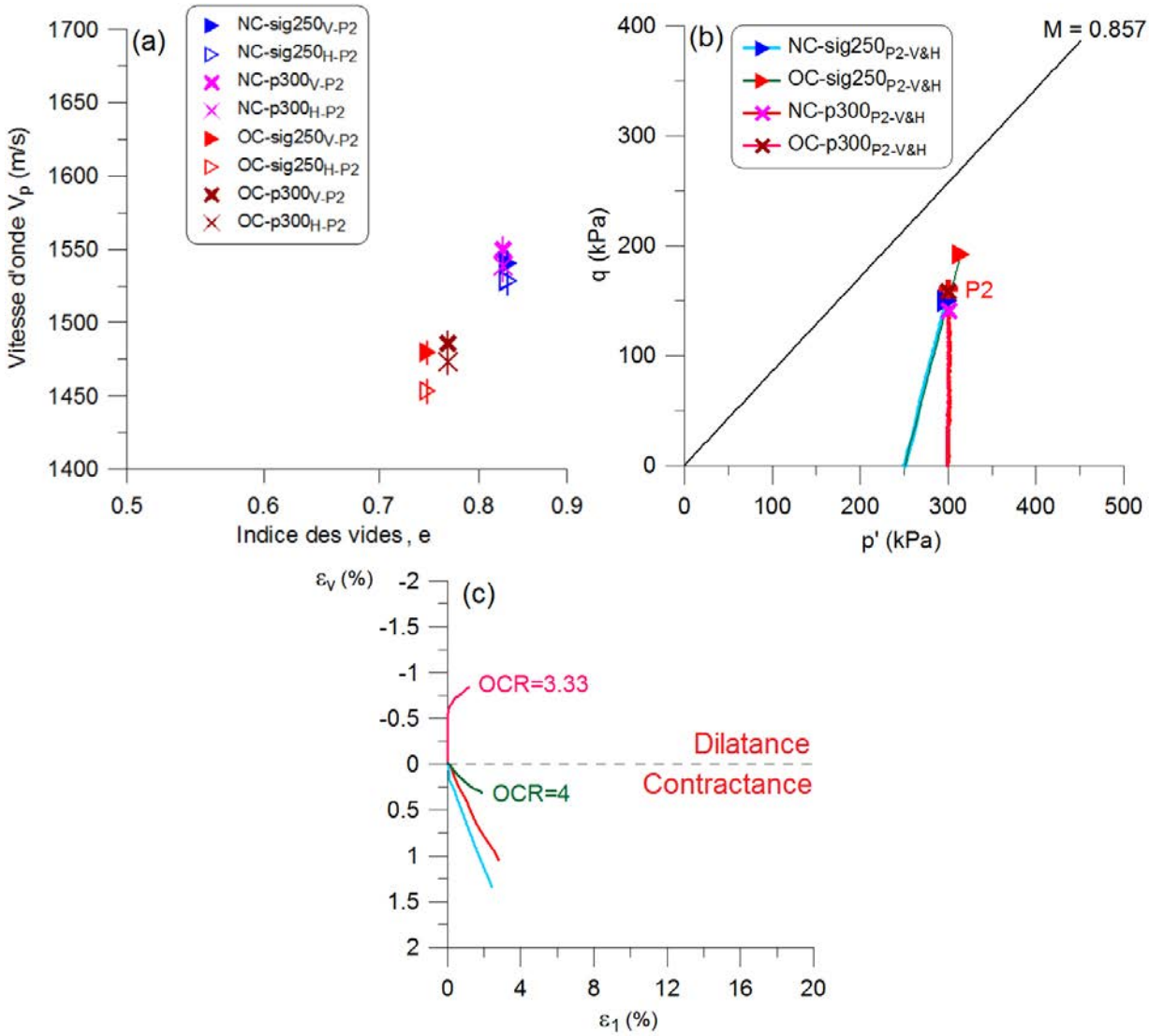


Figure III.41 : Effet de la surconsolidation au point P2 : (a) vitesse d'onde en fonction de l'indice des vides final, (b) chemins de contrainte dans le plan [q - p'], (c) variations de volume dans le plan [ε_v - ε_1].

Les résultats au point P2 montrent que les deux vitesses d'onde de compression mesurées en normalement consolidé sont supérieures à celles obtenues en surconsolidé. L'écart entre les valeurs moyennes en normalement consolidé et en surconsolidé est de 66 m/s.

En revanche, pour les chemins surconsolidés conduits à un niveau de contrainte fixé, la vitesse d'onde de compression n'est pas affectée par le chemin de contrainte.

4- Anisotropie élastique

L'anisotropie élastique au niveau de contrainte fixe P2 est estimée via le paramètre χ. La figure III.42 présente l'évolution de χ en fonction de l'indice des vides final sur les quatre chemins de contrainte.

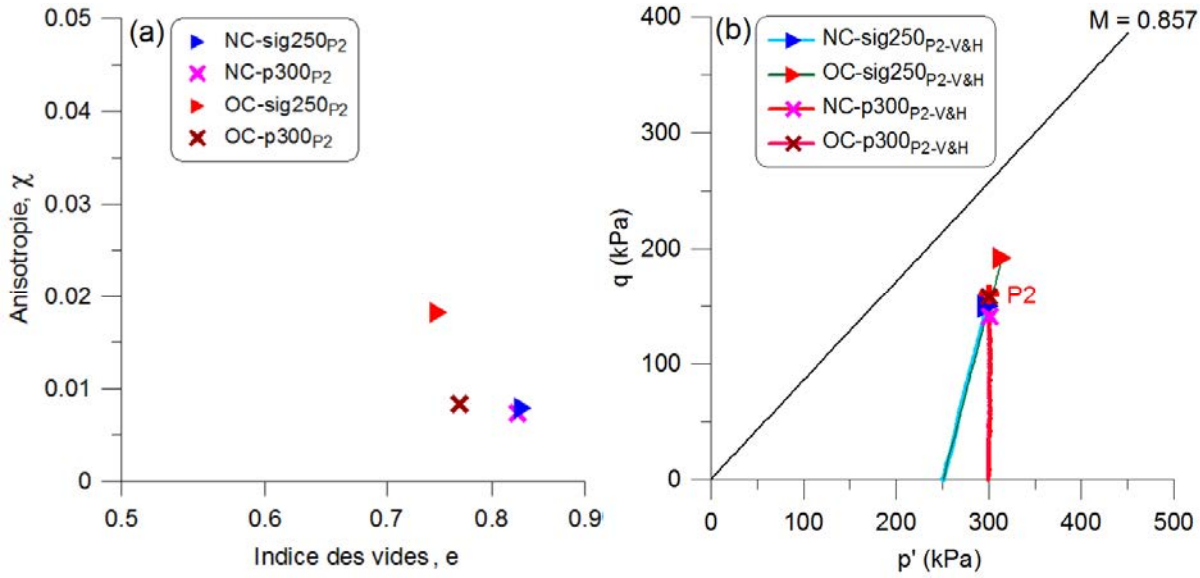


Figure III.42 : Anisotropie élastique au même niveau de contrainte du point P2 sur différents chemins normalement consolidés et surconsolidés.

Au niveau de point P2, à un même niveau de contrainte, nous obtenons une anisotropie très proche pour les trois essais NC-sig250$_{P2}$, NC-p300$_{P2}$ et OC-p300$_{P2}$. En revanche, l'anisotropie calculée pour l'essai OC-sig250$_{P2}$ semble plus élevée, due au léger dépassement du niveau de contrainte du point P2.

A ce stade de chargement, atteint à un niveau de contrainte inférieur à la résistance maximale, le chemin de contrainte suivi n'affecte pas sensiblement les propriétés structurelles du matériau.

III.2.3. Effet de l'endommagement et du processus de rupture sur les propriétés élastiques

Dans cette section, nous proposons une analyse estimative sur l'effet de l'endommagement sur la progression des propriétés élastiques de l'échantillon le long du chemin de contrainte. Pour cela, nous avons la possibilité de mener cette analyse sur 2 niveaux avant l'état final :

- à la fin de la consolidation isotrope, par l'ajout de la tendance de V_p obtenue sur chemins isotropes (section III.2.1.1),

- au niveau du point P2, localisé au dessous de l'état ultime.

L'une des difficultés rencontrées dans cette partie est le fait que les mesures soient effectuées sur différents échantillons. Lorsqu'on veut suivre les propriétés sur le chemin des contraintes, il est nécessaire d'utiliser différents échantillons. Ainsi, trois essais ont été réalisés sur un chemin donné, en normalement et en surconsolidé.

Nous rappelons sur la figure III.43 les variations de l'indice des vides en fonction de la contrainte effective moyenne dans les essais choisis pour cette analyse.

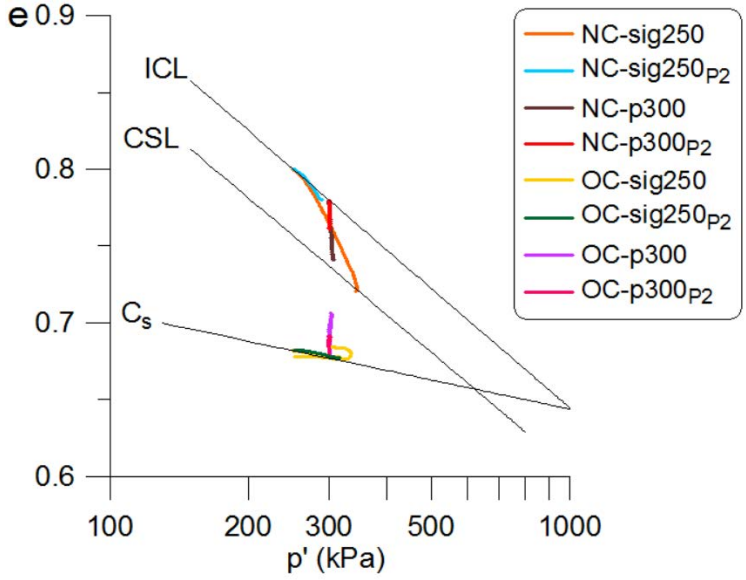


Figure III.43 : Variations de l'indice des vides en fonction de la contrainte moyenne effective sur les chemins choisis.

Sur la figure III.44, les points indiquent l'arrêt du chargement, avant le déchargement triaxial, puis la réalisation des mesures ultrasons pour les chemins sélectionnés sur le plan [q - p']

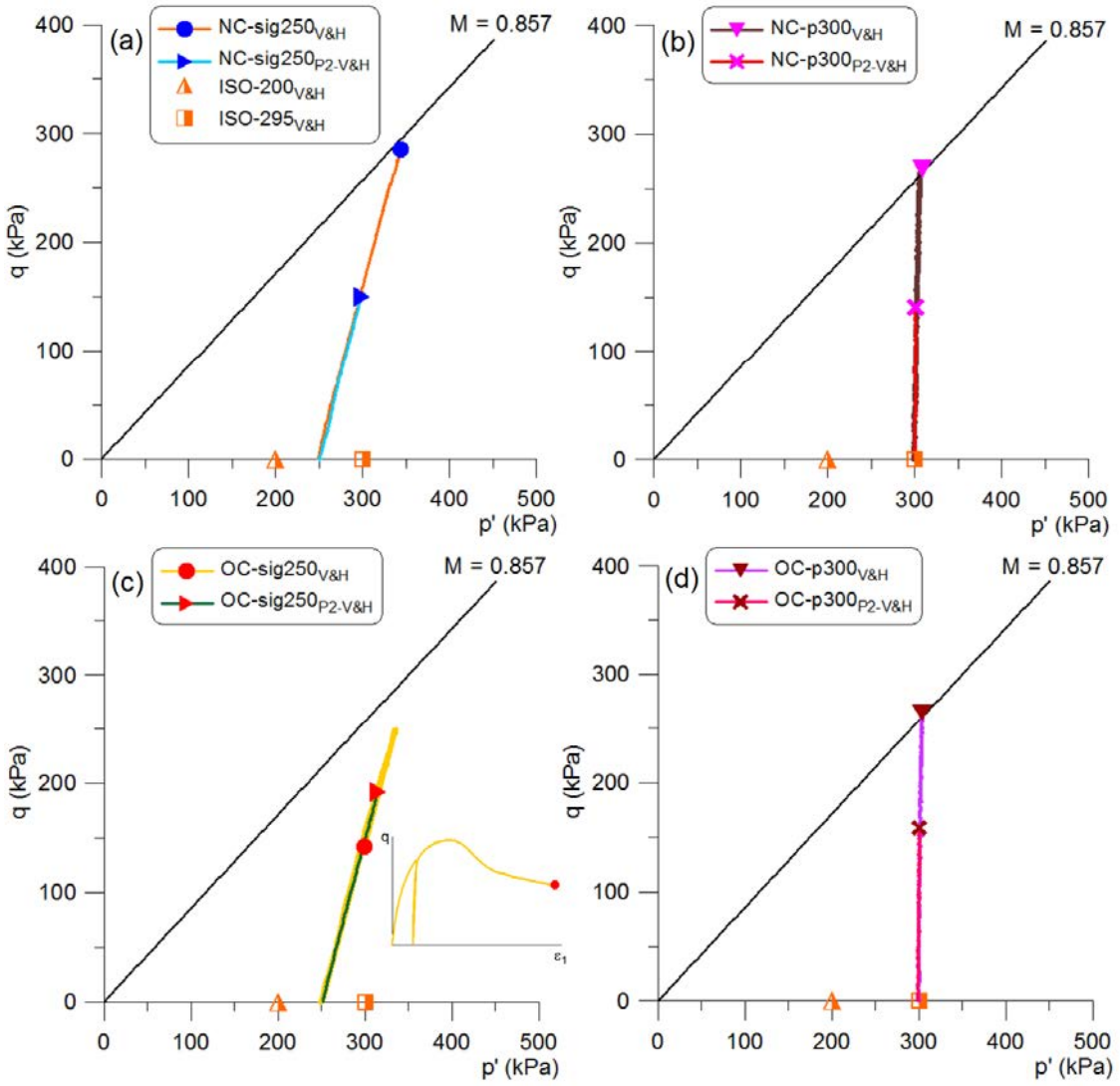


Figure III.44 : Chemins de contraintes choisis et localisation des mesures ultrasons dans [q - p'].

Les vitesses d'onde de compression sont représentées sur la figure III.45 en fonction de l'indice des vides final après déchargement. Les résultats montrent que :

- Sur chemins à σ'_3 = constant : en normalement consolidé (Fig. III.45 a), la vitesse d'onde de compression a tendance à augmenter avec la contractance, caractérisée par la diminution de l'indice des vides, en allant de la fin de la consolidation isotrope à l'état ultime (NC-sig250) en passant par le point P2 (NC-sig250$_{P2}$). En surconsolidé (Fig. III.45 c), la vitesse d'onde de compression au point P2 a diminué par rapport à celle obtenue sur chemins isotropes. C'est probablement dû à la formation de fissures ou microfissures dans l'échantillon induites par l'endommagement.

- Sur chemins à p'=constante : la vitesse d'onde de compression ne semble pas être affectée en normalement consolidé (Fig. III.45 b) au niveau du point P2 (NC-p300$_{P2}$). Elle est supérieure à celle obtenue sur chemin isotropes. Par ailleurs, on peut constater que par la suite la contractance dans NC-p300 n'a pas fait augmenter la vitesse contrairement sur chemin à σ'_3=constante (Fig. III.45 a). En surconsolidé (Fig. III.45 d), la diminution de la

vitesse d'onde de compression au point P2, où l'échantillon subit une dilatation, par rapport à son niveau sur chemins isotropes met en évidence une influence de l'endommagement sur sa mesure.

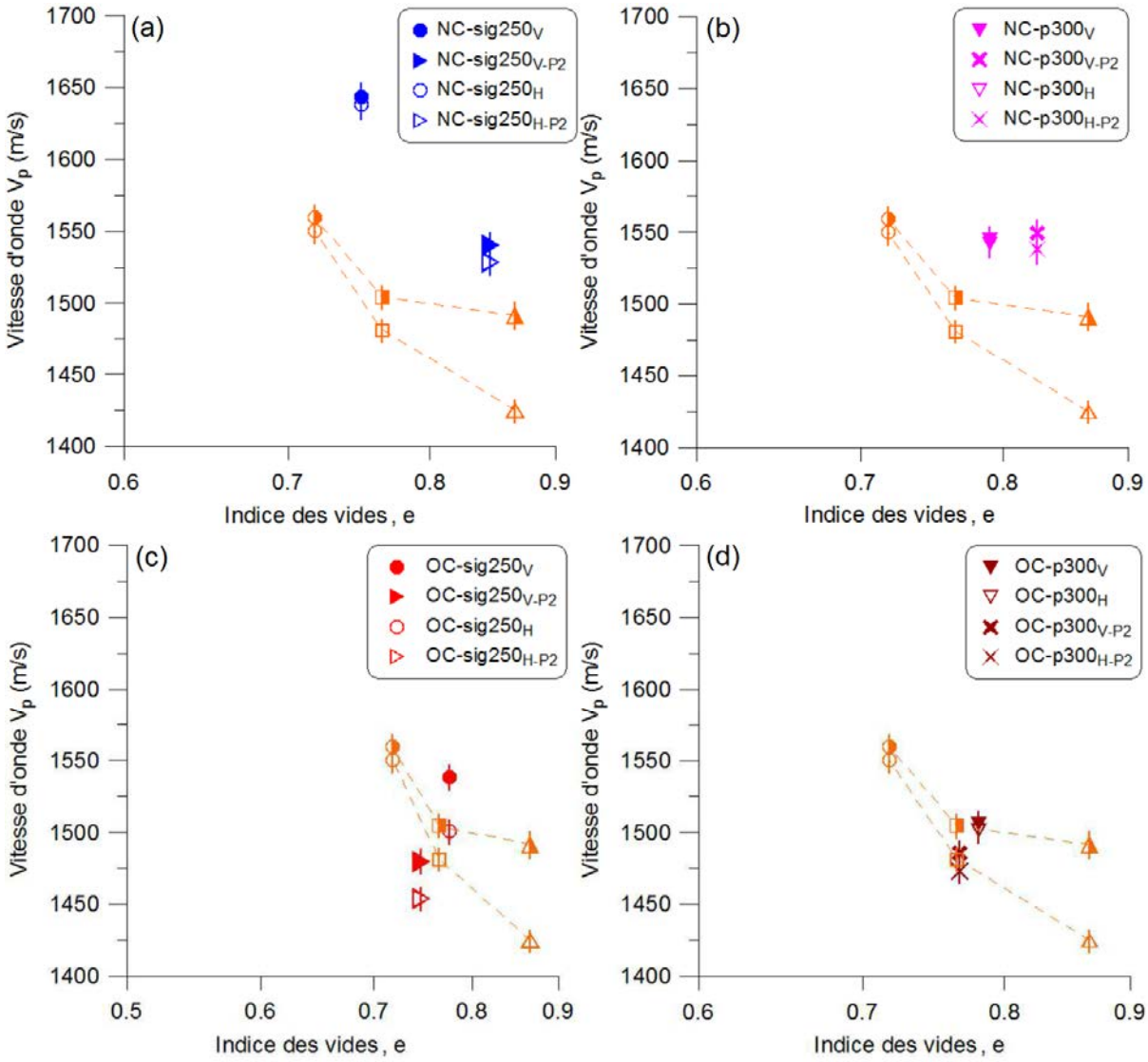


Figure III.45 : Vitesses d'onde de compression obtenues dans les différents chemins étudiés dans cette analyse en fonction de l'indice des vides final.

III.2.4. Discussion

Les vitesses obtenues sur les différents chemins ont été confrontées avec la loi empirique de Reuss (1929) appliquée aux sols argileux sur la figure III.46. Cette loi exprime l'évolution de la vitesse d'onde de compression en fonction de la porosité de l'argile étudiée. Nous avons agrandit la tranche comprise entre 30 et 50% de porosité afin d'affiner l'affichage de nos résultats (Fig. III.46 b). Ces derniers sont confondus avec la courbe de Reuss sur les différents chemins.

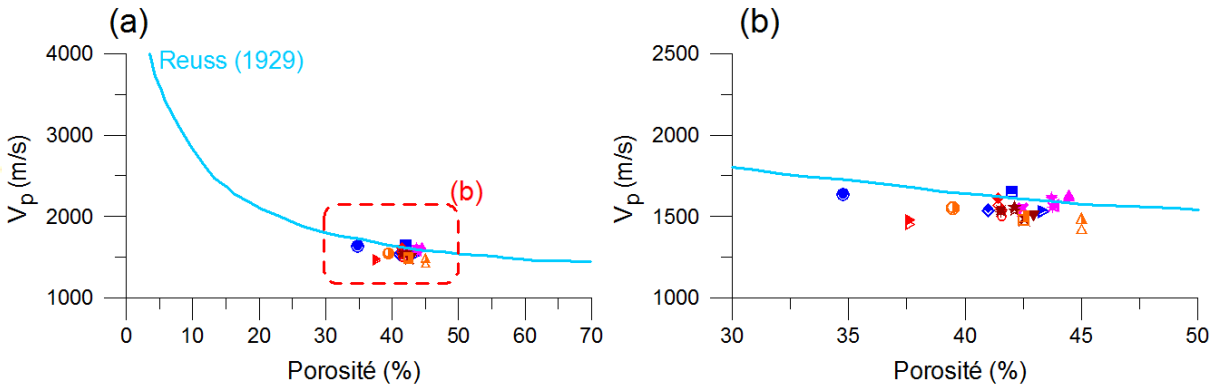


Figure III.46 : Vitesse d'onde de compression en fonction de la porosité dans tous les essais.

Une fois la vitesse d'onde analysée, nous avons déterminé le module élastique dynamique notamment en considérant le coefficient de Poisson déduit à partir des essais triaxiaux.

Les résultats du module élastique dynamique E_{dyn}, déterminé à partir de la vitesse d'onde de compression, sont discutés dans l'annexe 2.2.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité deux volets permettant d'analyser le comportement de l'argile sur chemins triaxiaux.

Nous retiendrons du ***premier volet*** concernant le comportement mécanique les différentes conclusions suivantes :

- Le chargement et déchargement isotropes nous ont permis de caractériser les propriétés intrinsèques du matériau étudié, à savoir l'indice de compression C_c=0.258 et l'indice de gonflement C_s=0.063.

- Sur chemins normalement consolidés, nous avons approché sur le plan des contraintes [q - p'] la droite de l'état critique de pente M=0.857 avec un angle de frottement ϕ'=22°. Dans le plan [e - log p'], à partir de la droite isotrope ISL et les valeurs critiques de l'indice des vides, nous avons déduit la droite de l'état critique CSL avec une différence entre les deux droites Δe_{max} = 0.051. La valeur de M peut ici être discutée, du fait du développement d'un plan de localisation au cours de l'essai.

- En surconsolidé, les chemins à σ'_3=constante n'atteignent pas la droite de l'état critique CSL dans le plan [e - log p'], à cause d'apparition des zones de localisation provoquant la chute du déviateur et ainsi fragiliser l'intégrité de l'échantillon. Le mode de chargement à contraintes imposées adopté pour les chemins à p'=constante ne permet pas non plus d'atteindre la droite CSL puisque le pic ne peut pas apparaître dans ce cas.

- Les résultats en termes de déformation volumique ε_v en normalement consolidé ont mis en évidence deux types de déformation en fonction du chemin de contrainte : la contractante ($\varepsilon_v > 0$) et la dilatance ($\varepsilon_v < 0$). Cependant, en surconsolidé, les chemins à σ'_3=constante marquent une dilatance prématurément stoppée à la fin du chargement après avoir passé d'abord par une légère contractance au début du chargement. Les chemins purement déviatoriques présentent uniquement une dilatance.

- Au niveau de contrainte du point P2, la déformation volumique est positive (contractance) et caractérisée par des valeurs très proches entre les deux chemins à p'=constante et à σ'_3=constante en normalement consolidé. En surconsolidé, la déformation volumique dépend du chemin de contrainte, elle est de nature dilatante à p'=constante (due uniquement à la partie déviatorique) et contractante à σ'_3=constante (due à la partie isotrope).

Dans le ***deuxième volet*** ce chapitre, nous pouvons apporter les conclusions suivantes :

Les propriétés élastiques d'un matériau argileux sous chargement triaxial peuvent être déterminées à partir de la mesure ultrasonore de la vitesse d'onde de compression. La caractérisation de ces propriétés élastiques permet d'identifier les paramètres pouvant affecter leur évolution.

- Sur chemins isotropes, la vitesse d'onde de compression augmente à mesure que la contrainte de consolidation isotrope augmente et que l'indice des vides diminue. La contrainte isotrope tend à renfoncer les propriétés élastiques du matériau après son déchargement.

- Sur chemins à σ'_3=constante conduits jusqu'à l'état ultime, la vitesse d'onde de compression dépend des conditions de surconsolidation du matériau. Si le matériau est normalement consolidé, la vitesse d'onde de compression augmente avec la diminution de l'indice des vides (suite à l'augmentation de la contrainte de consolidation). En revanche, les résultats sont plus difficiles à interpréter dans le cas du matériau surconsolidé, compte tenu du faible nombre d'essais. Nous avons trouvé que la vitesse d'onde de compression varie peu entre l'OCR=5 et l'OCR=4, avec un indice des vides qui change peu également. Les vitesses d'onde de compression sont globalement inférieures aux vitesses obtenues en normalement consolidé.

- Sur les chemins à p'=constante, nous avons constaté des résultats disparates de la vitesse d'onde de compression, mais aussi de l'indice des vides en fin de chargement. La complexité du chemin ainsi que la difficulté à atteindre un état ultime, rend difficile l'interprétation. Toutefois, nous pouvons avancer que la vitesse d'onde de compression dans le cas normalement consolidé se trouve légèrement plus forte comparé aux résultats après chargement isotrope. Dans le cas surconsolidé, la vitesse d'onde de compression s'affaiblit et devient équivalente, voire inférieure, à celle obtenue après consolidation isotrope. Le chargement sur chemin à p'=constante tend donc à affaiblir le matériau.

Partant de la même contrainte de consolidation, les vitesses d'onde de compression mesurées à p'=constante semblent légèrement inférieures à celles obtenues à σ'_3=constante. Mais l'impact n'est pas très marqué.

A un même niveau de contrainte fixé (point P2), et à différents chemins en normalement consolidé et en surconsolidé, les résultats montrent que le chemin de contrainte n'a pas d'influence sur la vitesse d'onde de compression. Ce sont les conditions de consolidation (normalement consolidé, ou en surconsolidé) qui affectent d'une manière beaucoup plus sensible la vitesse d'onde de compression.

Une analyse qualitative a été menée sur l'influence de l'endommagement sur les propriétés élastiques de l'échantillon le long du chemin de contrainte. Ceci a été mis en évidence en surconsolidé, sur différents chemins, où la vitesse d'onde de compression diminue par rapport à celle obtenue sur chemins isotropes, impactée par l'endommagement progressif du matériau.

Enfin, l'étude réalisée dans ce chapitre nous a permis de caractériser les propriétés élastiques d'une argile endommagée sur différents chemins triaxiaux par la méthode acoustique d'insertion-substitution.

Chapitre IV

Comportement de l'argile sous dessiccation libre et contrôlée

Chapitre IV. Comportement de l'argile sous dessiccation libre et contrôlée

Sommaire :

Introduction……..220

IV.1. Courbe de rétention d'eau et variations des paramètres hydriques……...221

IV.1.1. Caractéristiques des chemins de séchage……..221

IV.1.2. Courbe de retrait - Limite de retrait (SL)…….....227

IV.1.3. Courbe de rétention d'eau et succion globale……228

IV.2. Phénomène de retrait……230

IV.2.1. Aspects bibliographiques……230

IV.2.2. Dessiccation contrôlée et retrait……232

IV.2.3. Séchage libre et retrait……252

IV.3. Estimation de la succion locale dans la matrice……...262

IV.3.1. Méthodologie de calcul de la succion locale……...262

IV.3.2. Distributions de la succion locale sur différents chemins hydriques……265

IV.3.3. Une loi pour la distribution de la succion locale……...267

IV.4. Analyse des déformations locales via la CIN……271

IV.4.1. Evolution des déformations locales sous dessiccation contrôlée……271

IV.4.2. Evolution des déformations locales sous séchage libre……288

Conclusion……295

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux en **quatre volets.** L'objectif majeur est de contribuer à la compréhension du comportement global d'une argile (échantillon de 190×130×4 mm^3), initialement saturée (w_0 = 1.2 w_L), sous dessiccation libre et contrôlée.

Le **premier volet** consiste à établir la courbe de rétention d'eau caractéristique de l'argile sur chemin hydrique de séchage. Ainsi, des relations entre les paramètres hydriques sont mises en évidence à commencer par la courbe de retrait représentant les variations de l'indice des vides (e) en fonction de la teneur en eau (w).

Les principales relations sont définies par les variations des caractéristiques hydriques en fonction de la succion de l'échantillon d'argile notée (s) :

- avec l'indice des vides [s - e],

- avec la teneur en eau [s - w],

- avec le degré de saturation (S_r) / [s - S_r].

Le **deuxième volet** de ce chapitre concerne le phénomène de retrait induit par la dessiccation libre et contrôlée. Il s'agit, dans cette partie, de réaliser une analyse fine de variations observées dans le matériau :

- des déformations globales,

- des déformations locales, longitudinales et transversales calculées par corrélation d'images numériques (CIN).

Le **troisième volet** est une introduction au phénomène d'initiation de fissure. A travers un calcul local, il est possible d'estimer les variations spatiales de la succion en fonction du chemin hydrique imposé.

Dans le **quatrième volet**, nous présenterons une analyse focalisée sur l'évolution des déformations locales, obtenues via la CIN, sous différents chemins de séchage libre et contrôlé.

IV.1. Courbe de rétention d'eau et variations des paramètres hydriques

IV.1.1. Caractéristiques des chemins de séchage

La procédure expérimentale, les paramètres calculés et les noms des essais réalisés dans le cadre de ce chapitre, sous dessiccation libre et contrôlée, sont présentés en détail dans le chapitre II (voir section II.5.1.2 et tableau II.10, section II.5.1.3 et tableau II.12).

IV.1.1.1 Dessiccation contrôlée

La figure IV.1 (a, b, et c) présente les évolutions de la teneur en eau et de l'humidité relative (HR) imposée par les trois solutions salines (KOH, K2CO3 et NaCl) en fonction du temps de séchage. Ainsi, les variations de la succion globale imposée (s_{glob}) sont représentées en fonction du temps sur la figure IV.1 (e, f, et g). La variation de la succion a été ici calculée à partir des variations mesurées de l'humidité relative suivant la relation indiquée dans le chapitre II (section II.5.1.1 et équation II.17) dont l'écriture est reprise comme suit :

$$s_{glob} = -\frac{\rho_w RT}{M_w} \ln\left(\frac{HR\%}{100}\right) \qquad [IV.1]$$

Remarque : La nomenclature ainsi que les caractéristiques hydriques des différents essais réalisés sous dessiccation contrôlée sont rappelées ci-dessous dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1 : Caractéristiques et nomenclature des essais de dessiccation contrôlée.

CD : controlled desiccation		**Température T (°C)**	**Humidité Relative HR (%)**	**Succion s_{glob} (MPa)**
Sel utilisé	Nom de l'essai			
KOH	CD1-s234	21.7	17.9	234
	CD2-s361	20.7	6.9	362
	CD3-s361	22	7.1	360
K2CO3	CD1-s110	22.7	45.8	106
	CD2-s110	25.8	44.7	111
	CD3-s110	26	44.7	111
NaCl	CD1-s38	24.5	75.5	38
	CD2-s38	23	75.9	37
	CD3-s38	25.7	75.6	38

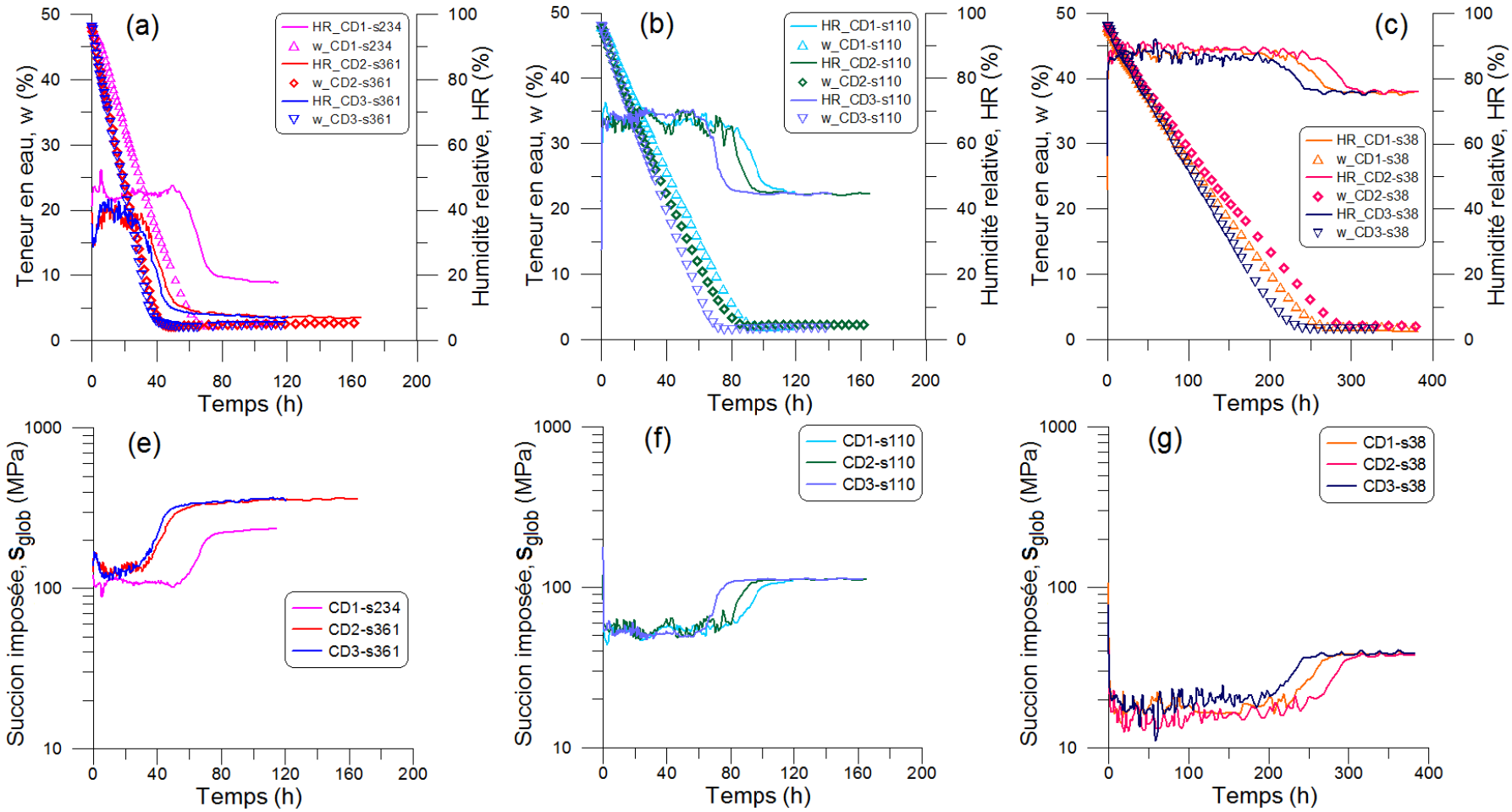


Figure IV.1 : Dessiccation contrôlée - évolution de la teneur en eau et l'humidité relative imposée en fonction du temps (a) CD-s361, (b) CD-s110, (c) CD-s38. Variations de la succion imposée calculée : (e) CD-s361, (f) CD-s110, (g) CD-s38.

Les courbes montrent que l'humidité relative reste constante à une valeur supérieure à celle imposée par le sel choisi pendant un temps "t" de séchage. "t" dépend du niveau de la succion imposée, il est évalué en moyenne à 40h à forte succion, 80h à moyenne succion et à 250h à faible succion. Lorsque la teneur en eau commence à être stabilisée, l'humidité relative rejoint sa valeur théoriquement imposée par le sel.

Nous pouvons d'ores et déjà écarter le facteur de température (T) pour expliquer ces courbes. La température de la chambre, liée à l'humidité relative par l'équation IV.1, étant constante. De plus, il a été montré pour ces trois sels, que les fluctuations de la température n'affectent pas l'évolution de l'humidité relative (chapitre II, section II.5.1.3 §3 et figure II.43). Les transferts d'eau se produisant entre la solution saline et l'échantillon constitueraient une explication fiable :

- *Au début du séchage, les transferts d'eau s'effectuent avec l'échantillon encore saturé, l'équilibre ne peut pas encore se produire*.

- *Dès que la désaturation de l'échantillon est amorcée, l'humidité relative tend vers sa valeur imposée par le sel et les transferts d'eau s'achèvent à l'équilibre (Delage et Cui, 2000).*

Nous allons revenir sur ce processus en abordant la courbe de retrait.

Les résultats de la figure IV.1 montrent une cinétique de séchage différente pour les trois sels, en revanche, elle varie peu pour les trois concentrations de sels testées (hormis le cas CD1-s234 dont la concentration s'avère faible).

Nous avons représenté sur la figure IV.2 les variations de la vitesse de séchage exprimée par le gradient de la teneur en eau par rapport au temps de séchage (dw/dt). Pour chaque niveau de succion imposée, trois valeurs caractéristiques du temps ont été localisées sur les courbes réparties en trois périodes :

- Période entre t_1 et t_2 : ces valeurs de temps caractérisent respectivement le début et la fin d'un palier où la vitesse de séchage $(dw/dt)_{moy}$, qui apparait stabilisée, est déterminée.

- Période entre t_2 et t_3 : la valeur t_2 marque le début de décroissance de la vitesse de séchage jusqu'à s'annuler à $t=t_3$.

- Période $t > t_3$: au-delà de la valeur du temps t_3, la vitesse de séchage est nulle. Ainsi, le séchage ne s'opère plus. Ceci est équivalent à la stabilisation de la teneur en eau sur la figure IV.1 (a, b et c).

Remarque : les courbes présentées ici concernent un essai pour chaque niveau succion tant dis que la valeur de la vitesse de séchage est la moyenne de tous les essais effectués à une succion donnée. Par ailleurs, une figure comportant les courbes de tous les essais est présentée en annexe 3.1.

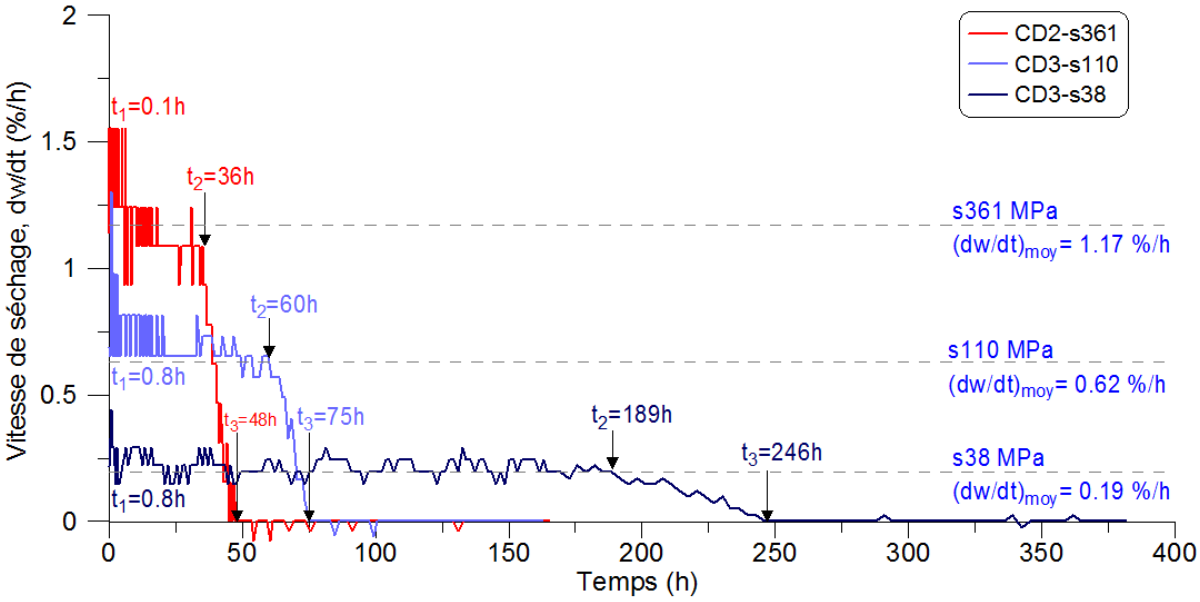


Figure IV.2 : Dessiccation contrôlée - vitesse de séchage en fonction du temps sous différents niveaux de succion imposée (moy = valeur moyenne).

Les résultats mettent en évidence une influence de la succion imposée sur la cinétique du séchage. En effet, à mesure que la succion s_{glob} augmente la vitesse de séchage est élevée.

Lorsque l'humidité relative à imposer est élevée, on observe que le temps nécessaire pour une stabilisation de séchage est élevé. Dans le cas du sel NaCl (HR = 75%) par exemple, les transferts d'eau nécessitent 10 jours en moyenne pour être stabilisés (Fig. IV.1 c), et la vitesse de séchage est relativement faible (0.19 %/h).

En termes de succion imposée, l'exemple du KOH montre que la succion se stabilise à s_{glob}=360 MPa environ au bout de 40h. La vitesse de séchage est par ailleurs importante lorsque la succion à imposer est forte (1.17 %/h).

D'autre part, nous avons reporté sur la figure IV.3 les valeurs caractéristiques du temps de séchage (t_1, t_2 et t_3), indiquées ci-dessus, en fonction de la succion globale s_{glob}.

- Les valeurs de t_1 sont similaires quelque soit le niveau de s_{glob}. En revanche, elles sont associées à des valeurs de vitesse de séchage différentes (Fig. IV.2).

- Les temps t_2 et t_3 sont très élevés à faible succion puis décroisent considérablement à mesure que celle-ci augmente.

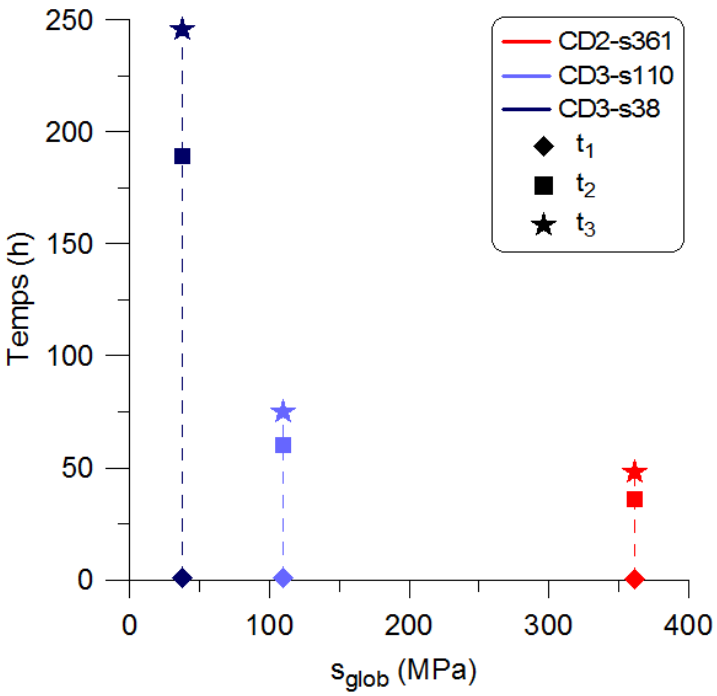


Figure IV.3 : Valeurs caractéristiques du temps de séchage en fonction de la succion globale.

IV.1.1.2 Dessiccation libre

Rappelons dans le tableau IV.2 les caractéristiques et la nomenclature adoptée (voir chapitre II, section II.5.1.2 §3) pour les essais réalisés à séchage libre.

Tableau IV.2 : Caractéristiques et nomenclature des essais de séchage libre.

Nom de l'essai (FD : free dessiccation)	T (°C)	HR (%)	Conditions de support et du mouchetis
FD-téfl	24.07	52.6	Mouchetis très dense + *S1-téflon*
FD-pers	22.6	55.3	Mouchetis très dense + *S2-perspex*
FD_{sm}-pers	22.4	59.05	Sans mouchetis (sm) + *S2-perspex*
FD_{mmd}-pers	22.6	58.8	Mouchetis moins dense (mmd) + *S2-perspex*

La figure IV.4 présente l'évolution de la teneur en eau et de l'humidité relative ambiante mesurée en fonction du temps pour les quatre essais réalisés.

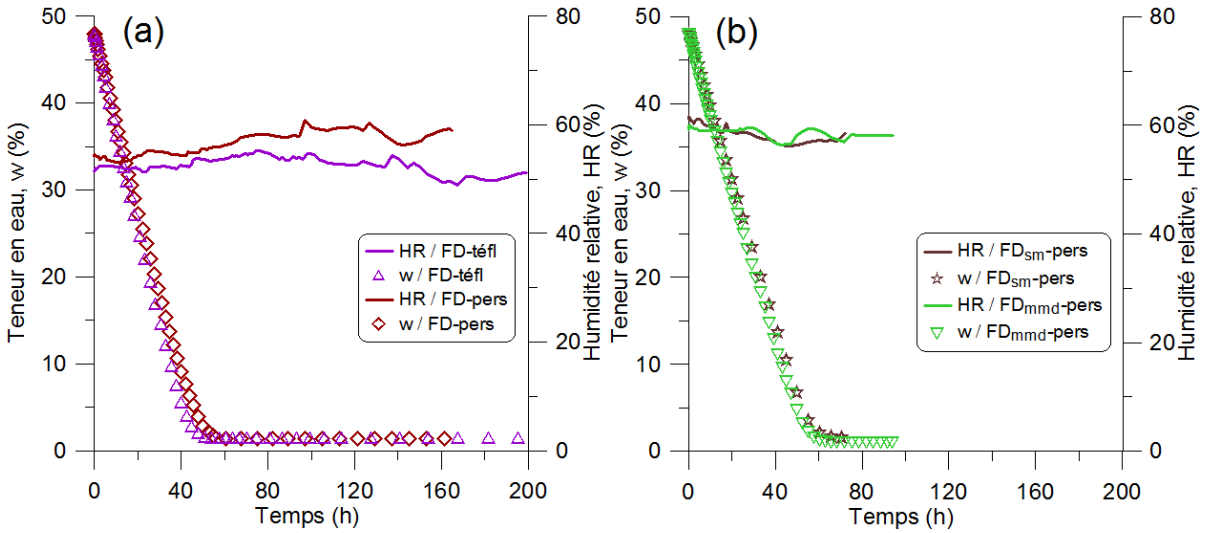


Figure IV.4 : Dessiccation libre - évolution de la teneur en eau et l'humidité relative mesurée en fonction du temps (sm : sans mouchetis / mmd : mouchetis moins dense).

La mesure de l'humidité relative ambiante montre des valeurs relativement stables au cours des essais. En moyenne, elle est égale à 55% dans le cas des essais *FD-téfl* et *FD-pers* et 59% dans le cas des essais *FD$_{sm}$-pers* et *FD$_{mmd}$-pers*. Les caractéristiques du support n'affectent que légèrement la cinétique de séchage. La valeur finale de la teneur en eau est très proche dans tous les cas de supports, et atteint environ 1.3%. Cette valeur est également très proche à celle atteinte par les essais réalisés dans Wei (2014) où la teneur en eau finale est environ 2%.

La cinétique du séchage sous dessiccation libre représentée sur la figure IV.5 montre que les 4 chemins évoluent suivant des vitesses très proches (à environ 0.96 %/h) durant le séchage. Les valeurs caractéristiques du temps sont localisées sur les courbes de vitesse.

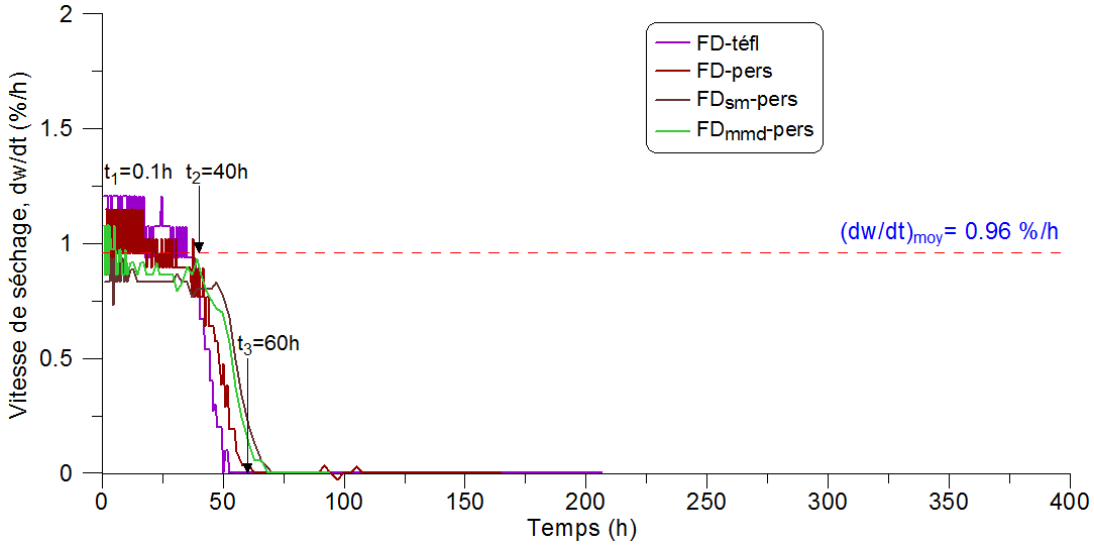


Figure IV.5 : Dessiccation libre - vitesse de séchage en fonction du temps (moy = valeur moyenne).

La figure IV.4 (a) montre que le type de support utilisé dans nos essais n'affecte pas l'évolution du séchage entre les deux essais *FD-téfl* et *FD-pers*. Wei (2014) est également

arrivé à cette conclusion pour le kaolin P300 sur trois supports utilisés (lisse, intermédiaire et rugueux).

La figure IV.4 (b) montre par ailleurs que le mouchetis appliqué sur la surface de l'échantillon ne modifie pas l'évolution du séchage entre les deux essais *FD_{sm}-pers* et *FD_{mmd}-pers*.

IV.1.2. Courbe de retrait - Limite de retrait (SL)

La procédure expérimentale ne permet pas pour l'instant de mesurer la déformation verticale, par conséquent, le calcul de la déformation volumique (ε_v) n'est pas possible par nos mesures uniquement. Nous avons alors procédé à une estimation de la déformation volumique à partir d'autres résultats expérimentaux pris de la littérature (Wei (2014) et Indarto (1991) cité dans Taibi (1994) reportés sur la figure IV.6), qui donnent l'indice des vides et de degré de saturation en fonction de la teneur en eau. Rappelons que ces auteurs ont utilisé différentes techniques d'imposition et de contrôle de la succion afin d'analyser un plus large intervalle de valeurs. Les détails de ces essais peuvent être retrouvés dans le chapitre I (sections I.1.3.3 et I.1.3.4).

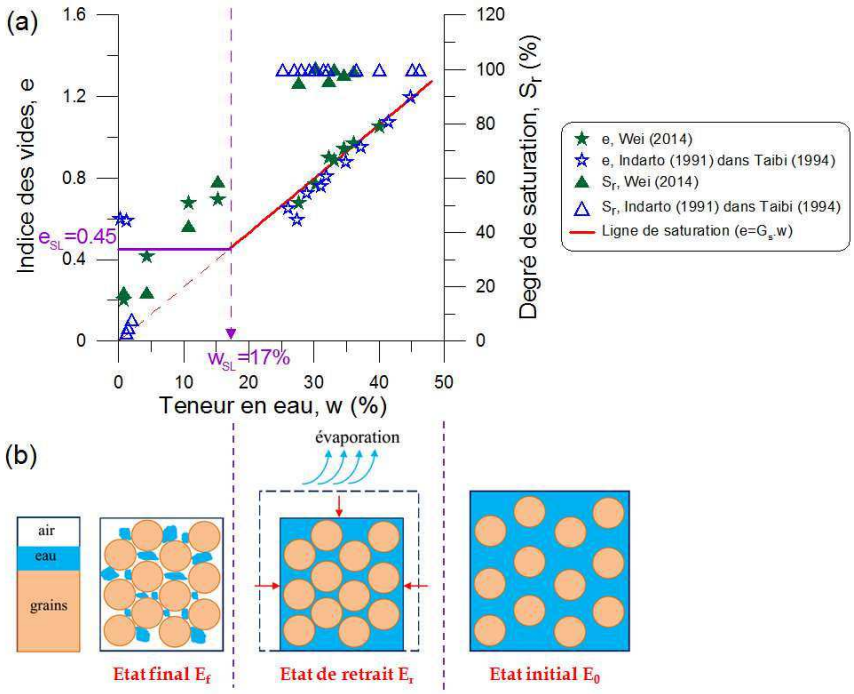


Figure IV.6 : Courbe de retrait - (a) variations de l'indice des vides et du degré de saturation en fonction de la teneur en eau (Indarto, 1991 cité dans Taibi, 1994; Wei, 2014), (b) représentation schématique de l'état du matériau au cours du séchage.

Le chemin de séchage comprend généralement trois domaines à partir de l'état initial E_0 saturé du matériau étudié (Fig. IV.6 b) :

- L'évolution des déformations dans les trois directions se produit principalement pendant l'état de retrait E_r (Fig. IV.6 b) où le matériau reste saturé (S_r = 100%), ou proche de la saturation. Dans la phase de retrait, l'évolution de l'indice des vides (Fig. IV.6 a) suit une droite appelée "ligne de saturation" avec :

$$e = G_s \, . w \qquad [IV.2]$$

(G_s = 2.65 pour la kaolinite).

Une fois le point d'entrée d'air (EA) atteint, le degré de saturation commence à diminuer lentement, en restant supérieur à 80%, jusqu'à atteindre la limite de retrait (SL) w_{SL} = 17%. Les deux points de transitions EA et SL ont été définis dans le chapitre I (section I.1.3.5).

- A l'état final E_f (Fig. IV.6 b), le degré de saturation chute considérablement vers des valeurs proches de zéro et l'indice des vides se stabilise à une valeur caractéristique de limite de retrait e_{SL} = 0.45.

Remarque : la représentation schématique, présentée sur la figure IV.6, reste une modélisation idéalisée, mais qui a l'intérêt d'apporter une explication simple du phénomène du retrait.

IV.1.3. Courbe de rétention d'eau et succion globale

Les essais de dessiccation contrôlée permettent d'imposer dans une chambre hermétique une succion à l'environnement du matériau par le biais des solutions salines saturées. Afin d'estimer la succion globale (notée s) du matériau, à une teneur en eau donnée au cours de l'essai, nous avons utilisé les résultats expérimentaux de Wei (2014) et Indarto (1991) (cité dans Taibi, 1994) réalisés par de diverses techniques expérimentales et exposés dans le chapitre I (section I.1.3.4).

Ces résultats sont reproduits dans la figure IV.7, qui représente les variations de la teneur en eau en fonction de la succion globale de l'échantillon de la kaolinite.

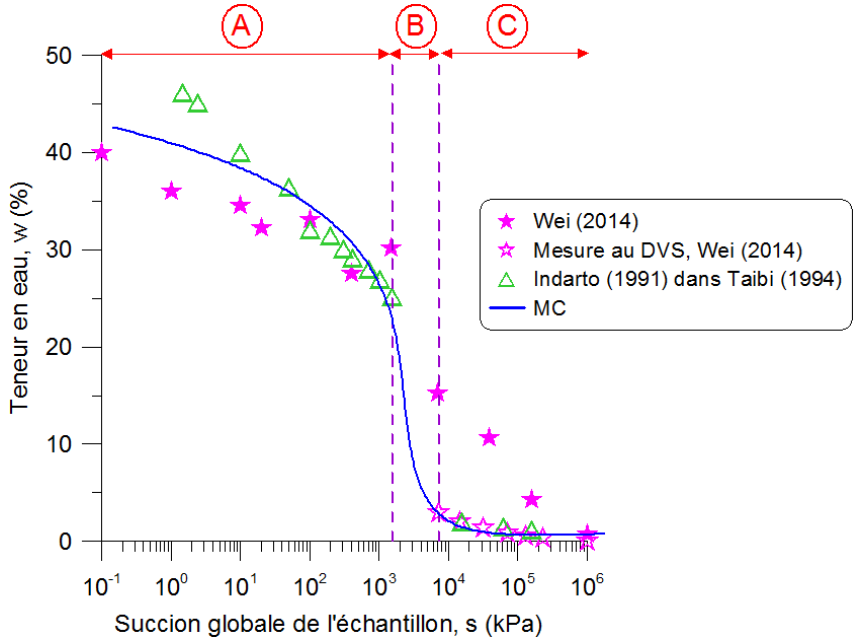


Figure IV.7 : Variations de la teneur en eau en fonction de la succion globale de l'échantillon (Indarto, 1991 cité dans Taibi, 1994; Wei, 2014).

La variation entre la teneur en eau et la succion globale, exprimée dans un plan semi-logarithmique (Fig. IV.7), peut être approchée par la courbe MC.

MC peut être décomposée en trois domaines, exprimés par les relations suivantes :

- Domaine (A) où s = [0, 1600] kPa :

$$w = -3\log(s) + 47.3 \qquad \text{[IV.3]}$$

- Domaine (B) où s = [1600, 7500] kPa :

$$w = -17\log(s) + 157.3 \qquad \text{[IV.4]}$$

- Domaine (C) où s = [7500, 10^6] kPa :

$$w = -0.47\log(s) + 6.2 \qquad \text{[IV.5]}$$

Ces relations permettront, par la suite, d'estimer la succion développée dans nos échantillons à une teneur en eau donnée, dans un domaine donné.

IV.2. Phénomène de retrait

Dans ce deuxième volet, nous allons étudier le phénomène de retrait à l'échelle macroscopique (retrait global) et microscopique (retrait local) de l'échantillon soumis à différents chemins de séchage libre et contrôlé.

IV.2.1. Aspects bibliographiques

Pour aborder au mieux notre étude, il est nécessaire de définir et d'introduire le mécanisme de retrait sur chemin de séchage.

IV.2.1.1 Mécanisme de retrait

Dans une série d'essais de dessiccation libre, effectuée sur des échantillons parallélépipèdes rectangles xyz = 295×49×12 mm^3 de sol (Bioley silt), Péron et al. (2009a) ont obtenu les résultats présentés sur la figure IV.8. Ces derniers sont exprimés en termes d'évolution des déformations globales dans les trois directions ainsi que celle de l'indice des vides en fonction de la teneur en eau.

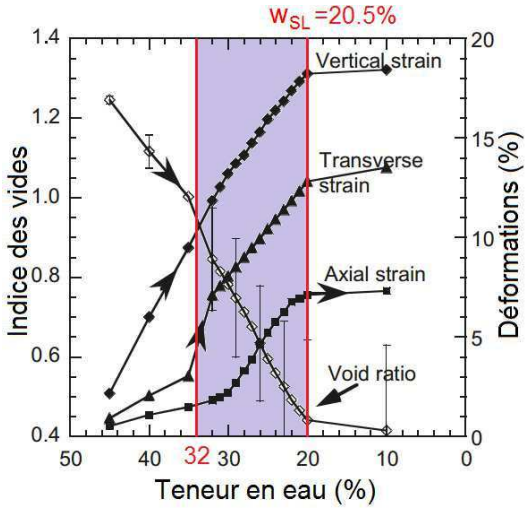


Figure IV.8 : Déformations globales et indice des vides en fonction de la teneur en eau moyenne (Péron et al., 2009a).

Les résultats montrent que le processus de retrait identifié est entamé par le séchage de la surface la plus importante et exposée à l'air, soit xy = 295×49 mm^2.

Ceci peut-être observé au début du séchage (w >32%) où la déformation verticale augmente instantanément et considérablement par rapport aux déformations horizontales.

Ensuite, entre 32% de teneur en eau et la limite de retrait w_{SL}=25% (partie colorée de la figure IV.8), une croissance brusque des déformations longitudinale (axial strain) et transversale (transverse strain) est observée tandis que la déformation verticale (vertical strain) continue sa progression.

IV.2.1.2 Calcul et estimation du retrait

Une anisotropie entre les directions verticale et horizontale des déformations a été mise en évidence dans de nombreux travaux (Péron et al., 2009a; Auvray et al., 2014; Wei et al., 2016). Elle est caractérisée par le paramètre d'anisotropie, que nous noterons η, défini par le rapport entre la déformation verticale ε_{zz} et la déformation horizontale ε_h :

$$\eta = \frac{\varepsilon_{zz}}{\varepsilon_h} \qquad [IV.6]$$

Nous avons reportés dans le tableau IV.3 les valeurs du rapport d'anisotropie obtenues dans la littérature.

Tableau IV.3 : Valeurs du rapport d'anisotropie η obtenues dans la littérature.

Littérature	Wei et al. (2016)	Péron et al. (2009a)	Auvray et al. (2014)
η	2.0	2.5	> 2.0

Par ailleurs, en considérant que $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy}$, la déformation volumique ε_v peut s'écrire en fonction du rapport d'anisotropie, en remplaçant ε_{zz} par l'équation IV.6.

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = (2+\eta)\varepsilon_h \qquad [IV.7]$$

D'où, la déformation de retrait ε_r en fonction de ε_v :

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2+\eta}.\varepsilon_v \qquad [IV.8]$$

Dans le cas où les déformations sont isotropes (η=1), la déformation de retrait serait équivalente à 1/3 de la déformation volumique.

IV.2.1.3 Evolution de la teneur en eau locale sur chemin de séchage

Durant un essai de dessiccation, les observations montrent que le séchage commence par les bords de l'échantillon puis avance vers son centre.

Wei (2014) a effectuée une série de mesures de la teneur en eau locale sur un échantillon de kaolin P300 (300×200×4 mm^3) soumis à un séchage libre. Son but était de voir l'évolution de la teneur en eau locale au cours du séchage. L'auteur avait découpé à chaque fois 6 petits échantillons carrés (40×40 mm²) suivant 4 lignes longitudinales, illustrées sur la figure IV.31, et a mesuré leurs teneurs en eau en même temps.

Figure IV.9 : Schéma de découpe des échantillons pour la mesure de la teneur en eau locale sur chemin de séchage libre : (a) première ligne, (b) 3 premières lignes (Wei, 2014).

Les résultats de cette analyse sont présentés sur la figure IV.10.

Les variations de la teneur en eau suivant la première ligne en fonction du temps (Fig. IV.10 a) montrent qu'au début de séchage (t < 4h), une légère hétérogénéité est observée entre les bords et le centre de l'échantillon (maximum = 1.46%). A mesure que le matériau sèche, cette légère différence diminue et la teneur en eau devient uniforme.

Sur la deuxième ligne (Fig. IV.10 b), la nuance entre les bords et le centre de l'échantillon est plus prononcée (maximum = 2.93%) au début de séchage (t < 4h). Après 4h de séchage, la teneur en eau devient relativement uniforme.

Wei (2014) a finalement conclu qu'à l'échelle locale, la teneur en eau mesurée peut être considérée comme homogène.

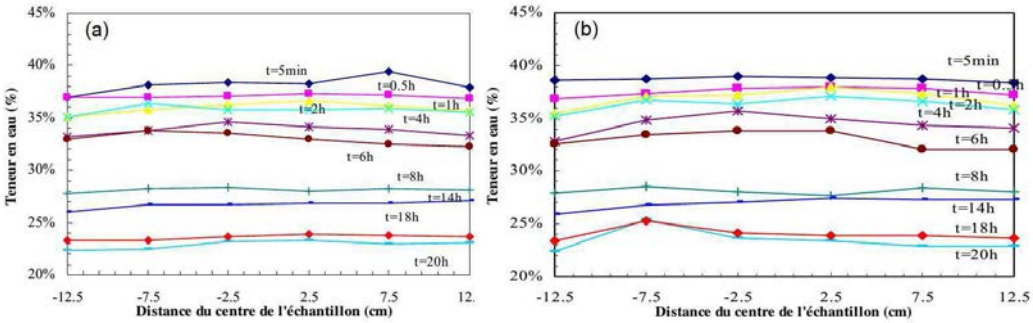


Figure IV.10 : Variations de la teneur en eau locale sur chemin de séchage libre : (a) première ligne, (b) deuxième ligne (Wei, 2014).

IV.2.2. Dessiccation contrôlée et retrait

IV.2.2.1 Méthodologie pour la mesure et l'estimation des déformations globales

Nous présentons dans cette section la méthodologie suivie pour l'estimation des déformations globales qu'on peut classer comme suit :

- déformations horizontales, longitudinale suivant X (notée ε_x) et transversale suivant Y (notée ε_y),

- déformation verticale suivant Z (notée ε_z).

a- Méthode de calcul :

La figure IV.11 montre l'organigramme de la procédure que nous avons adoptée pour estimer les déformations globales de l'échantillon par corrélation d'images numériques au cours d'un essai de dessiccation.

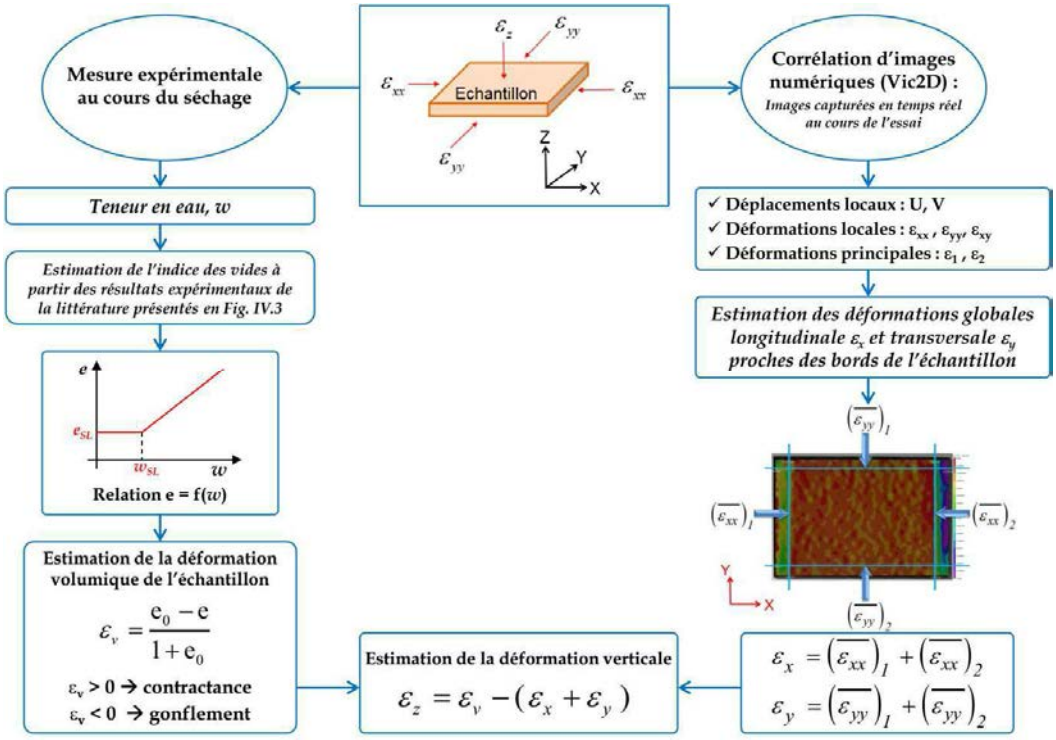


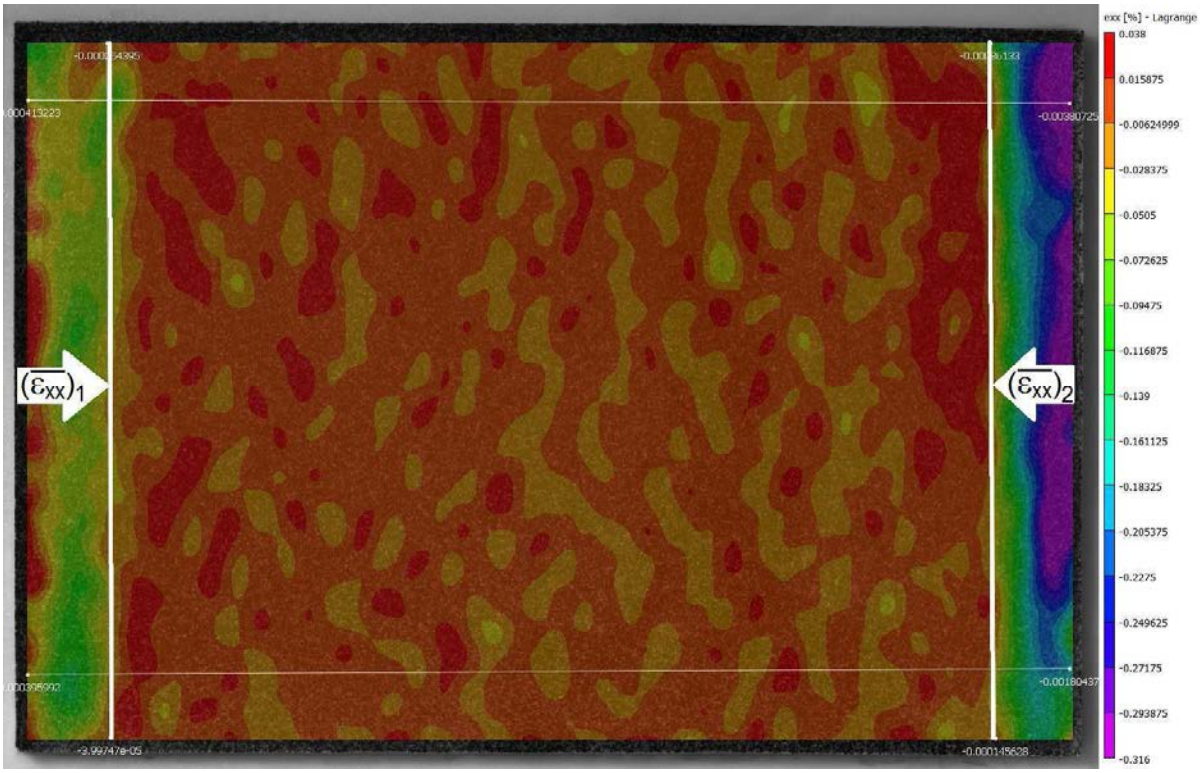
Figure IV.11 : Organigramme de calcul des déformations globales induites par le séchage.

1- Déformations horizontales:

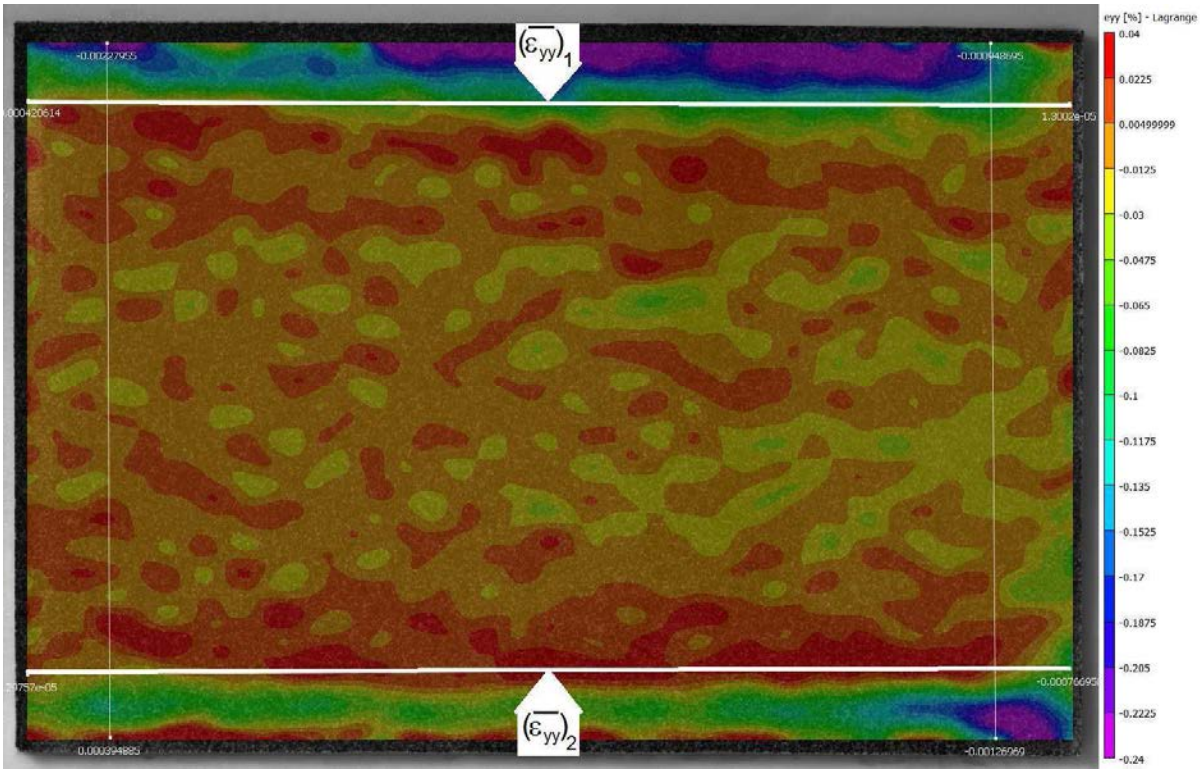
L'estimation des déformations globales ε_x et ε_y est effectuée proche des bords de l'échantillon, à partir des déformations locales obtenues par la corrélation d'images numériques (Fig. IV.12) :

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \left(\overline{\varepsilon_{xx}}\right)_1 + \left(\overline{\varepsilon_{xx}}\right)_2 \\ \varepsilon_y = \left(\overline{\varepsilon_{yy}}\right)_1 + \left(\overline{\varepsilon_{yy}}\right)_2 \end{cases} \qquad [IV.9]$$

Les composantes $\left(\overline{\varepsilon_{xx}}\right)_1$ et $\left(\overline{\varepsilon_{xx}}\right)_2$ suivant X et $\left(\overline{\varepsilon_{yy}}\right)_1$ et $\left(\overline{\varepsilon_{yy}}\right)_2$ suivant Y sont déterminées à partir des valeurs moyennes des déformations locales ε_{xx} et ε_{yy} calculées sur les lignes proches des bords représentées respectivement sur la figure IV.12 (a) et la figure IV.12 (b). Le choix de ces lignes a été fixé de façon à s'affranchir des effets de bords liés à la préparation de l'échantillon qui perturbent dans ces zones la corrélation d'images (Fig. IV.12).



(a)



(b)

Figure IV.12 : Estimation des déformations globales longitudinale (a) et transversale (b) par la CIN (exemple essai CD2-s361 au début du séchage).

2- Déformation verticale :

Afin d'exposer la procédure décrite dans l'organigramme en Fig. IV.11, permettant, entre autres, d'estimer la déformation verticale ε_z, nous avons choisi de présenter l'essai CD2-s361.

La figure IV.13 présente les variations des déformations globales obtenues en fonction de la teneur en eau. Les déformations globales ε_x, ε_y et ε_z en Fig. IV.13 (a) et la déformation volumique ε_v, calculée à partir de l'indice des vides, en Fig. IV.13 (b).

Rappelons que ε_z a été estimée à partir de ε_x et ε_y mesurées par la CIN et ε_v.

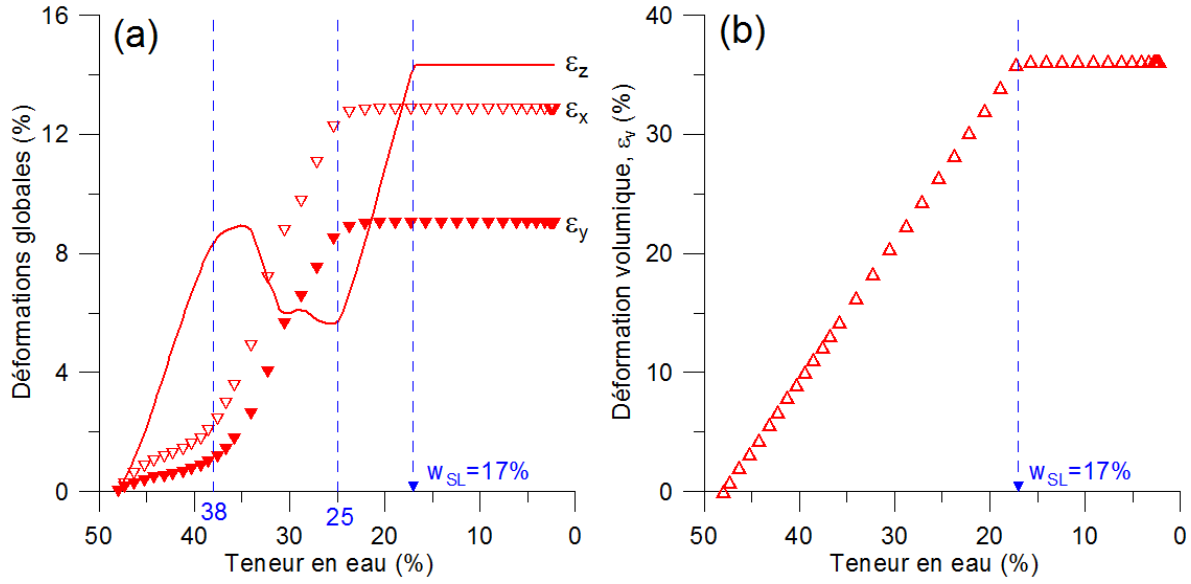


Figure IV.13 : Déformations globales calculées dans l'essai CD2-s361 (CD : controlled desiccation).

Les résultats peuvent être discutés par rapport aux deux intervalles de teneur en eau suivant le sens de la dessiccation :

→ w = [48 à 38] % : au début du séchage, on obtient une déformation verticale ε_z qui augmente considérablement par rapport aux déformations horizontales ε_x et ε_y. $\varepsilon_z \approx$ 8%, $\varepsilon_x \approx$ 2% et $\varepsilon_y \approx$ 1% à 38% de teneur en eau. Cette différence est due au fait que l'exposition de la surface supérieure du matériau à l'air permette le retrait, sur la surface, dès le lancement du séchage.

→ w = [38 à w_{SL}=17] % : d'une part, nous pouvons observer une croissance rapide de ε_x et ε_y avec ε_x= 12.5% et ε_y= 8.5% à w= 25%. Les déformations ε_x et ε_y commencent à tendre vers un plateau lorsque la teneur en eau atteint la limite de retrait w_{SL}. D'autre part, la déformation verticale exhibe une évolution marquée par une chute entre 38% et 25% de teneur en eau suivie d'une augmentation entre 25% de teneur en eau et la limite de retrait w_{SL}.

Cette évolution obtenue dans ε_z n'est pas réaliste. Ce gonflement de la surface supérieure issu du calcul n'existe pas. En effet, ε_z est estimée par la différence entre, d'une part, la

déformation volumique (calculée à partir de l'indice des vides, estimé dans la section IV.1.2) et, d'autre part, la somme de ε_x et ε_y mesurées par la CIN. Ainsi, en plus des erreurs de calcul dans l'estimation de l'indice des vides, lorsque ces dernières augmentent rapidement entre w=38% et w=25%, leur somme devient plus importante et fait chuter ε_z.

Nous proposons la correction suivante de la courbe de ε_z :

Hypothèse :

Dans les études antérieures (par exemple Péron et al. 2009a), les auteurs ont observé que la déformation verticale augmente en premier, ce que nous avons pu estimer par le calcul au début du séchage (Fig. IV.13 a). Ainsi, nous avons supposé une évolution similaire à celle obtenue dans Péron et al. 2009a, indiquée dans la revue de littérature par la partie colorée en Fig. IV.8, reliant la courbe du début de séchage avec le plateau après w_{SL}. Nous supposons ici que le calcul estime correctement le début de la courbe (le matériau étant proche de la saturation) et le plateau en fin de séchage.

A partir de cette hypothèse, nous avons corrigé la déformation verticale dont le résultat est présenté sur la figure IV.14.

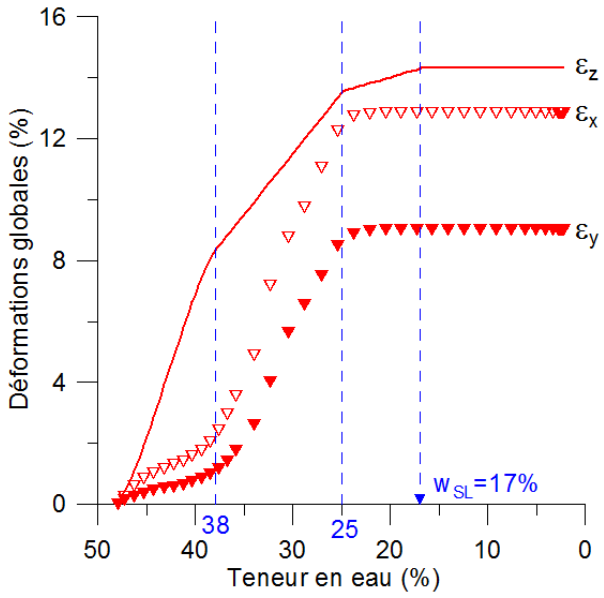


Figure IV.14 : Déformations globales avec correction de la déformation verticale.

Finalement, la déformation verticale estimée dans cette étude peut s'écrire sous la forme donnée en Eq. IV.10 où w_1 = 38% et w_{SL} = 17%.

$$\varepsilon_z = \begin{cases} \varepsilon_v - (\varepsilon_x + \varepsilon_y) \rightarrow w > w_1 \; ; w < w_{SL} \\ f(w) \rightarrow w_1 \geq w \geq w_{SL} \end{cases} \qquad \text{[IV.10]}$$

Où la première partie de l'équation est présentée dans l'organigramme de la figure IV.11, la deuxième partie est la correction suggérée ci-dessus en fonction de la teneur en eau notée *f(w)*.

b- Résultats de calcul :

Après avoir exposé la méthode de calcul, que nous avons adoptée pour l'estimation des déformations globales, nous présentons à présent les résultats obtenus. Pour cela, nous avons fait le choix d'un essai pour chaque niveau de succion, en raison de la répétabilité observée des résultats (Ces derniers sont donnés en annexe 3.2).

1- Première représentation des résultats:

Sur la figure IV.15, nous avons représenté les déformations globales dans les trois directions sur le même plan caractérisé par un niveau de succion donné. Notons que t_{SL} est le temps correspondant à la limite de retrait, déterminée précédemment à partir des résultats de la littérature exposés dans la section IV.1.2 de ce chapitre.

Les résultats montrent une augmentation brutale de ε_z et une progression plus faible de ε_x et ε_y au début de séchage. Puis, les déformations horizontales entament une croissance rapide en même temps que ε_z continue d'augmenter. Après la limite de retrait ($t > t_{SL}$), les trois déformations se stabilisent.

En revanche, le temps de séchage t_{SL} et la stabilisation des déformations globales dépendent du niveau de succion. La valeur de t_{SL} est faible (26h) à forte succion. Le matériau a besoin de plus de temps à mesure que la succion globale diminue; soit 44h pour une succion moyenne et 161h pour une succion faible.

Les résultats montrent également que plus la succion est faible plus les déformations tendent vers une égalité entre ε_x et ε_y. La déformation verticale en revanche est toujours différente et plus importante que les deux autres.

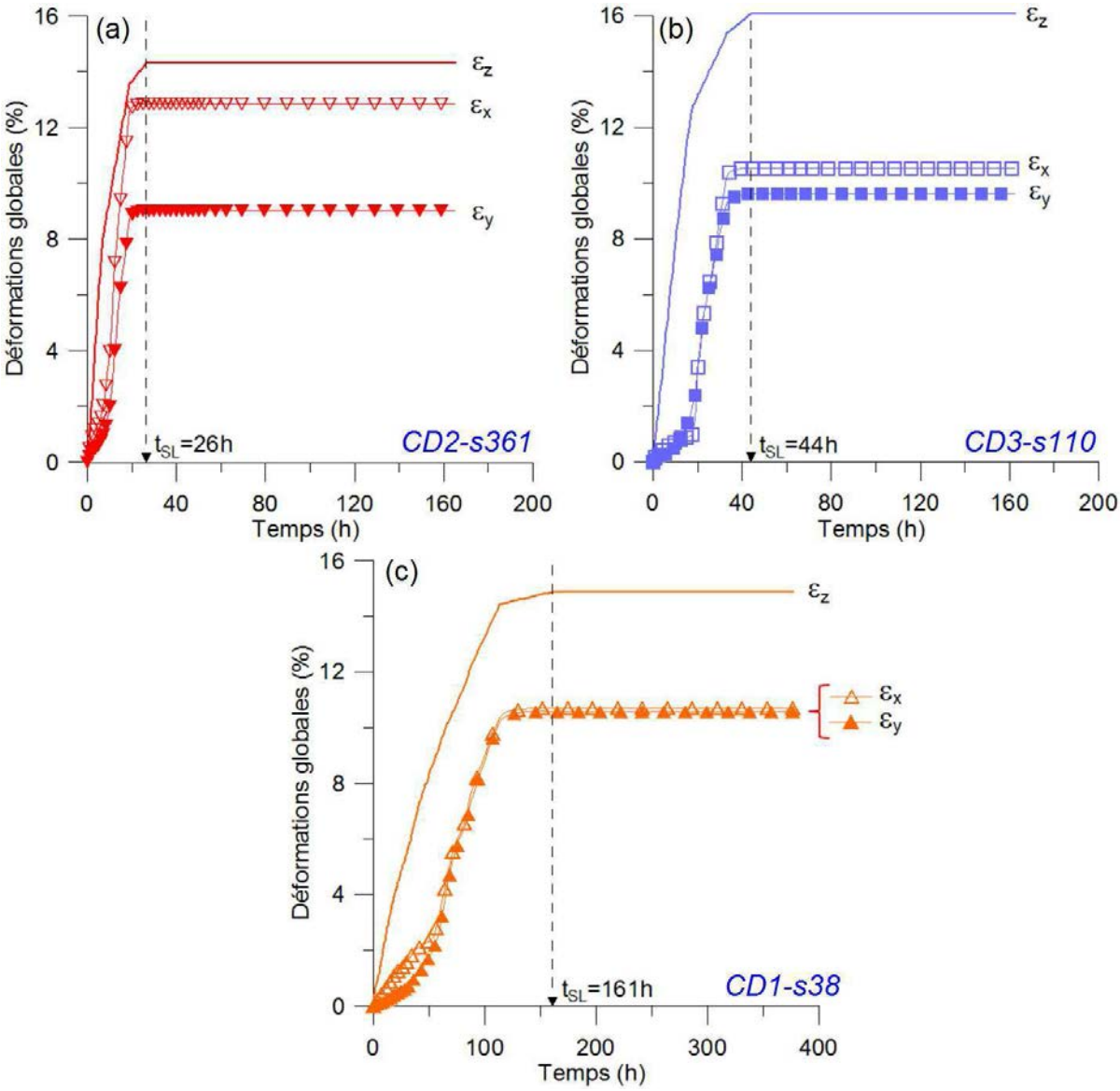


Figure IV.15 : Variations des déformations globales en fonction du temps à différentes succions : (a) forte 361 MPa, (b) moyenne 110 MPa et (c) faible 38 MPa.

2- Deuxième représentation des résultats:

La représentation exposée dans cette partie permet de montrer l'effet de la succion sur la cinétique de chaque déformation globale (Fig. IV.16).

Pour la déformation longitudinale ε_x (Fig. IV.16 a), la progression à faible succion s'effectue lentement dans le temps à cause de la lenteur des transferts d'eau. Lorsque le niveau de succion augmente, le séchage est accéléré ainsi que la déformation.

Nous pouvons constater cette tendance d'évolution pour la déformation transversale (Fig. IV.16 b) et pour la déformation verticale (Fig. IV.16 c).

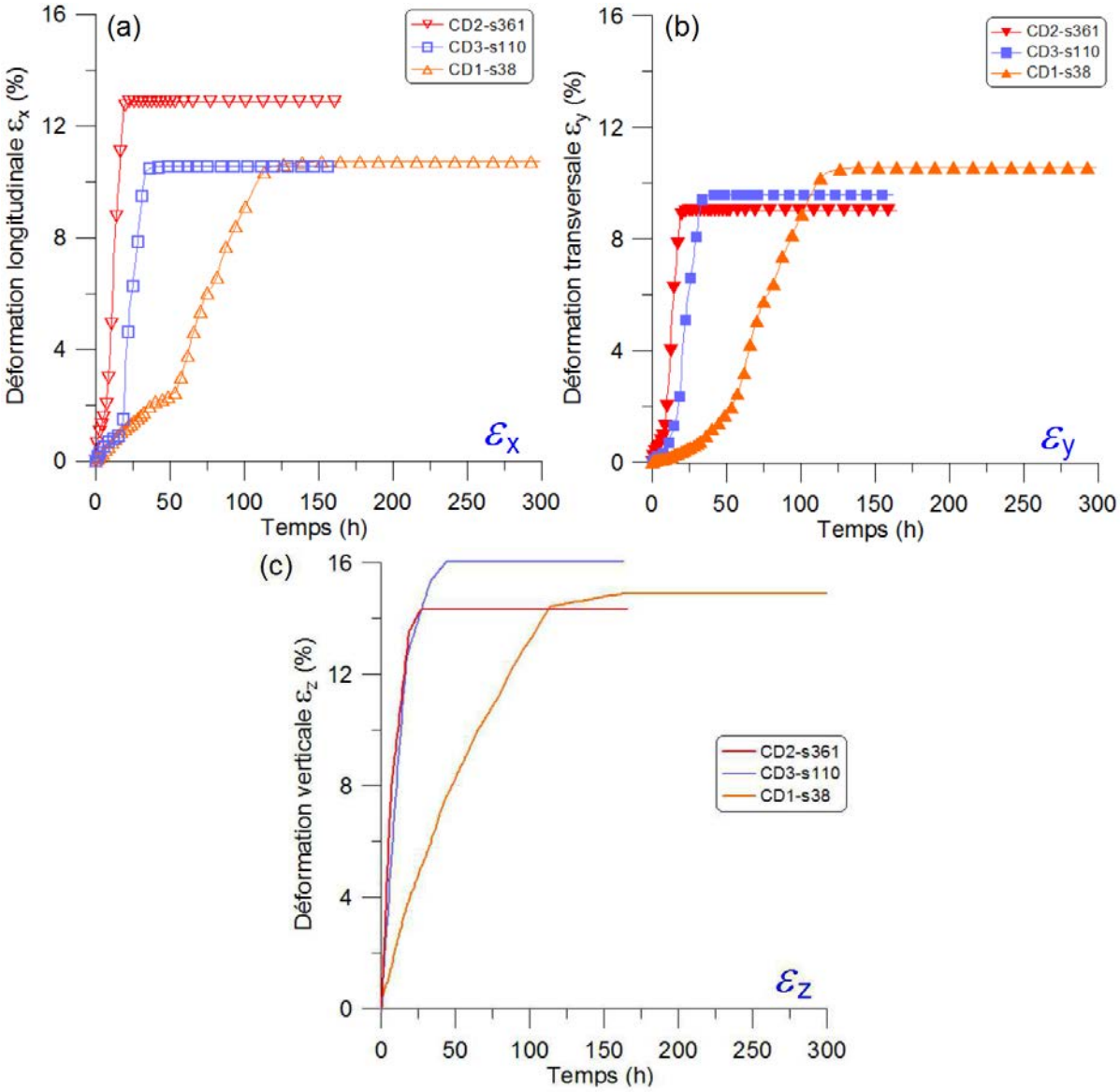


Figure IV.16 : Variations des déformations globales à différents niveaux de succion : (a) longitudinale, (b) transversale et (c) verticale.

IV.2.2.2 Retrait - Estimation de la déformation volumique globale

La méthodologie présentée précédemment nous a permis d'estimer les déformations globales dans les trois directions. A présent, nous allons exposer les résultats obtenus de l'estimation de la déformation volumique globale ε_v.

Le retrait est caractérisé à partir de la déformation volumique de l'échantillon. On sait que :

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \qquad [IV.11]$$

La figure IV.17 montre les variations de la déformation volumique en fonction du temps sous différentes succions, et sur lesquelles sont localisés les temps à la limite de retrait t_{SL} respectifs.

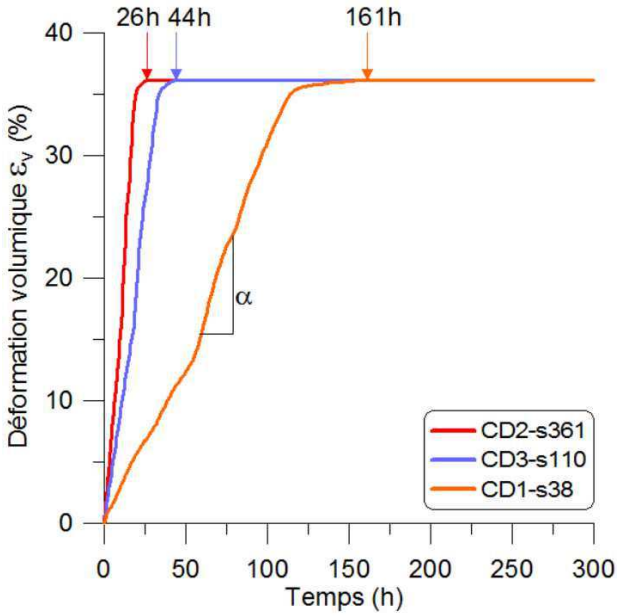


Figure IV.17 : Déformation volumique globale en fonction du temps à différents niveaux de succion.

Au début du séchage et le long de la ligne de saturation ($t < t_{SL}$), les résultats montrent une croissance linéaire de pente α de la déformation volumique en fonction du temps quelque soit le niveau de succion. La valeur de α dépend sensiblement de la succion globale imposée qui affecte la cinétique des déformations globales comme nous l'avons observé précédemment.

La pente α représente la vitesse de retrait, exprimée par la différentielle de la déformation volumique sur le temps ($d\varepsilon_v/dt$), pendant la phase où l'échantillon reste proche de la saturation ($t < t_{SL}$). Pour cela, l'analyse des valeurs de α revient à analyser la vitesse de retrait au cours de séchage.

La figure IV.18 présente l'évolution de la vitesse de retrait au cours de séchage sous différentes succions.

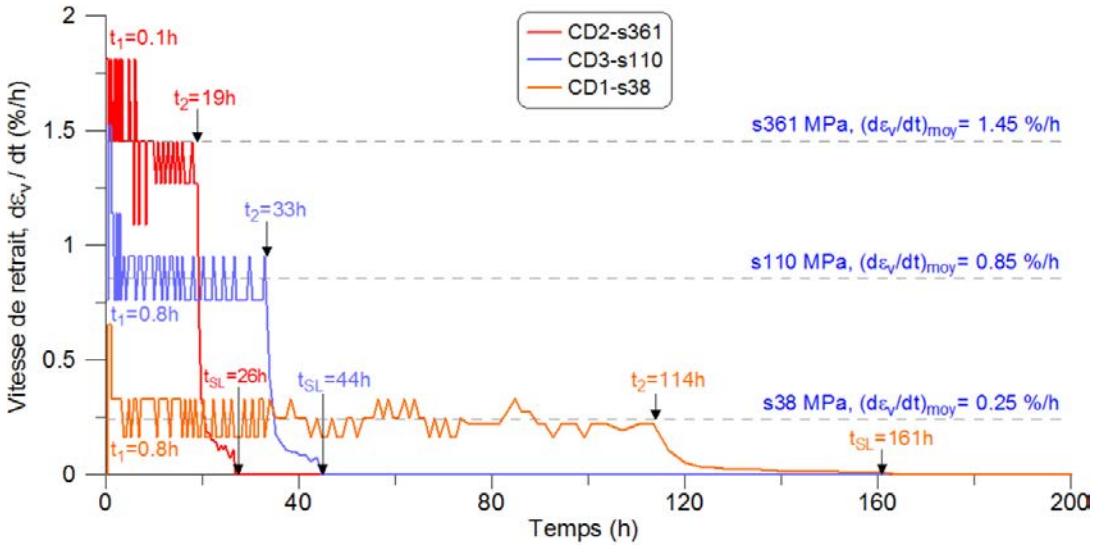


Figure IV.18 : Vitesse de retrait en fonction du temps sous différents niveaux de succion globale.

Les résultats montrent que la vitesse de retrait évolue en trois phases durant le séchage, délimitées par des valeurs caractéristiques du temps t_1, t_2 et t_{SL} indiquées sur la figure IV.18 pour chaque courbe.

- La première phase est comprise entre t_1 et t_2 et représente la ligne de saturation. Elle est caractérisée par une vitesse de retrait stabilisée, dont les valeurs moyennes sont reportées sur chaque courbe, et correspond à l'évolution linéaire de la déformation volumique sur la figure IV.17. On peut constater la vitesse de retrait augmente avec le niveau de succion.

- La seconde phase, comprise entre t_2 et t_{SL}, montre la diminution de la vitesse de retrait et correspond au ralentissement de la déformation volumique avant d'atteindre la limite de retrait sur la figure IV.17.

- La dernière phase ($t > t_{SL}$) marque la fin du retrait caractérisée par une vitesse nulle qui correspond au palier ($\varepsilon_{v\text{-}max}$ = 36%) atteint par les trois courbes sur la figure IV.17.

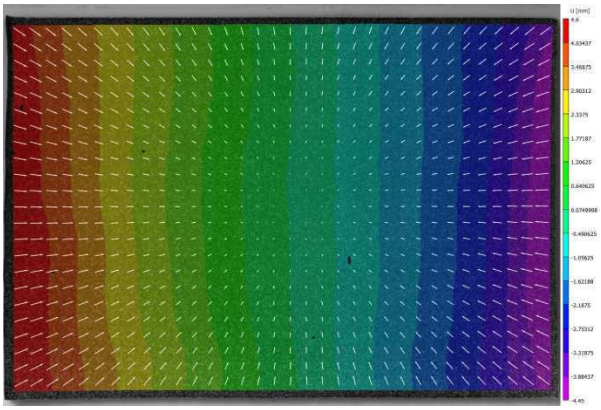
IV.2.2.3 Analyse du retrait à l'échelle locale

Dans cette section, nous allons analyser le phénomène de retrait à l'échelle locale de l'échantillon via la corrélation d'images numériques (CIN). L'analyse portera principalement sur l'identification du mode de retrait et l'estimation de la déformation de retrait local au cours de séchage.

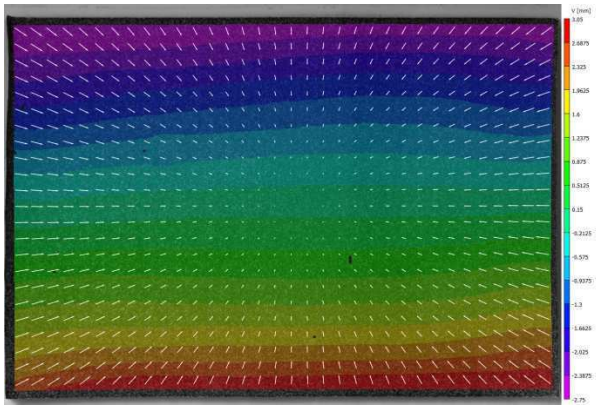
a- Analyse du champ des déplacements :

Pour analyser le retrait local au cours de séchage, nous allons nous intéresser aux déplacements locaux dont les cartographies Vic2D, obtenues par la CIN à différentes succions, sont présentées sur la figure IV.19. Nous avons choisi d'exposer les résultats d'un essai pour chaque succion à la limite de retrait ($w = w_{SL}$). Les autres résultats de tous les essais réalisés sont répertoriés dans l'annexe 3.3.

Remarque : les déplacements sont indiqués sur la figure IV.19 par les valeurs extrêmes; maximale positive (max) en rouge et minimale négative (min) en violet. Les couleurs intermédiaires représentent les déplacements compris entre les valeurs maximale et minimale.

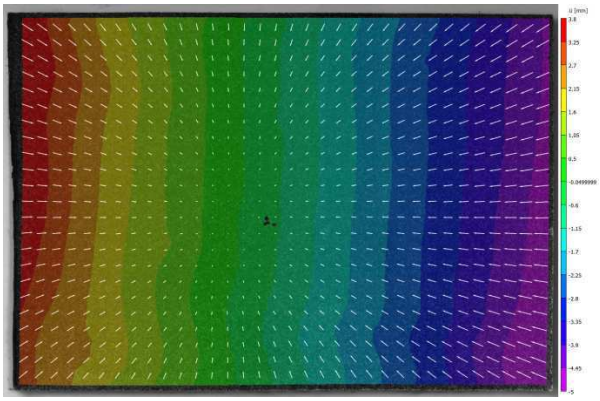


U : max= +4.6 mm / min= -4.45 mm

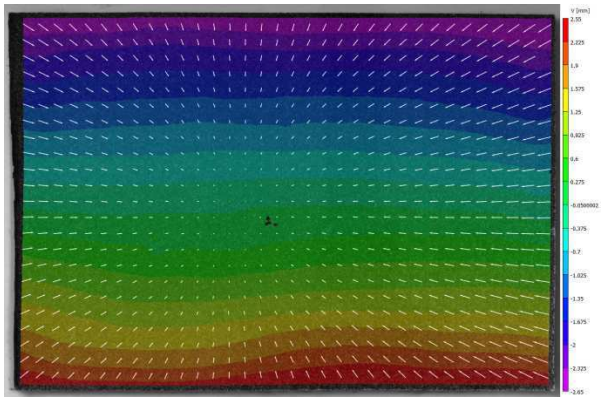


V : max= +3.05 mm / min= -2.75 mm

(a) Essai CD3-s361 à t_{SL} = 25h

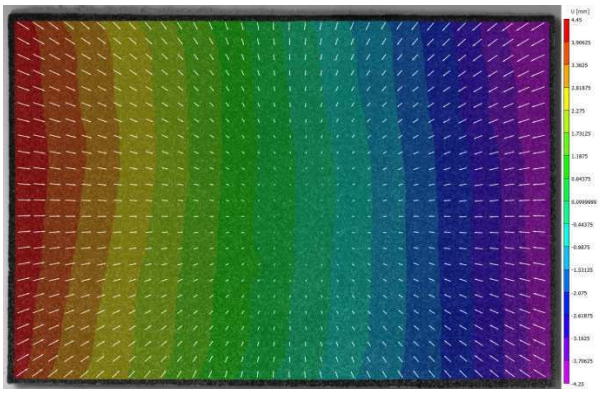


U : max= +3.8 mm / min= -5 mm

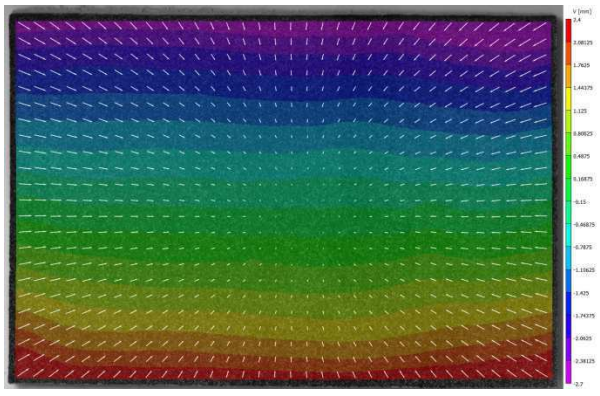


V : max= +2.55 mm / min= -2.65 mm

(b) Essai CD3-s110 à t_{SL} = 44h



U : max= +4.45 mm / min= -4.25 mm



V : max= +2.4 mm / min= -2.7 mm

(c) Essai CD3-s38 à t_{SL} = 144h

Figure IV.19 : Cartographies Vic2D des déplacements locaux à la limite de retrait $w=w_{SL}$

Le champ des déplacements, représenté par les vecteurs de couleur blanche (Fig. IV.19), est radial orienté vers le centre de l'échantillon avec une intensité plus importante au niveau des bords, comme illustré sur la figure IV.20. Notons que ce mode de retrait est observé quelque soit la valeur de la succion imposée; forte (Fig. IV.19 a), moyenne (Fig. IV.19 b) ou faible (Fig. IV.19 c).

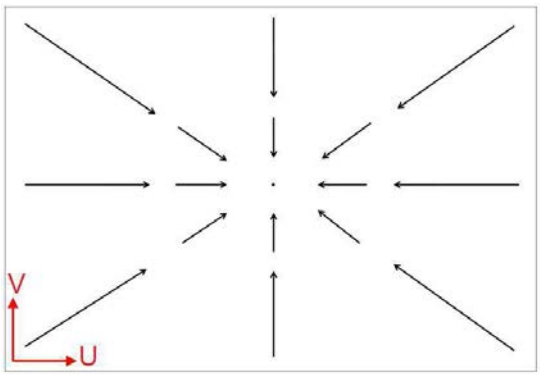


Figure IV.20 : Schéma du champ des déplacements locaux au cours du séchage.

On peut remarquer que le déplacement longitudinal U est environ presque 2 fois supérieur au déplacement transversal V. En effet, la nature du support (téflon), qui limite les frottements au contact du matériau, et l'absence de fissures au cours du séchage contrôlé, sont des facteurs qui favorisent une évolution plus homogène du champ des déplacements.

b- Calcul et estimation de la déformation de retrait locale :

Dans ce paragraphe, nous allons nous intéresser à l'évolution de la déformation de retrait locale sur différents chemins hydriques.

Le calcul de la déformation de retrait est présenté en revue de littérature dans la section IV.2.1.2 de ce chapitre.

L'estimation de la déformation de retrait locale, notée ε_r^{loc}, peut être effectuée comme suit :

$$\begin{cases} \varepsilon_v^{loc} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = (2+\eta)\,\varepsilon_h \\ \varepsilon_r^{loc} = \dfrac{1}{2+\eta}.\varepsilon_v^{loc} \end{cases} \qquad [IV.12]$$

Notons que :

ε_v^{loc} est la déformation volumique locale,

ε_{xx} est la déformation longitudinale locale donnée par la CIN,

ε_{yy} est la déformation transversale locale donnée par la CIN,

ε_{zz} est la déformation verticale locale estimée.

Rappelons que la CIN est réalisée par le logiciel Vic2D qui ne permet donc pas de calculer la déformation verticale locale. Ainsi, l'estimation de la déformation de retrait locale nécessite, dans notre étude, une estimation de ε_{zz}. Pour cela, nous avons adopté la méthodologie décrite ci-dessous (analogue à l'estimation de la déformation ε_z globale).

1- Hypothèses de calcul :

- En utilisant les résultats de la littérature obtenus par (Wei, 2014), exposés en revue de littérature dans la section IV.2.1.3, nous pouvons considérer que les variations d'indice des vides globale sont valables au niveau local (e^{loc} = e) en chaque petite région de l'échantillon proche de la saturation.

- La deuxième hypothèse consiste à considérer que la correction de la déformation verticale globale suggérée précédemment (section IV.2.2.1 §1) est valable sur la déformation verticale locale.

2- Méthode de calcul :

La première hypothèse citée ci-dessus nous permet d'exprimer la déformation volumique locale à partir de la déformation volumique globale :

$$\varepsilon_v^{loc} = \varepsilon_v = \frac{e_0 - e^{glob}}{1 + e_0} \qquad \text{[IV.13]}$$

Ainsi, nous pouvons déduire la déformation verticale locale ε_{zz} comme suit :

$$\varepsilon_{zz} = \varepsilon_v^{loc} - \left(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}\right) \qquad \text{[IV.14]}$$

Afin de suivre l'évolution de la déformation verticale locale estimée, nous avons choisi des zones de 1 cm^2, notées P_i (i=1 à 10), réparties sur toute la surface de l'échantillon comme illustré sur la cartographie ε_{xx} en figure IV.21.

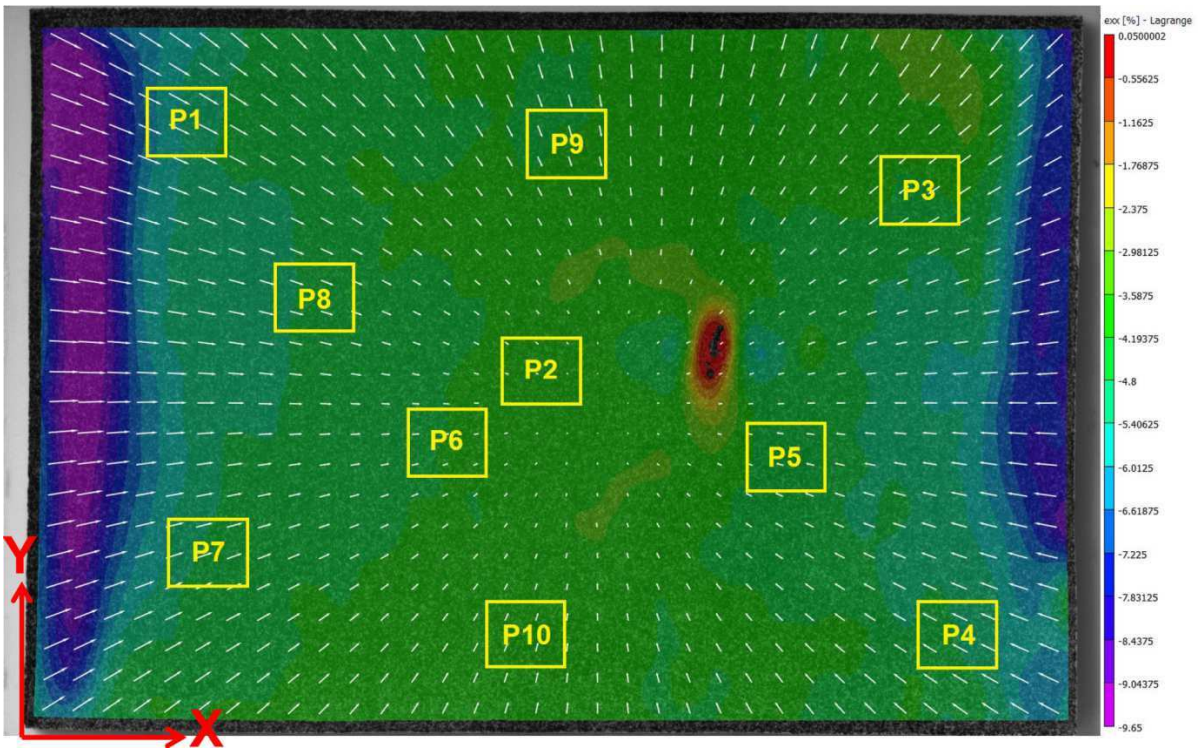


Figure IV.21 : Disposition des différentes zones de calcul P_i de la déformation verticale locale - cartographie Vic2D ε_{xx} à t=26h de l'essai CD2-s361.

La figure IV.22 présente les évolutions de la déformation verticale locale en chaque zone P_i au cours de séchage en fonction de la teneur en eau locale. Sur le même plan, nous y avons reporté la déformation verticale globale estimée et corrigée afin d'effectuer une comparaison.

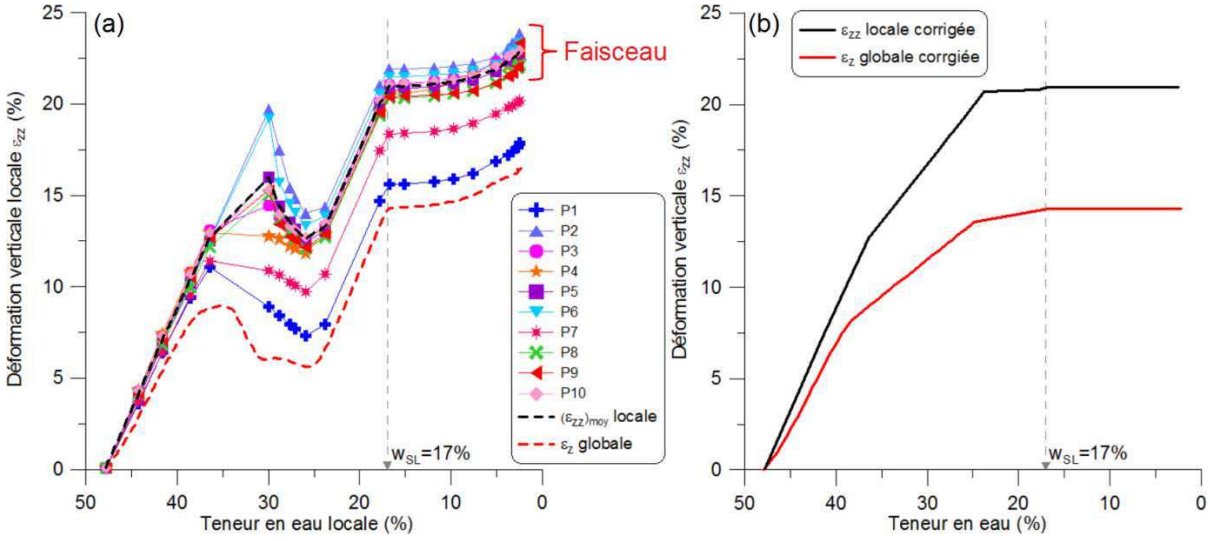


Figure IV.22 : Variations de la déformation verticale locale obtenues pour chaque zone P_i - cas de l'essai CD2-s361.

Nous pouvons constater que l'évolution de la déformation verticale locale est similaire dans toutes les zones P_i et très proche de celle de la déformation verticale globale, reportée sur la même plan (Fig. IV.22 a). En revanche, une différence de 5% en moyenne peut être

distinguée entre une zone proche des bords (P1) et une zone proche du centre (P2) de l'échantillon.

Par ailleurs, hormis les deux zones très proches des bords (P1 et P7), la déformation verticale locale évolue suivant un faisceau (Fig. IV.22 a). Nous avons considéré la moyenne de ce faisceau comme courbe de référence. Cette courbe corrigée est reportée sur la figure IV.22 (b) avec la courbe de la déformation verticale globale corrigée.

Une fois la déformation verticale locale est estimée, nous avons recalculé la déformation volumique locale :

$$\varepsilon_v^{loc} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \qquad [IV.15]$$

Remarque : cette déformation volumique recalculée sera utilisée pour l'estimation de la succion locale prévue en partie IV.4 de ce chapitre.

Ainsi, la déformation de retrait locale est de calculée :

$$\varepsilon_r^{loc} = \frac{1}{2+\eta}.\varepsilon_v^{loc} \qquad [IV.16]$$

Nous avons résumé la méthodologie pour l'estimation de la déformation de retrait locale, présentée ci-dessus, dans un organigramme illustré en figure IV.23.

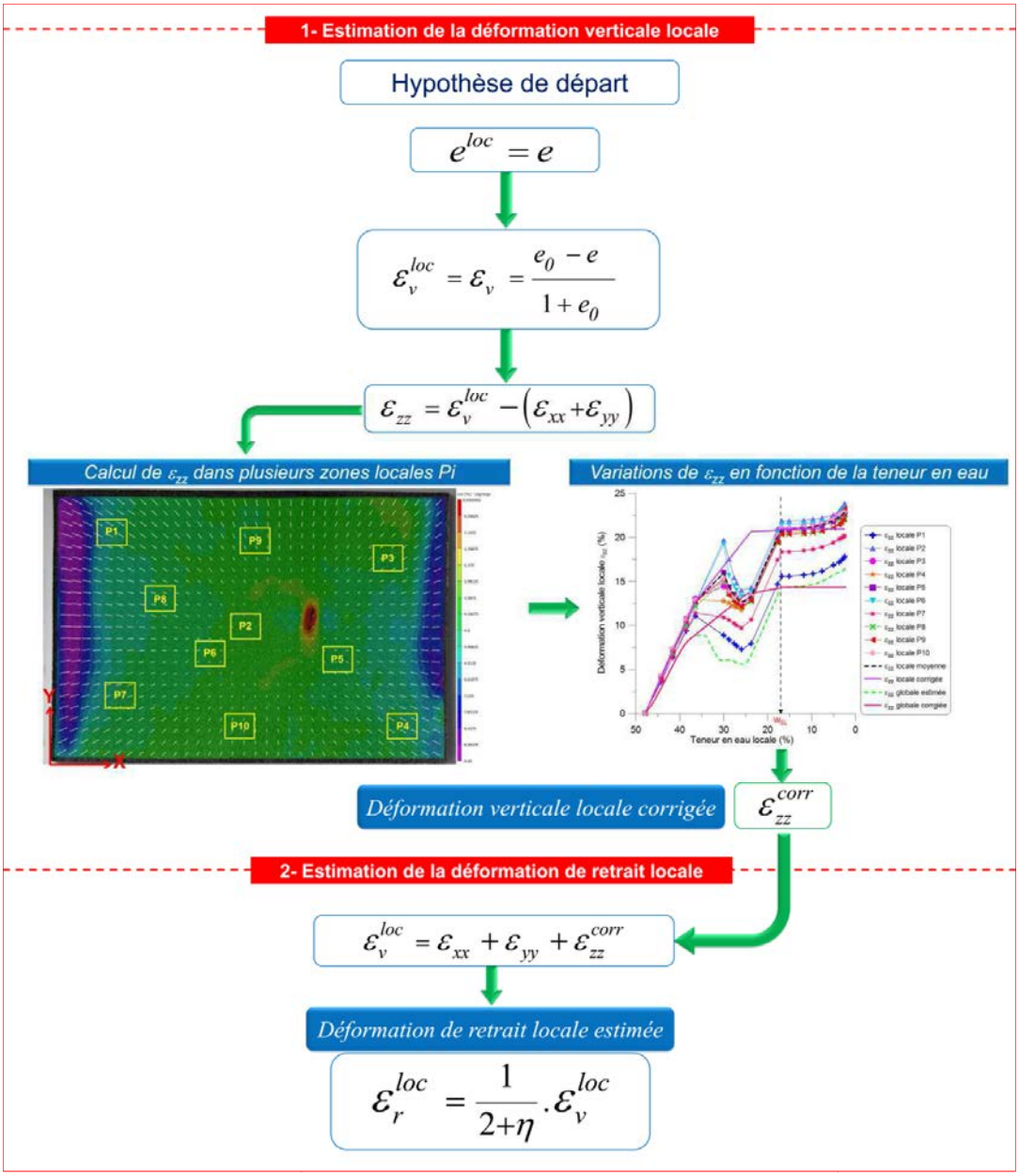


Figure IV.23 : Organigramme de la méthode adoptée pour l'estimation de la déformation de retrait locale.

3- Résultats de calcul :

Après avoir estimé la déformation de retrait locale, nous pouvons décomposer la déformation locale en deux parties, soient :

La première composante est responsable du retrait (toujours négative) et la deuxième composante qu'on nommera composante "mécanique" qui peut être positive ou négative. Cette deuxième composante sera responsable de l'initiation et du développement de la fissure.

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{xx}^{r} + \overline{\varepsilon}_{xx} \qquad [IV.17]$$

$$\varepsilon_{yy} = \varepsilon^{r}_{yy} + \overline{\varepsilon}_{yy} \qquad [IV.18]$$

$$\varepsilon_{zz} = \varepsilon^{r}_{zz} + \overline{\varepsilon}_{zz} \qquad [IV.19]$$

Pour analyser les résultats, nous avons choisi un essai (CD2-s361) sur lequel nous avons effectué le calcul local au niveau de deux zones (P3 et P8) indiquées sur la figure IV.21.

La figure IV.24 présente, sur trois plans différents, les variations des deux composantes de la déformation ainsi que la déformation locale en fonction du temps. Les deux zones P3 et P8 (Fig. IV.21) sont considérées ici.

Dans un premier temps, les résultats montrent des évolutions proches dans les deux zones choisies.

Au début du séchage, on peut constater que les déformations horizontales locales ε_{xx} et ε_{yy} (Fig. IV.24 a et b) augmentent légèrement.

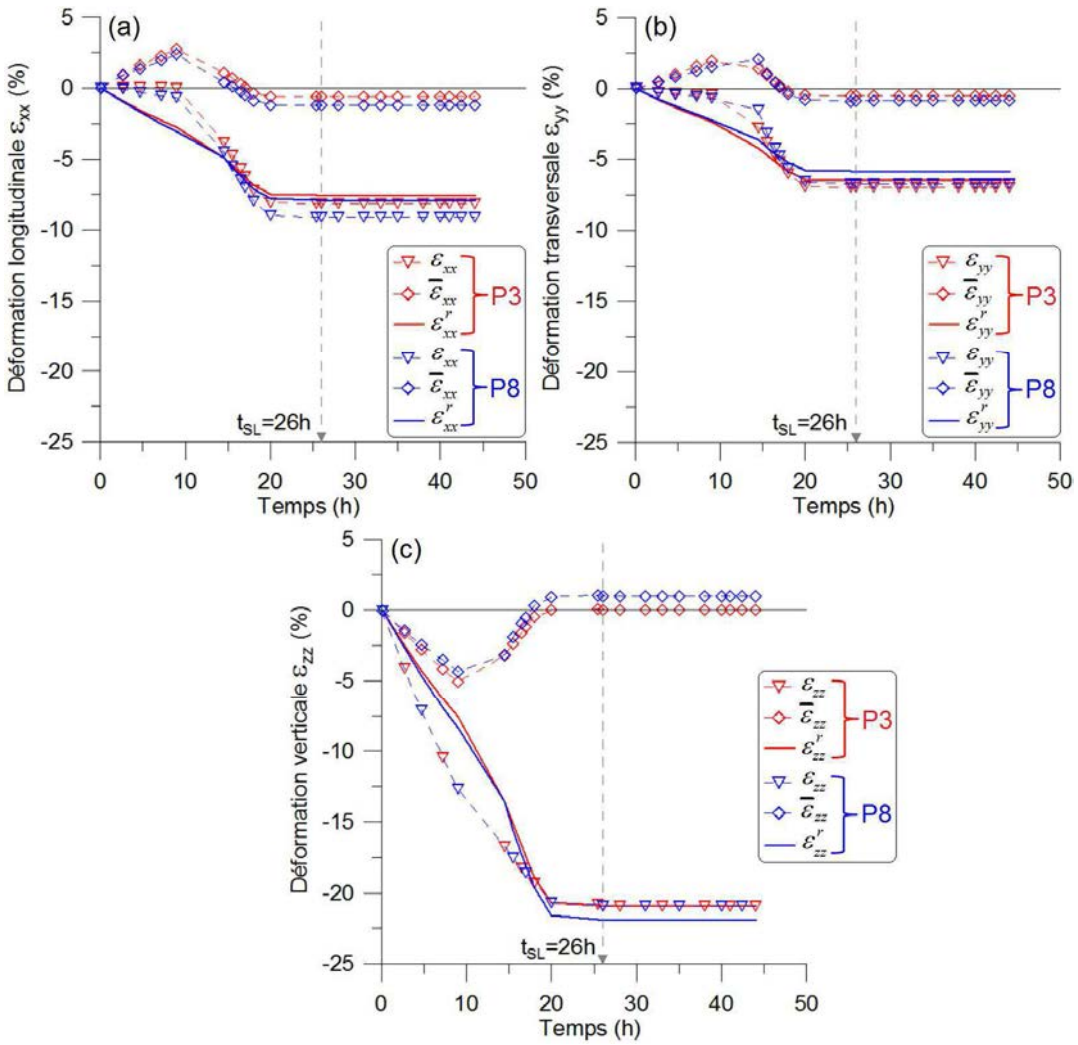


Figure IV.24 : Variations des composantes de chaque déformation locale : (a) longitudinale, (b) transversale et (c) verticale en fonction du temps - Essai CD2-s361.

Ces courbes mettent en évidence la dualité entre le retrait et la déformation mécanique. On peut remarquer que le risque de rupture est donné par les déformations horizontales où nous avons une variation positive des déformations mécaniques.

→ Influence du niveau de succion globale :

Notons que ce calcul a été également effectué à moyenne succion (CD3-s110) et faible succion (CD3-s38). Afin d'analyser l'effet de la succion globale sur l'évolution de la déformation de retrait locale, nous avons représenté sur la figure IV.25, les variations des composantes de retrait associées à chaque déformation locale pour les trois niveaux de succions.

Les résultats mettent en évidence une influence du niveau de succion globale sur l'évolution des déformations de retrait locales suivant les trois directions. La vitesse de retrait local augmente avec la succion imposée. Ceci est concordant avec le résultat du calcul global, où le niveau de succion imposée conditionne la vitesse d'évolution de la déformation volumique globale.

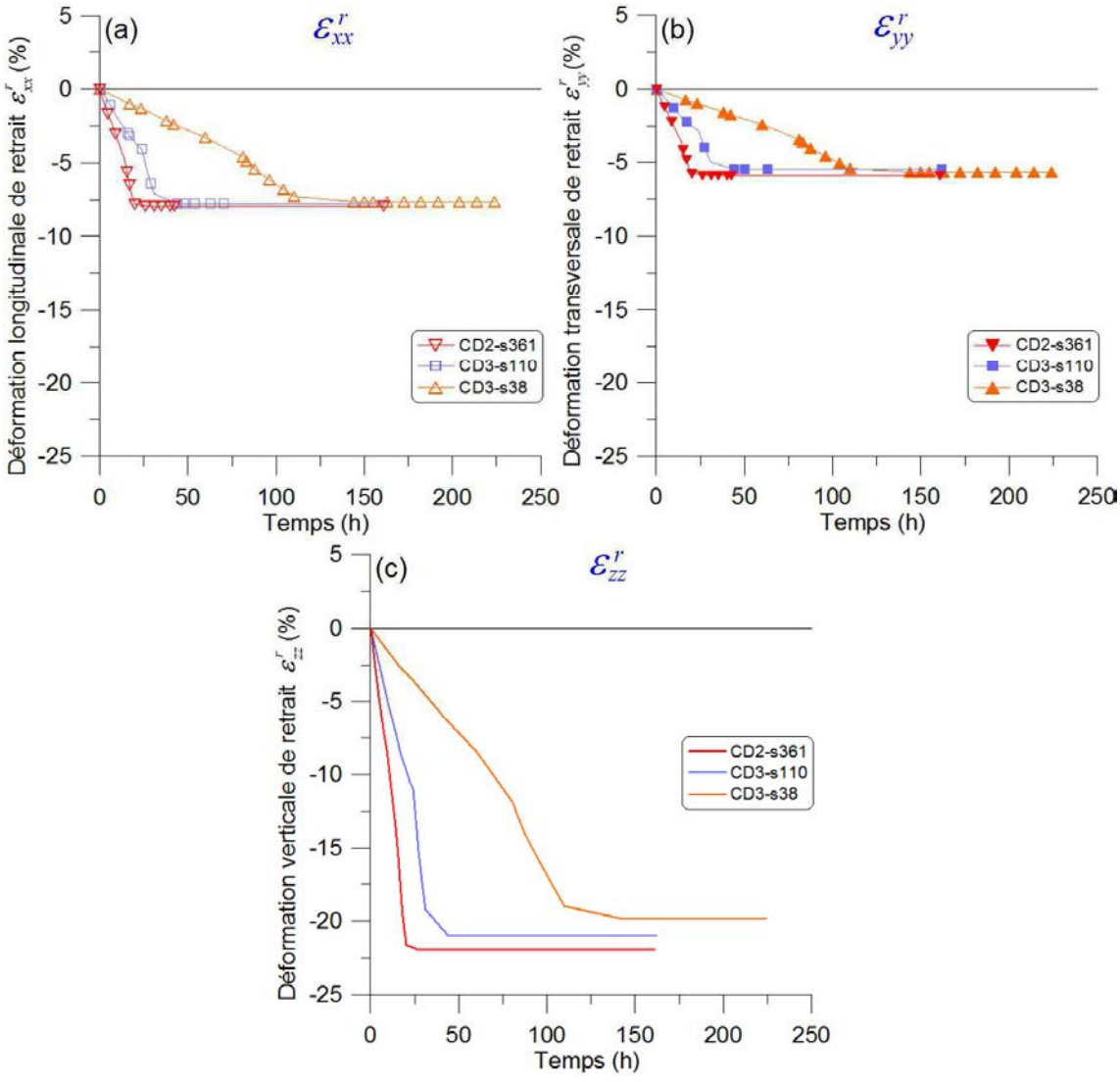


Figure IV.25 : Variations des déformations de retrait locales : (a) longitudinale, (b) transversale et (c) verticale en fonction du temps à différents niveau de succion.

→ Distributions de la composante mécanique des déformations locales :

Ce calcul nous permet d'analyser les distributions de la composante mécanique des déformations horizontales locales en fonction du temps, suivant deux lignes X-X' et Y-Y' illustrées en figure IV.26. Pour cela, nous avons choisi un essai (CD2-s361). Nous rappelons l'écriture des composantes mécaniques des déformations horizontales locales :

$$\overline{\varepsilon}_{xx} = \varepsilon_{xx} - \varepsilon^{r}_{xx} \qquad [IV.20]$$

$$\overline{\varepsilon}_{yy} = \varepsilon_{yy} - \varepsilon^{r}_{yy} \qquad [IV.21]$$

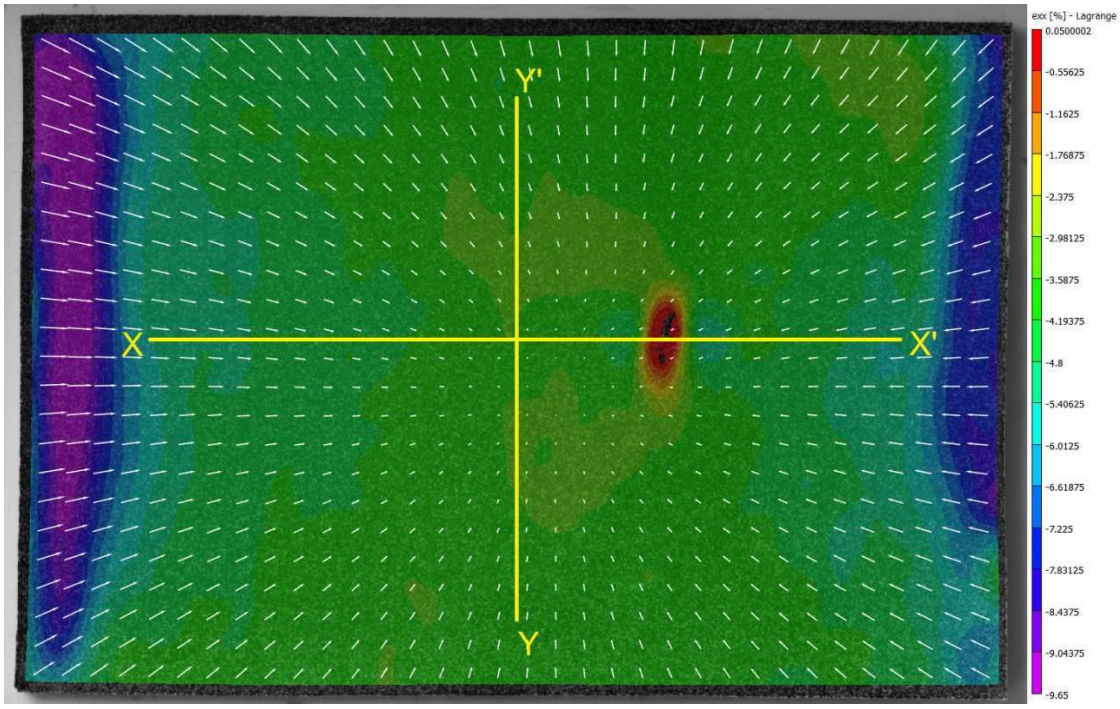


Figure IV.26 : Positions des lignes X-X' et Y-Y' des distributions - cartographie Vic2D ε_{xx} à t=26h (w= w_{SL}) de l'essai CD2-s361.

Suivant la ligne longitudinale X-X', les distributions de ε_{xx} et de sa composante mécanique sont représentées sur la figure IV.27 en fonction du temps.

Après avoir retranché la composante de retrait à la déformation longitudinale locale (Fig. IV.27 a), les distributions de sa composante mécanique (Fig. IV.27 b) montrent, qu'au début du séchage (jusqu'à t=14.5h), les distributions sont localisées en extension sur toute la ligne. Ensuite, ces dernières tendent à changer de signe en passant en compression, comme on l'a observé précédemment, sauf dans une zone où l'extension continue d'augmenter. Cette zone désigne l'apparition d'une fissure (crack) au cours du séchage.

Ainsi, en s'affranchissant de la composante de retrait, on obtient la composante mécanique qui nous permettra de définir une déformation critique, seuil au-delà duquel la fissuration se produit. Ce travail sera présenté dans le chapitre V.

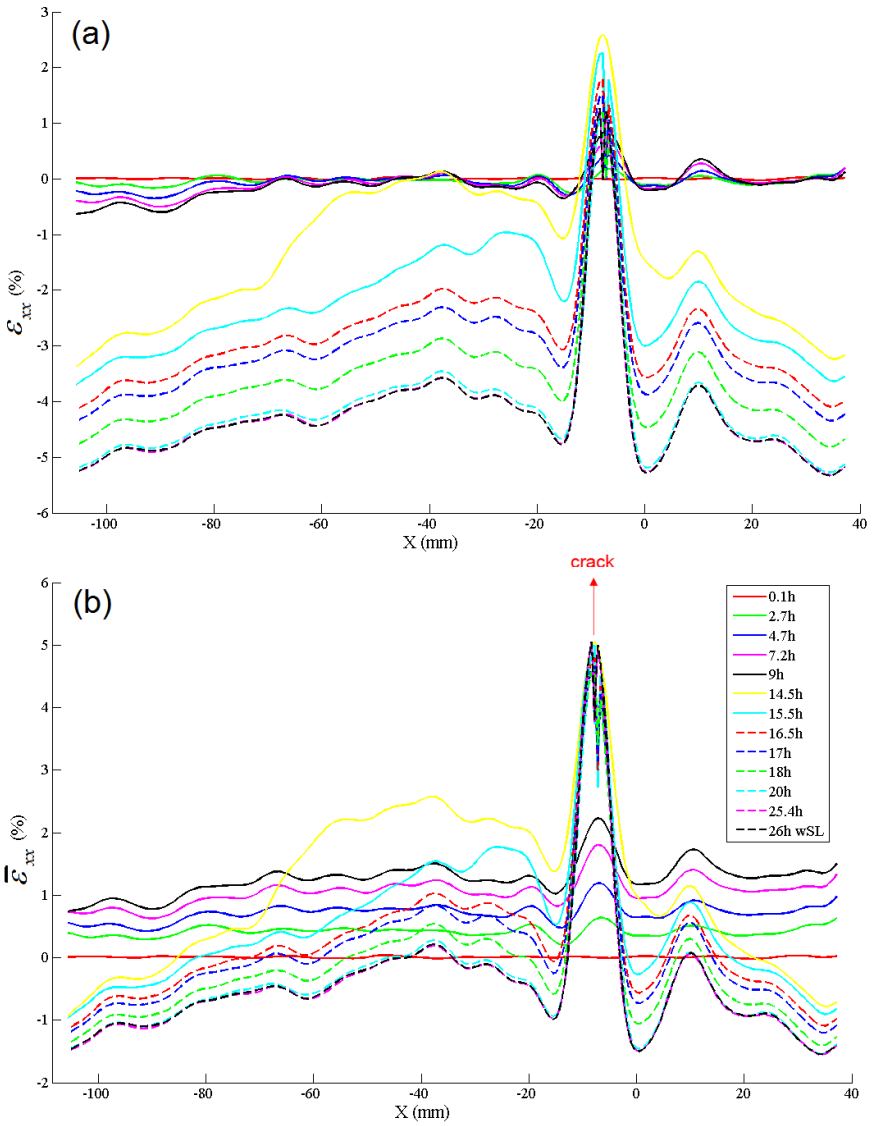


Figure IV.27 : (a) distribution de la déformation longitudinale locale ε_{xx} sur la ligne X-X' (b) distribution de la composante mécanique sur la ligne X-X' (essai CD2-s361).

Suivant la ligne transversale Y-Y', nous avons reporté sur la figure IV.28 les distributions de ε_{yy} ainsi que celles de sa composante mécanique.

Les résultats montrent une évolution des distributions de la composante mécanique qui tend vers l'extension au début de séchage sur toute la ligne, puis diminue jusqu'à changer de signe en compression après t=14.5h. Notons que dans ce cas, la composante mécanique de ε_{yy} n'a pas induit une apparition de fissures sur la ligne Y-Y'.

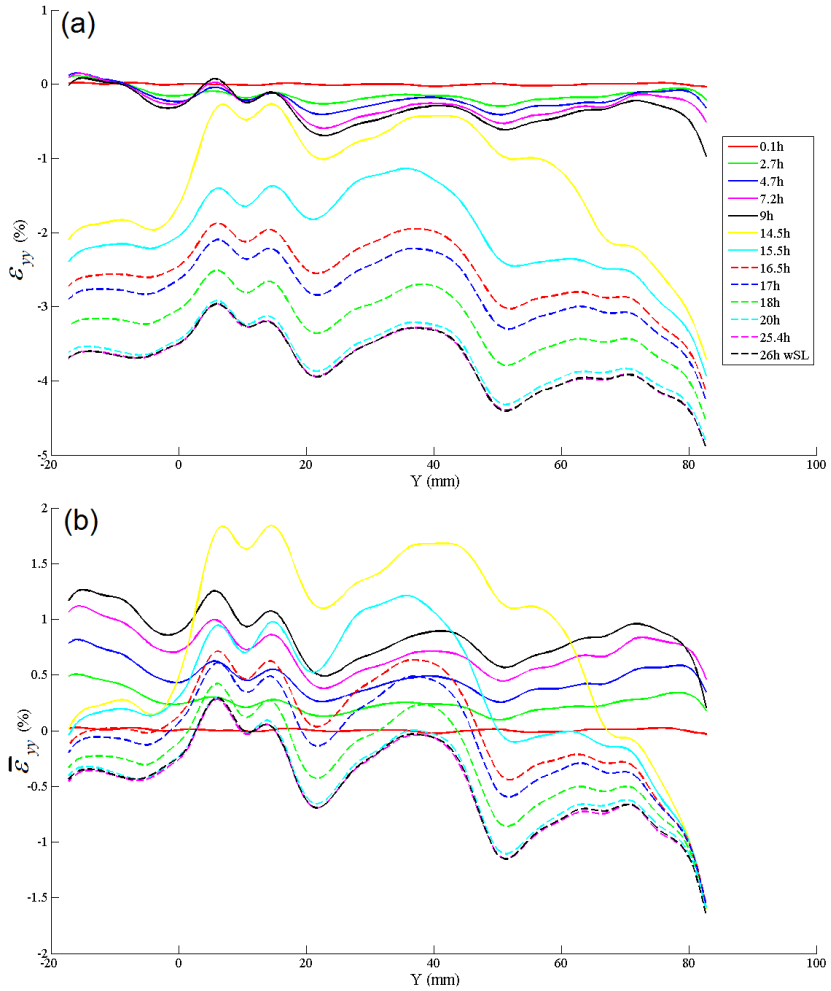


Figure IV.28 : (a) distribution de la déformation longitudinale locale ε_{yy} sur la ligne Y-Y' (b) distribution de la composante mécanique sur la ligne Y-Y' (essai CD2-s361).

IV.2.3. Séchage libre et retrait

Les essais de séchage libre ont été conduits à température et humidité ambiantes et relativement stables. Les valeurs sont T= 23°C et HR= 57% en moyenne. L'effet du support (téflon ou perspex) et la densité du mouchetis sera discuté dans cette section. Les conditions de ces essais sont rappelées dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4 : Conditions des essais de dessiccation libre.

Conditions	FD-téfl	FD-pers	FD_{sm}-pers	FD_{mmd}-pers
Support	téflon	perspex	perspex	perspex
Mouchetis	très dense	très dense	sans	moins dense

Remarque : l'essai FD_{sm}-pers n'est pas concerné par cette analyse en raison d'absence du mouchetis, indispensable pour le calcul par la CIN.

Nous présentons dans ce qui suit les résultats obtenus en termes de déformations globales, estimation de la déformation volumique globale ainsi que du retrait à l'échelle locale de l'échantillon sur chemin de séchage libre.

IV.2.3.1 Analyse des déformation globales

Le calcul des déformations globales dans les trois directions a été réalisé suivant la méthode décrite précédemment en section IV.2.2.1 (§a).

La figure IV.29 présente les déformations globales en fonction du temps sur trois plans correspondant chacun aux essais cités dans le tableau IV.4. Les temps t_{SL} à la limite de retrait sont reportés sur chaque courbe.

Les résultats montrent que :

- $t < t_{SL}$: une tendance d'évolution similaire est observée entre les trois essais. Au début de séchage, la déformation verticale augmente rapidement et maintient la même vitesse de progression jusqu'à la limite de retrait. En revanche, les déformations horizontales débutent par une légère évolution puis augmentent brusquement jusqu'à atteindre leurs paliers respectifs à $t = t_{SL}$.

- $t > t_{SL}$: les déformations globales se stabilisent au niveau de différents paliers. Le plateau le plus haut est celui de la déformation verticale.

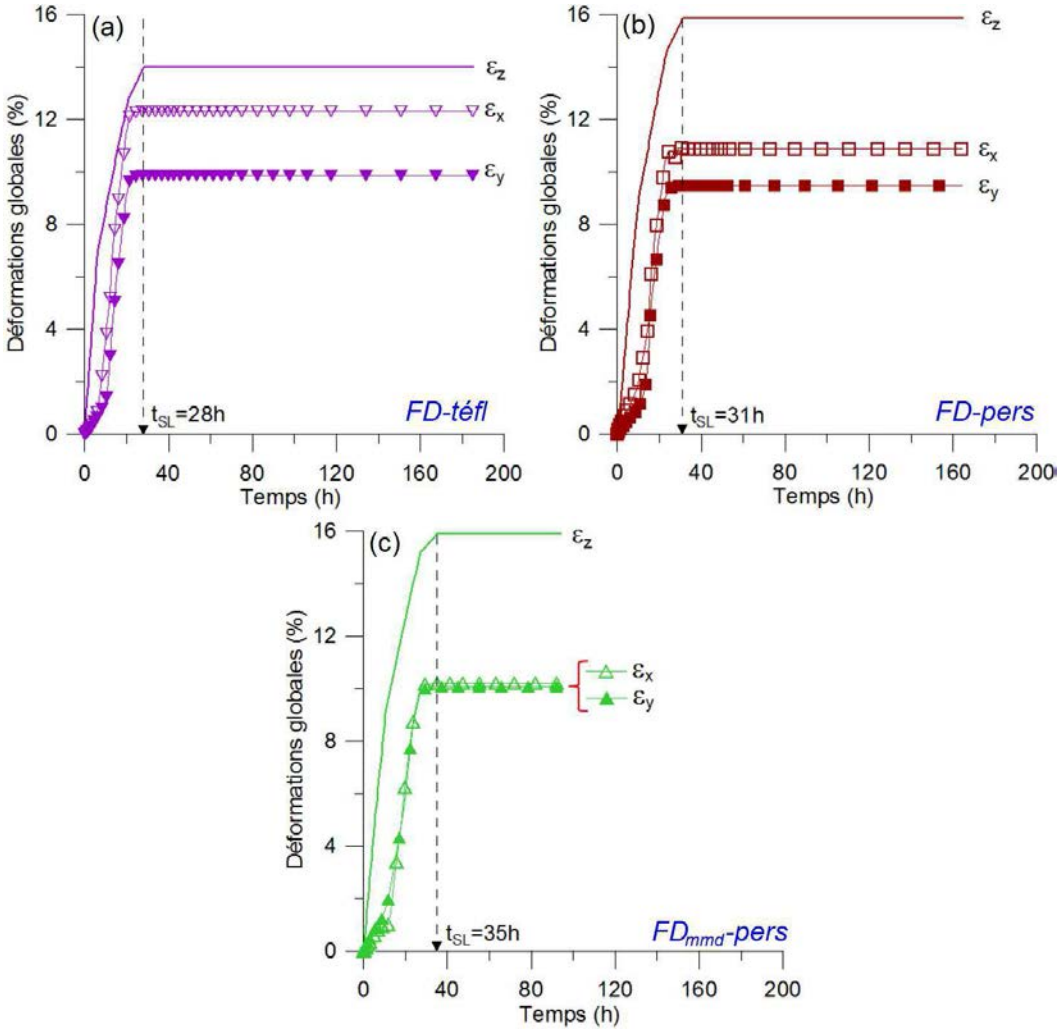


Figure IV.29 : Variations des déformations globales en fonction du temps à différentes conditions : (a) FD-téfl, (b) FD-pers et (c) FD_{mmd}-pers.

Afin d'analyser d'éventuels effets des conditions d'essai (nature du support et densité du mouchetis), nous avons représenté séparément les déformations globales ε_x, ε_y et ε_z en fonction des conditions d'essai (Fig. IV.30).

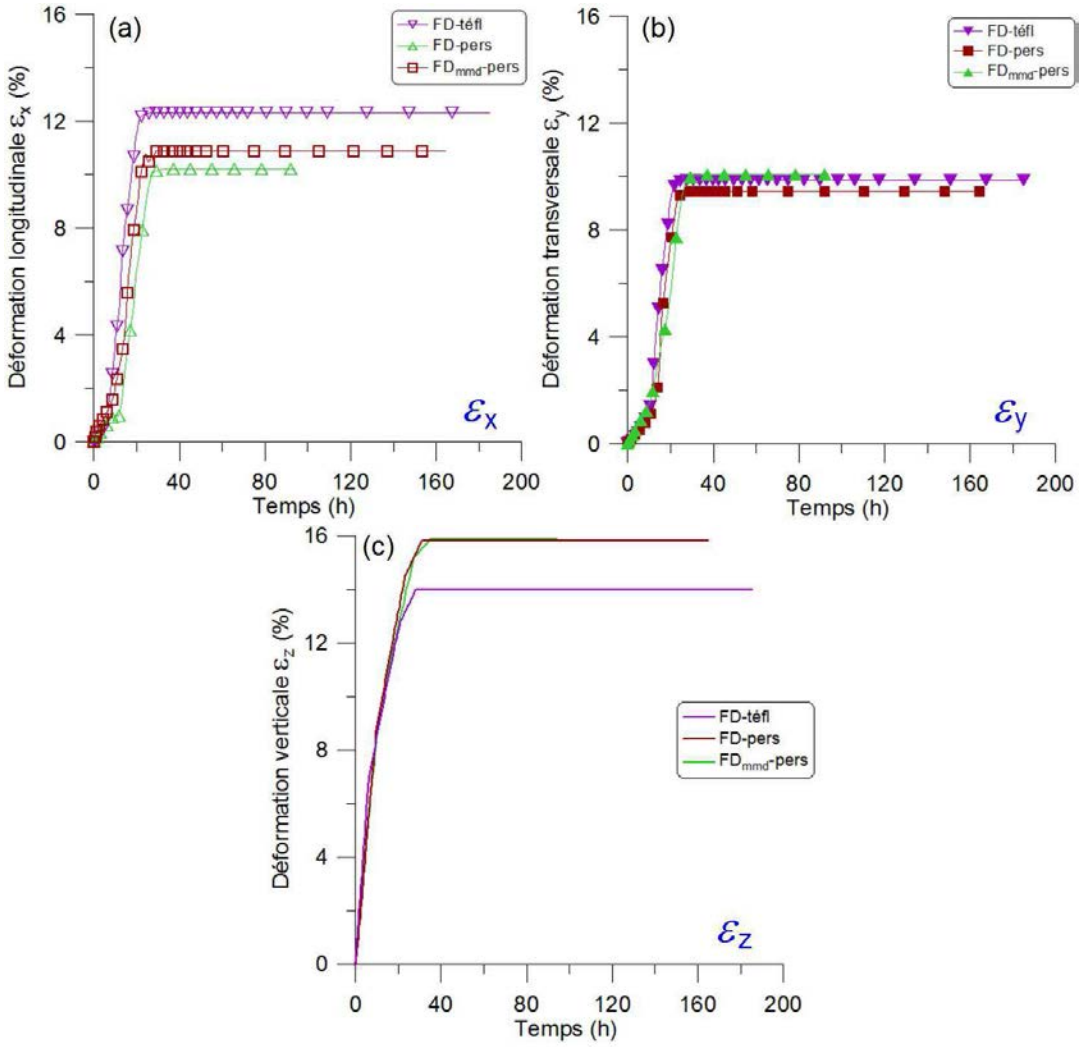


Figure IV.30 : Déformations globales et propriétés du support :
(a) longitudinale, (b) transversale et (c) verticale.

Cette représentation montre que les déformations globales dans les trois directions suivent des courbes de même allure quelque soit les conditions d'essai appliquées. Suivant l'axe Y, les déformations transversales sont très proches et atteignent des paliers quasi-similaires. Les déformations suivant l'axe X atteignent un palier plus haut (de 2% environ) dans le cas du support téflon.

Le mouchetis en revanche ne semble pas affecter l'évolution des déformations globales.

IV.2.3.2 Estimation de la déformation volumique globale

Dans cette section, nous allons analyser le phénomène de retrait à travers l'évolution de la déformation volumique globale calculée à partir de la somme des déformations globales obtenues dans les trois directions. La méthode est similaire à celle présentée précédemment.

La figure IV.31 présente des évolutions très proches de la déformation volumique en fonction du temps dans les trois essais. Ceci montre que les conditions d'essais ne modifient pas ces évolutions. Pour analyser ce résultat, nous avons calculé la vitesse de retrait ($d\varepsilon_v/dt$) dans chaque essai.

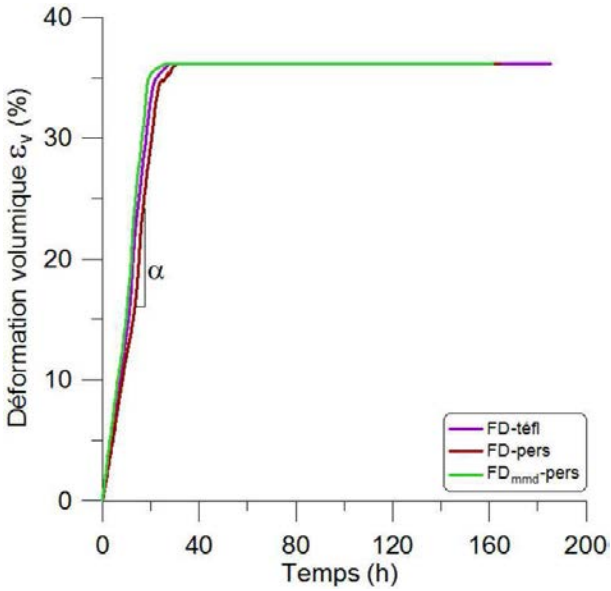


Figure IV.31 : Déformation volumique globale en fonction du temps à différentes conditions d'essai.

Les résultats en termes de vitesse de retrait en fonction du temps sont présentés sur la figure IV.32. Ils montrent des résultats très proches, caractérisés par une vitesse de retrait moyenne stabilisée à 1.2 %/h au début de séchage (entre t_1 = 0.1h et t_2 = 24h). Puis, la vitesse de retrait entame sa diminution à l'approche de la limite de retrait (entre t_2 = 24h et t_{SL} = 31h). Enfin, la vitesse s'annule après la limite de retrait ($t > t_{SL}$).

Nous pouvons conclure ici que les conditions d'essai, concernant le type du support ou la densité du mouchetis, n'affectent pas l'évolution des déformations globales. La déformation volumique, qui régit le phénomène de retrait, n'est pas non plus sensible aux conditions d'essai présentées.

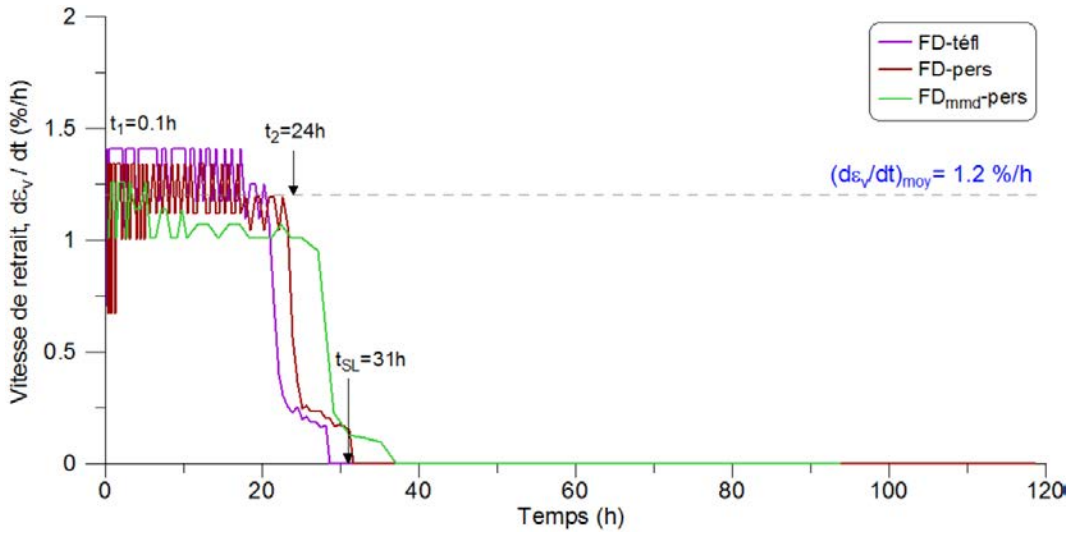


Figure IV.32 : Vitesse de retrait en fonction du temps sous différentes conditions d'essai.

IV.2.3.3 Champ des déplacements locaux

Dans cette section, nous allons aborder l'analyse du phénomène de retrait à l'échelle locale de l'échantillon. Puis, nous présentons les résultats issus de l'estimation de la déformation de retrait locale au cours de séchage.

La méthode est similaire à celle présentée en dessiccation contrôlée.

a- Mode de retrait local via la CIN :

La figure IV.33 montre les cartographies Vic2D des déplacements longitudinal (U) et transversal (V) obtenues à la limite de retrait. Les valeurs extrêmes, maximale positive (max) en rouge et minimale négative (min) en violet, y sont indiquées.

Dans les trois cas (a), (b) et (c), l'orientation du champ des déplacements, illustré par les vecteurs blancs, est similaire à celle obtenue sous dessiccation contrôlée, à savoir radiale dirigée vers le centre de l'échantillon. Par ailleurs, l'intensité des déplacements est équivalente dans les deux cas de séchage (libre et contrôlé) avec en moyenne 5.25 mm de déplacement longitudinal et 2.35 mm de déplacement transversal.

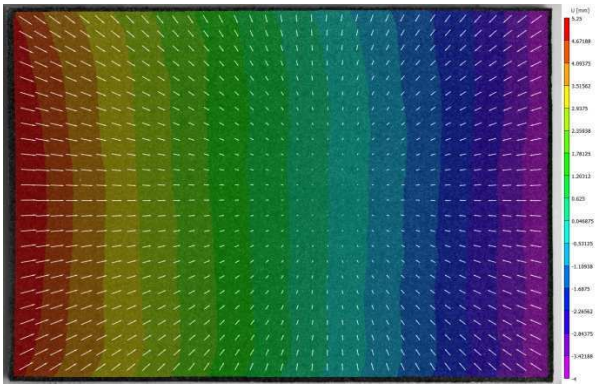
Afin d'analyser les résultats des trois essais, nous avons reporté dans le tableau IV.8 les caractéristiques observées.

Tableau IV.5 : Comparaison des déplacements locaux à la limite de retrait w = w_{SL}.

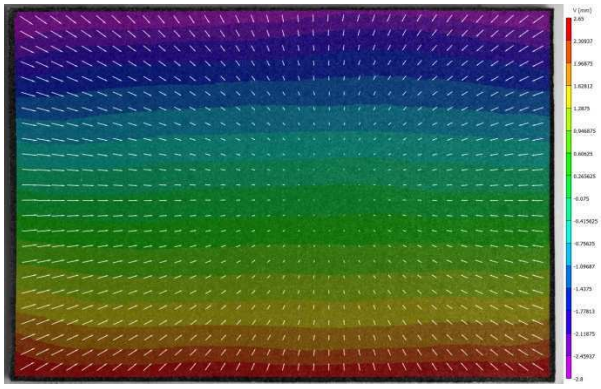
Discussion	**FD-téfl**	**FD-pers**	**FD_{mmd}-pers**
U (mm)	Max = +5.25 Min = -4	Max = +5.25 Min = -3.35	Max = +2.1 Min = -5.6
V (mm)	Max = +2.65 Min = -2.8	Max = +2.35 Min = -2.95	Max = +3.7 Min = -1.85

Les deux essais FD-pers et FD_{mmd}-pers ont été réalisés sous les mêmes conditions et sur le même type de support (perspex) à la seule différence dans la densité du mouchetis. On constate que les déplacements de l'essai FD-pers sont mieux répartis.

Cette analyse permet de mettre en évidence l'importance de l'application d'un mouchetis très dense, car il permet de calculer le maximum de points sur la surface du matériau.

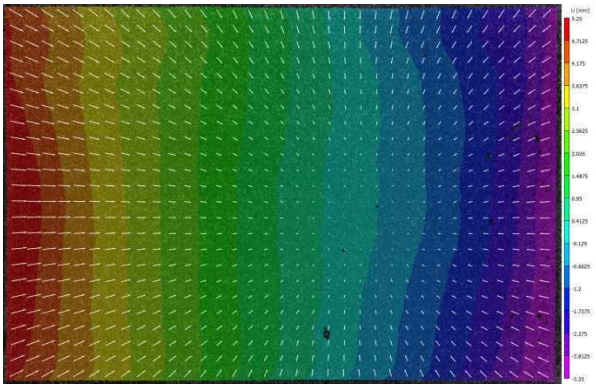


U : max= +5.25 mm / min= -4 mm

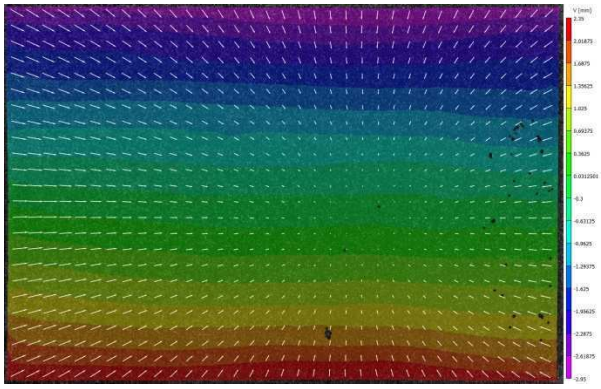


V : max= +2.65 mm / min= -2.8 mm

(a) Essai FD-téfl à t = 28h

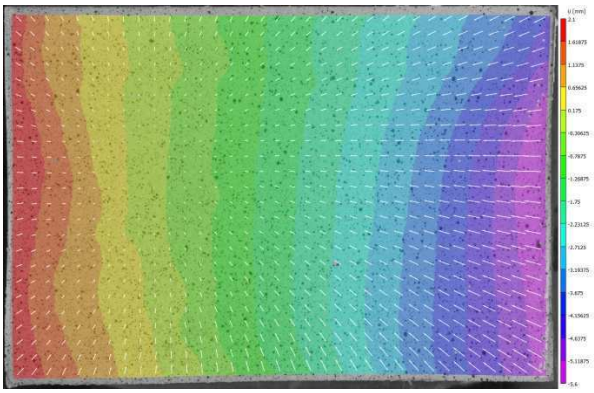


U : max= +5.25 mm / min= -3.35 mm



V : max= +2.35 mm / min= -2.95 mm

(b) Essai FD-pers à t = 31h



U : max= +2.1 mm / min= -5.6 mm

V : max= +3.7 mm / min= -1.85 mm

(c) Essai FD_{mmd}-pers à t = 35h

Figure IV.33 : Cartographies Vic2D des déplacements locaux à la limite de retrait $w=w_{SL}$

b- Estimation de la déformation de retrait locale :

Dans cette partie, nous avons suivi la démarche décrite précédemment (section IV.2.2.3 §b3) permettant d'estimer le retrait à l'échelle locale de l'échantillon. Pour ce calcul, nous avons choisi l'essai FD-pers et les mêmes zones de traitement prises en dessiccation contrôlée, à savoir P3 et P8.

Les résultats montrent des évolutions très proches des composantes de retrait et mécanique de chaque déformation locale dans les zones P3 et P8. Par ailleurs, ces variations sont comparables à celles obtenues en dessiccation contrôlée dans l'essai CD2-s361, en termes d'évolution et de niveaux des paliers atteints à la limite de retrait (t_{SL} = 31h).

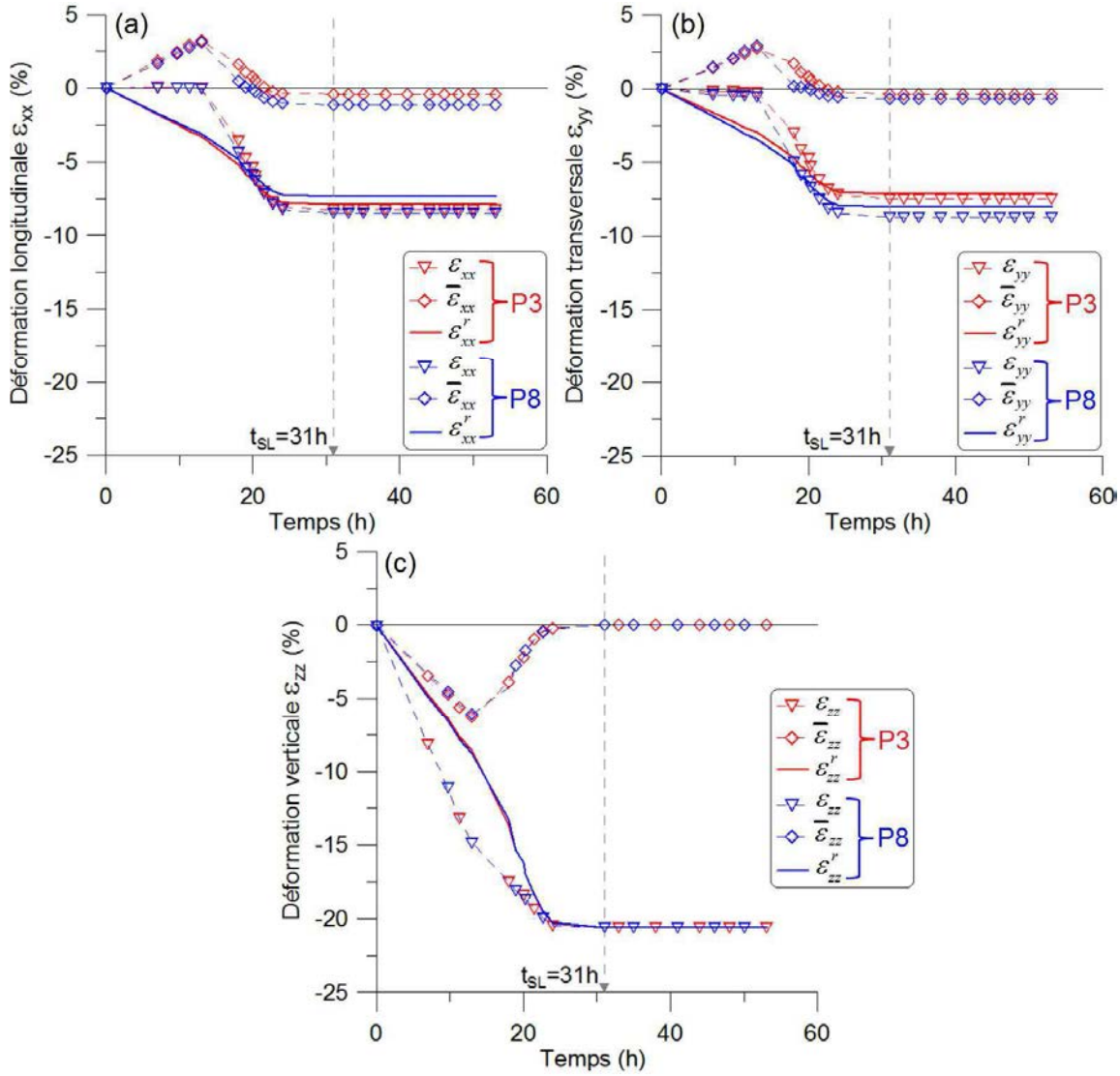


Figure IV.34 : Variations des composantes de retrait et mécanique chaque déformation locale : (a) longitudinale, (b) transversale et (c) verticale en fonction du temps - Essai FD-pers.

→ Distributions de la composante mécanique des déformations locales :

Les deux lignes X-X' et Y-Y' sur lesquelles sont calculées les distributions de la composante mécanique des déformations horizontales sont illustrées sur la figure IV.35.

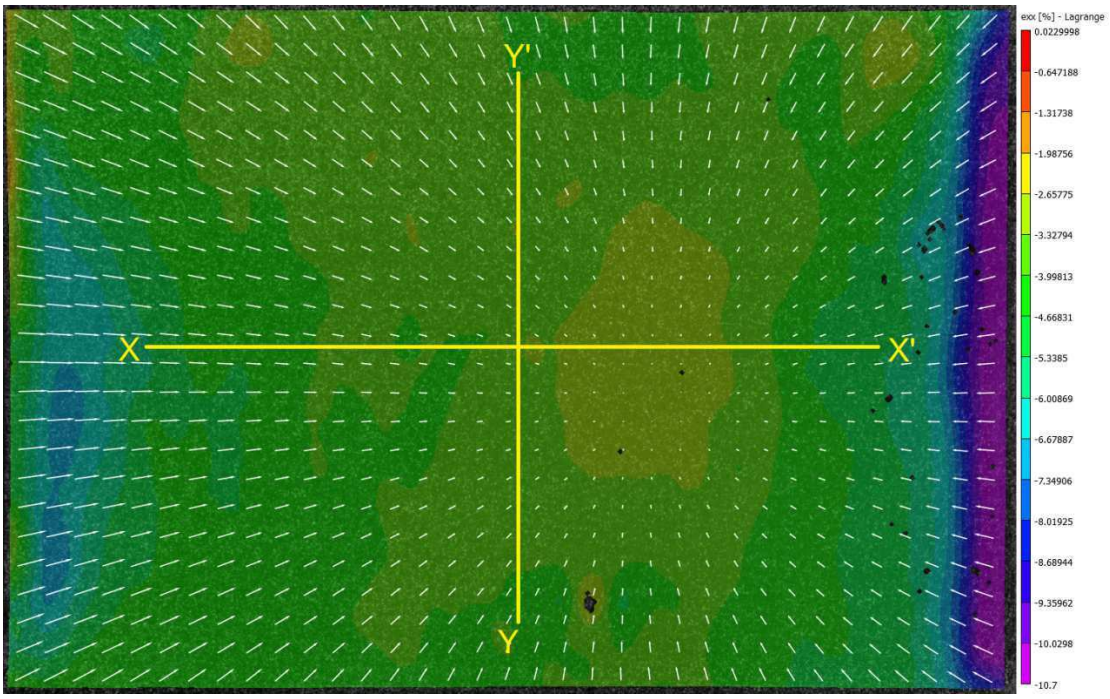


Figure IV.35 : Positions des lignes X-X' et Y-Y' des distributions - cartographie Vic2D de ε_{xx} à t=31h ($w=w_{SL}$) de l'essai FD-pers.

La figure IV.36 montre les distributions de ε_{xx} et de sa composante mécanique suivant la ligne longitudinale X-X' en fonction du temps.

Les distributions de la déformation locale ε_{xx} (Fig. IV.36 a) apparaissent en compression au cours de séchage sur toute la ligne X-X'. En revanche, les distributions de sa composante mécanique (Fig. IV.36 b) marquent une extension qui augmente au début du séchage, jusqu'à t=19h, puis diminue et change de signe en compression dans les zones proches des bords à la limite de retrait (t_{SL}=31h). Cela s'est produit sans provoquer de fissuration.

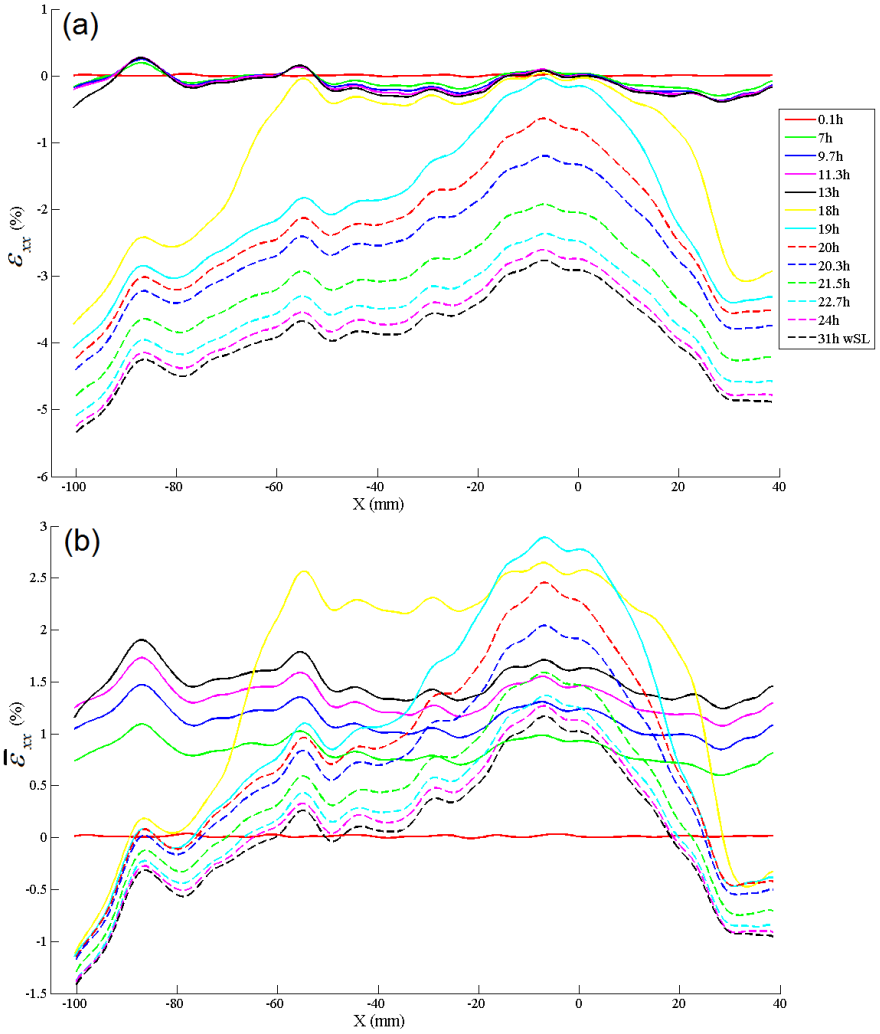


Figure IV.36 : (a) distribution de la déformation longitudinale locale ε_{xx} sur la ligne X-X' (b) distribution de la composante mécanique sur la ligne X-X' (essai FD-pers).

Nous avons reporté les distributions de ε_{yy} ainsi que celles de sa composante mécanique, obtenues suivant la ligne transversale Y-Y', sur la figure IV.37.

On peut observer des tendances d'évolution similaires à celles exposées ci-dessus suivant X-X'. Les distributions de la composante mécanique (Fig. IV.37 b) exhibent le même comportement, qui débute par une extension croissante jusqu'à t=18h puis tend à diminuer et passe en compression à proximité des bords avant d'atteindre la limite de retrait.

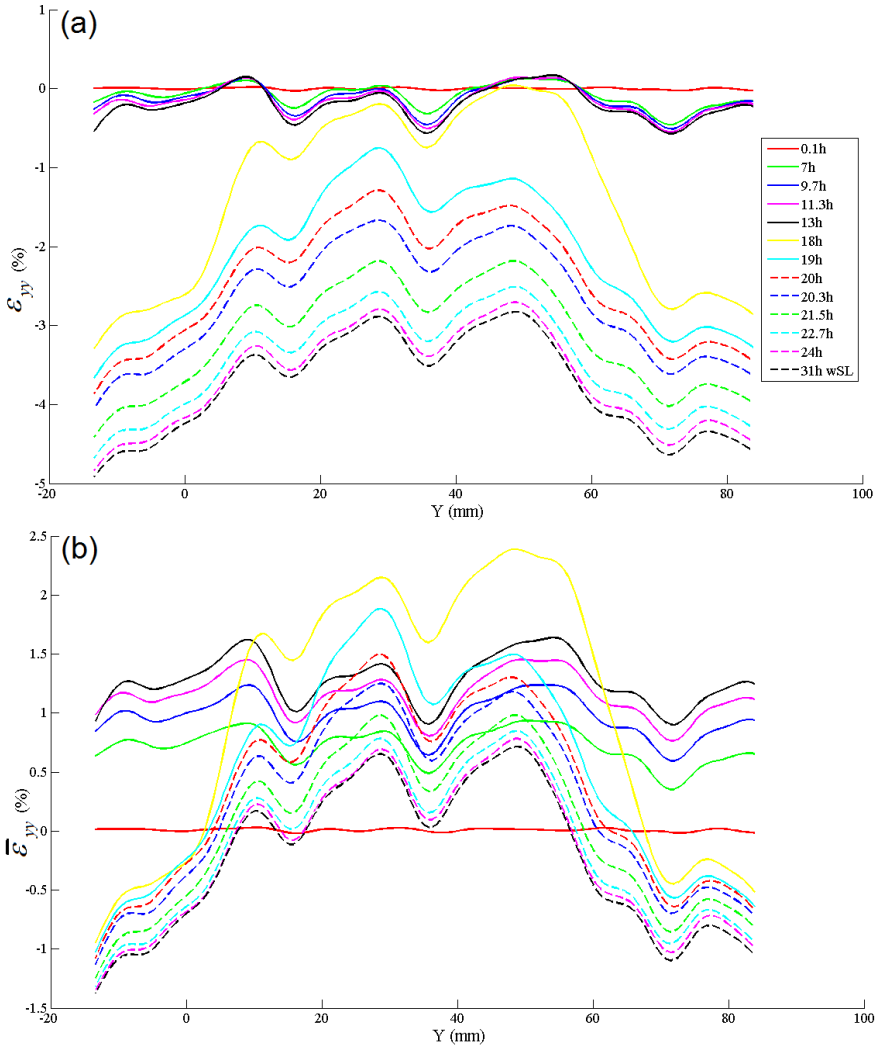


Figure IV.37 : (a) distribution de la déformation longitudinale locale ε_{yy} sur la ligne Y-Y' (b) distribution de la composante mécanique sur la ligne Y-Y' (essai FD-pers).

Dans cette partie, nous avons étudié le phénomène de retrait à l'échelle macroscopique et aussi à l'échelle locale de l'échantillon sous différents chemins de séchage libre et contrôlé.

- A l'échelle macroscopique, nous avons pu estimer les déformations globales dans les trois directions, à partir d'une méthodologie de calcul et des hypothèses permettant de pallier à la mesure non effectuée du déplacement vertical. Le retrait a été calculé à partir de la déformation volumique. Sous dessiccation contrôlée, nous avons observé un effet du niveau de la succion globale sur la cinétique du retrait qui est plus rapide à mesure que la succion augmente. Sous dessiccation libre, les résultats ont montré que les conditions d'essai (type de support et mouchetis appliqué) n'affectent sensiblement pas l'évolution des déformations globales.

- A l'échelle locale, nous avons décomposé la déformation locale en deux parties : une partie due au phénomène de retrait et une partie, que nous avons nommée déformation mécanique, qui gère le phénomène de fissuration.

IV.3. Estimation de la succion locale dans la matrice

Les résultats issus de l'étude du retrait local donne la possibilité de proposer une estimation de la succion locale de l'échantillon et de son évolution pendant le séchage (libre et contrôlé).

IV.3.1. Méthodologie de calcul de la succion locale

Dans cette section, nous détaillons la méthodologie que nous avons adoptée pour l'estimation de la succion locale qui sera notée s_{loc}.

Rappelons que ε_v^{loc} est la déformation volumique locale estimée à partir de la correction de ε_{zz}. Par ailleurs, ε_{xx} et ε_{yy} sont les déformations locales mesurées.

On a : $$\varepsilon_v^{loc} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \quad [IV.22]$$

D'où : $$e^{loc} = e_0 - (1 + e_0)\varepsilon_v^{loc} \quad [IV.23]$$

Et : $$w^{loc} = \left(\frac{e^{loc}}{G_s}\right).S_r \quad [IV.24]$$

Les relations permettant de relier la teneur en eau à la succion locales sont définies à partir des résultats expérimentaux de Wei (2014) et Taibi (1994), sur le même matériau, illustrés sur la figure IV.38.

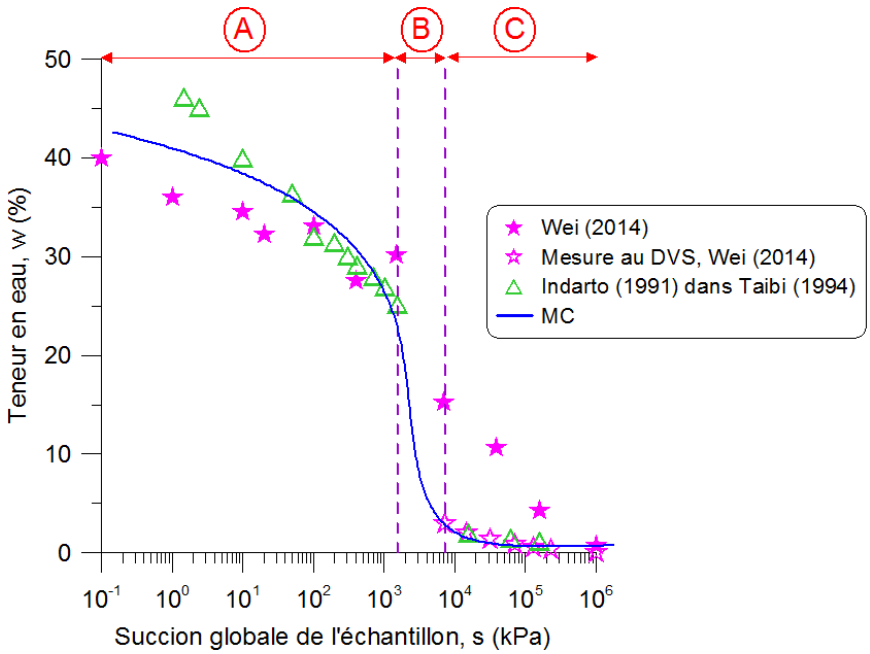


Figure IV.38 : Variations de la teneur en eau en fonction de la succion globale de l'échantillon (Indarto, 1991 cité dans Taibi, 1994; Wei, 2014).

Les formules exprimant la succion locale en fonction de la teneur en eau locale, calculée à partir de l'équation IV.24, sont les suivantes :

- Partie (A) où 30 % < w ≤ w_0=48 % :

$$s_{loc} = \exp\left(\frac{w^{loc} - 47.31}{-2.996}\right) \quad [IV.25]$$

- Partie (B) où 2.2 % < w ≤ 30 % :

$$s_{loc} = \exp\left(\frac{w^{loc} - 157.32}{-17.38}\right) \quad [IV.26]$$

- Partie (C) où w ≤ 2.2 % :

$$s_{loc} = \exp\left(\frac{w^{loc} - 6.24}{-0.47}\right) \quad [IV.27]$$

Nous avons écrit un programme sous Matlab basé sur ces équations qui permet de lire les données des déformations locales obtenues par Vic2D et aboutir aux cartographies de la succion locale de la matrice.

L'organigramme de la figure IV.39 présente la méthode de calcul.

Remarque : le programme Matlab est mis en annexe 3.4.

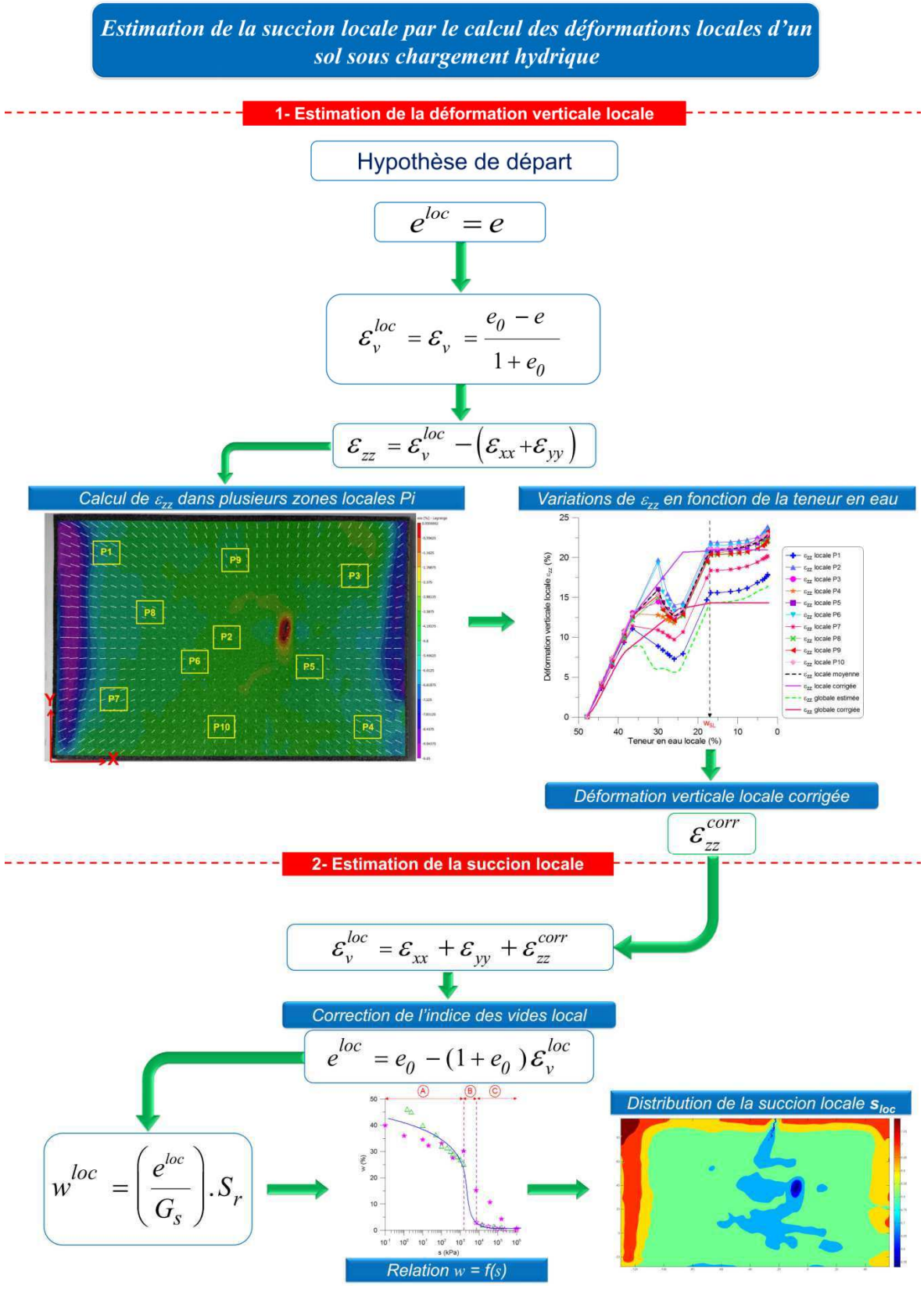


Figure IV.39 : Méthodologie d'estimation de la succion locale à partir du calcul des déformations locales sur un chemin hydrique.

IV.3.2. Distributions de la succion locale sur différents chemins hydriques

Les distributions de la succion locale dans l'échantillon d'argile ont été effectuées dans tous les essais de séchage libre et contrôlé. Nous avons choisi de présenter les essais de la liste du tableau IV.6. Les paramètres cités sont : l'humidité relative (HR), la température (T), le temps à la limite de retrait (t_{SL}) et la teneur en eau finale (w_{fin}).

Tableau IV.6 : Paramètres d'essai à l'échelle globale des chemins hydriques choisis.

Paramètres (Valeurs moyennes)	**Catégories**			
	Séchage contrôlé			**Séchage libre**
	CD2-s361	**CD3-s110**	**CD2-s38**	**FD-pers**
HR (%)	7	45	76	55
T (°C)	21	26	23	23
t_{SL} (h)	26	44	179	31
w_{fin} (%)	2.65	1.68	2.07	1.35

La figure IV.40 présente les cartographies des distributions de la succion locale estimée pour les différents chemins hydriques à la limite de retrait (colonne 1) et à la fin du séchage (colonne 2). La couleur bleu indique la valeur minimale de la succion (min) tandis que la couleur rouge correspond à la valeur maximale (max).

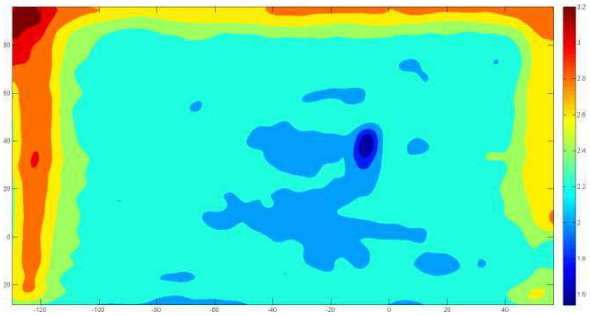
1- Séchage contrôlé - Essai CD2-s361 (Fig. IV.40 a) :

A forte succion imposée, les résultats montrent une distribution uniforme de la succion locale sur la majorité de la surface de l'échantillon excepté les zones très proches des bords.

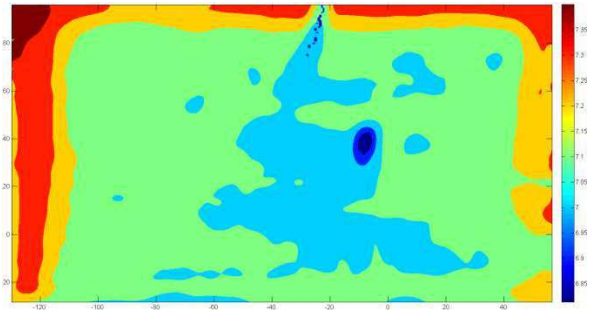
- A la limite de retrait (Fig. IV.40 a1), la succion locale moyenne est égale à 2.2 MPa avec une nuance de 1.13 MPa entre les bords et le centre. A mesure que le séchage avance, la teneur en eau diminue et par conséquent la succion locale augmente.

- A la fin du séchage (Fig. IV.40 a2), la succion locale moyenne atteint environ 7.05 MPa. La différence entre les bords et le centre décroit.

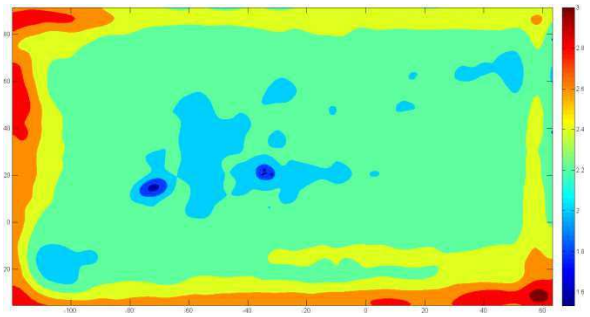
Au voisinage des fissures, nous pouvons noter que la succion locale correspond à une valeur minimale soit 1.54 MPa à la limite de retrait et à 6.81 MPa à la fin du séchage.



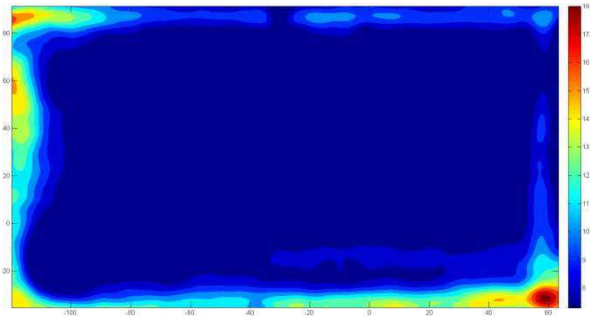
(a1) min= 1.54 MPa / max= 3.33 MPa



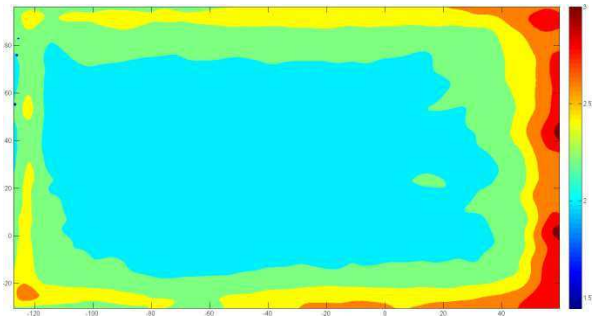
(a2) min= 6.81 MPa / max= 7.48 MPa



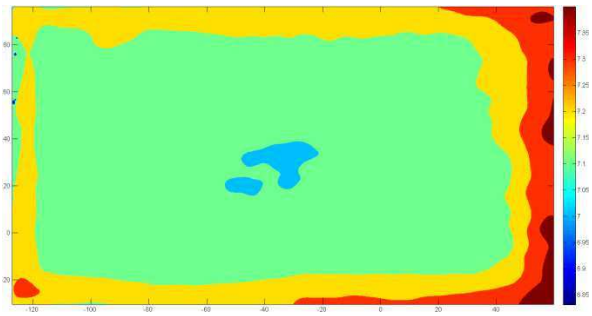
(b1) min*= 1.53 MPa / max*= 3.07 MPa



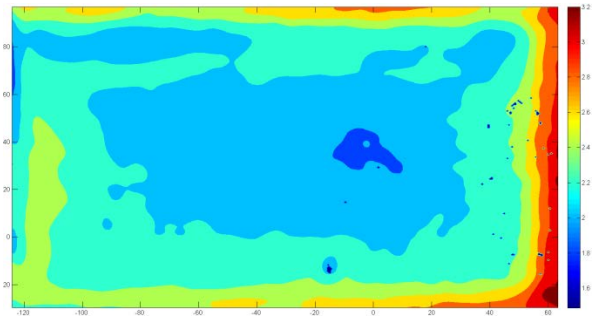
(b2) min= 7.3 MPa / max= 18.4 MPa



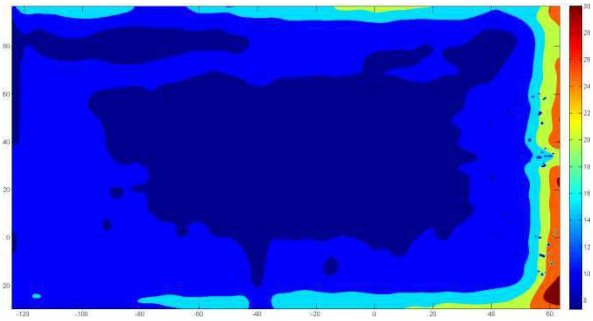
(c1) min= 1.44 MPa / max= 3.08 MPa



(c2) min= 6.83 MPa / max= 7.45 MPa



(d1) min= 1.48 MPa / max= 3.25 MPa



(d2) min= 7.35 MPa / max= 31.5 MPa

(1) A la limite de retrait t=t_{SL}

(2) A la fin du séchage

Figure IV.40 : Cartographies de distribution de la succion locale estimée s_{loc} : (a1, a2) CD2-s361, (b1, b2) CD3-s110, (c1, c2) CD2-s38 et (d1, d2) FD-pers.

** min : valeur minimale de s_{loc}, max : valeur maximale de s_{loc}.*

2- Séchage contrôlé - Essai CD3-s110 (Fig. IV.40 b) :

A moyenne succion imposée, la distribution de la succion locale est également uniforme mis à part la région proche des bords. La succion locale moyenne est égale à 2.2 MPa à la limite de retrait (Fig. IV.40 b1) et environ 7.3 MPa à la fin du séchage (Fig. IV.40 b2).

En revanche, la différence entre les valeurs obtenues aux bords et au centre est importante à la fin du séchage. Elle atteint environ 5 MPa si on considère une succion moyenne sur les bords, et environ 10 MPa si on considère la valeur maximale de la succion aux bords. Ceci est cohérent avec les mesures de la teneur en eau qui a une valeur très faible aux bords (1.68%). La succion locale augmente et peut atteindre 18 MPa dans certaines zones des bords (Fig. IV.40 b2).

3- Séchage contrôlé - Essai CD2-s38 (Fig. IV.40 c) :

A faible succion imposée, la distribution de la succion locale est homogène, à la fois à la limite de retrait (Fig. IV.40 c1), où la valeur moyenne vaut 2 MPa, et à la fin du séchage (Fig. IV.40 c2) avec une valeur moyenne égale à 7.1 MPa.

4- Séchage libre - Essai FD-pers (Fig. IV.40 d) :

Sous dessiccation libre, la distribution de la succion locale estimée est plutôt homogène sur la surface de l'échantillon, avec des nuances aux bords à la limite de retrait (Fig. IV.40 d1). A la fin du séchage (Fig. IV.40 d2), la valeur maximale devient très élevée sur le bord de droite à 31.5 MPa. La teneur en eau mesurée dans cette région est en effet très faible (1.34%) sous une humidité relative HR=55%.

Discussion :

L'analyse effectuée de la succion locale au cours de séchage (libre ou contrôlé) nous a permis de constater dans un premier temps que la distribution est globalement uniforme en dehors des zones proches des bords.

On peut noter que dans les 3 cas de dessiccation contrôlée, la succion locale maximale dans l'échantillon ne correspond pas à la succion imposée à l'échantillon. Autrement dit, l'équilibre entre la solution saline saturée et l'échantillon d'argile en phase vapeur n'est jamais atteint.

Nous pouvons expliquer cela par la taille, très importante, de l'échantillon (190×130×4 mm^3) et la fin des échanges effectués en phase vapeur avec la solution saline saturée qui perd ses propriétés.

IV.3.3. Une loi pour la distribution de la succion locale

Cette partie concerne l'évolution de distribution de la succion locale. Pour cela, nous avons choisi 3 zones P1, P2 et P3 sur la surface de l'échantillon de la figure IV.41. Chaque zone est caractérisée par une ligne longitudinale (notée P_i-X, i=1 à 3) et une ligne transversale (notée P_i-Y, i=1 à 3). La longueur des lignes est identique et égale à 25 mm.

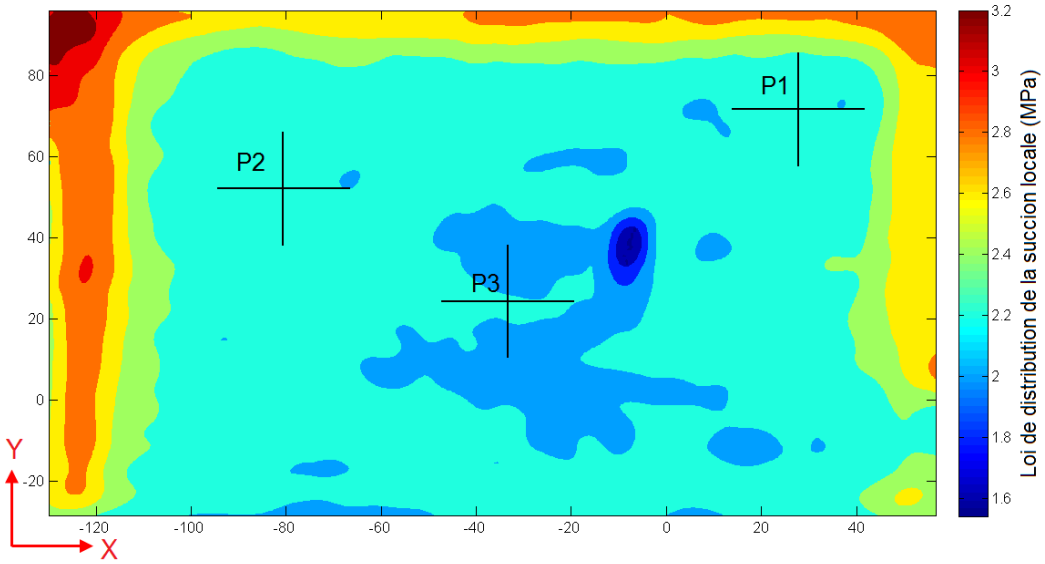


Figure IV.41 : Localisation des zones P_i étudiées sur la distribution de la succion locale - cas de l'essai CD2-s361 à la limite de retrait (t_{SL} = 26h, w_{SL}=17%).

Le calcul est réalisé à partir du programme Matlab utilisé précédemment pour l'estimation de la succion locale. Il s'agit de suivre les variations de la succion locale le long des lignes P_i en fonction du temps de séchage.

La figure IV.42 présente un exemple de variations de la succion locale obtenues suivant la ligne horizontale sur P1-X, le chemin hydrique est CD2-s361.

Quelque soit l'étape du séchage, les résultats montrent une distribution de la succion locale homogène sur le segment X à un instant t du séchage. La succion locale augmente à mesure que le séchage avance. La teneur en eau elle diminue en fonction du temps.

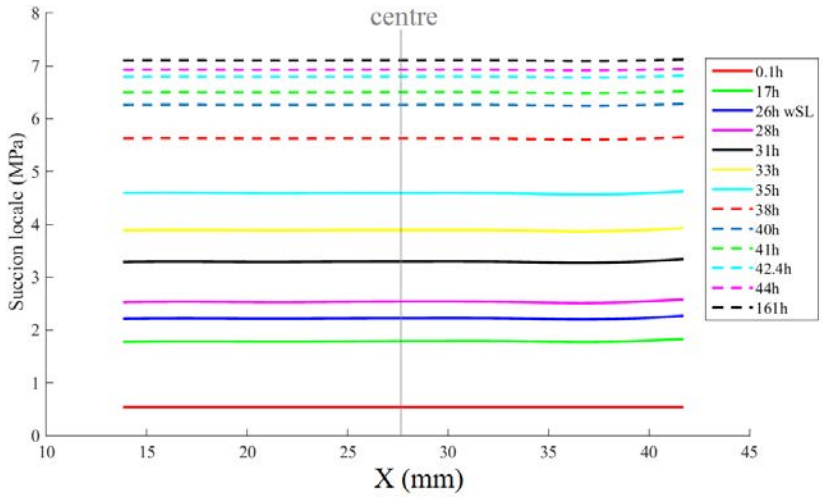


Figure IV.42 : Distribution de la succion locale suivant la ligne P1-X sur le chemin hydrique CD2-s361.

A la limite de retrait (t_{SL} = 26h), la succion locale est d'environ 2 MPa. La succion étant inversement proportionnelle à la teneur en eau, plus la teneur en eau se rapproche des valeurs faibles, plus la succion locale augmente jusqu'à atteindre sa valeur maximale, qui est 7 MPa en moyenne à la fin du séchage (t = 161h).

Pour analyser les résultats obtenus sur toutes les lignes longitudinales et transversales en P1, P2 et P3 (fixées sur la figure IV.41), nous avons reporté les différentes distributions dans le même plan, que nous avons présenté sur la figure IV.43.

Les courbes (a), (b), (c), (d), (e) et (f) exhibent une tendance similaire avec des valeurs de succion locale quasi identiques en fonction du temps. Ceci montre que la loi de distribution de la succion locale est homogène en tout point, sur la majeure partie de la surface de l'échantillon excepté les zones très proches des bords.

Ce calcul a été mené sur le reste des essais choisis à différentes succions imposées d'une part et de séchage libre d'autre part (tableau IV.6). Les résultats obtenus sont reportés en annexe 3.5 et montrent tous des tendances équivalentes.

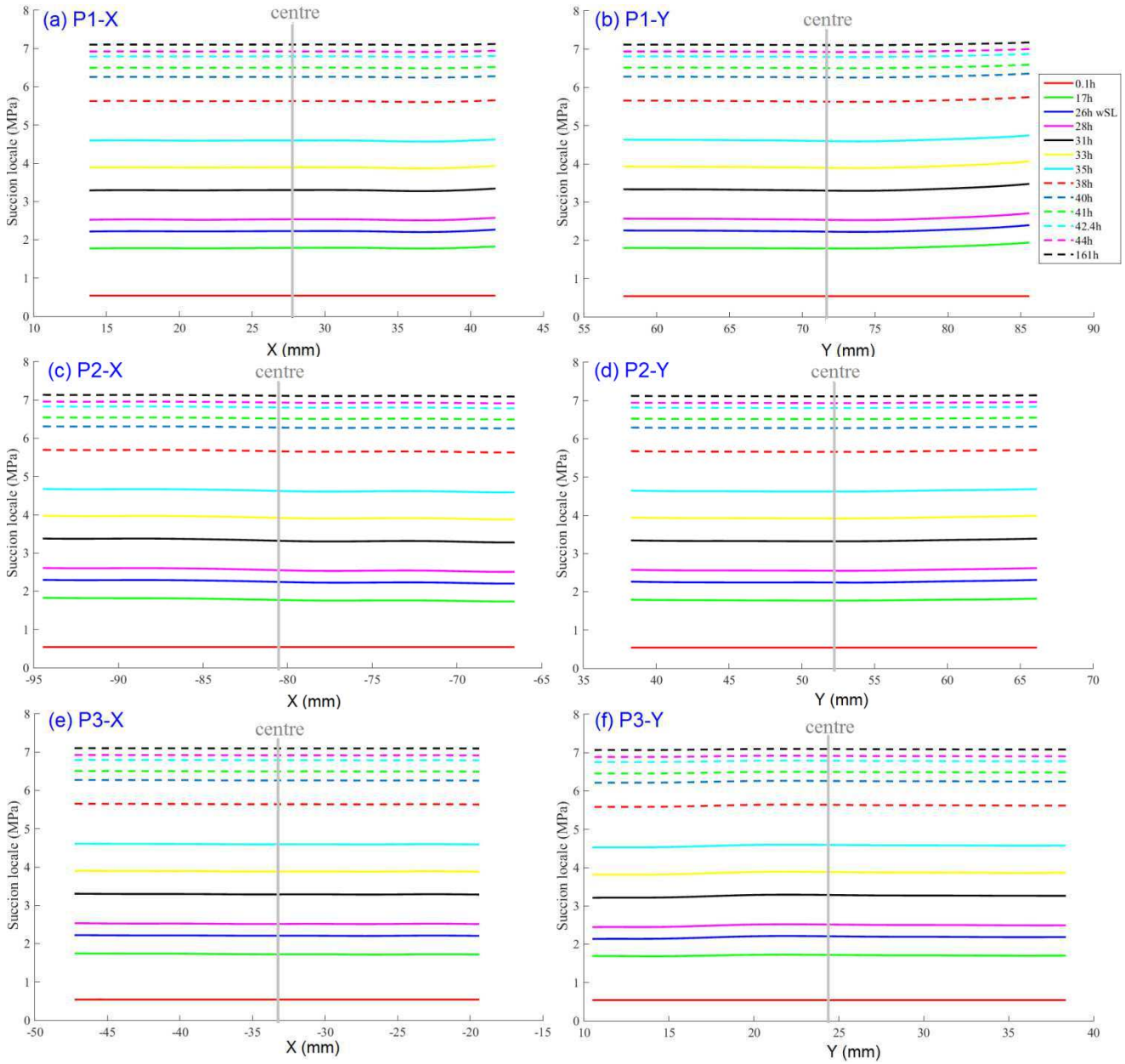


Figure IV.43 : Comparaison des distributions de la succion locale suivant les différentes lignes P1, P2 et P3 longitudinales (X) et transversales (Y) sur le chemin hydrique CD2-s361.

Les résultats représentés en figure IV.43 ont permis d'approcher une loi de distribution de la succion locale pour chaque chemin de séchage. Les variations en fonction du temps sont présentées sur la figure IV.44.

Remarque : les courbes de la figure IV.44 ont été obtenues, pour chaque essai, à partir des résultats de la ligne P1-X (étant équivalents sur toutes les lignes Pi-X et Pi-Y). Chaque point de ces courbes représente la valeur de la succion locale sur la ligne P1-X à un instant t du séchage.

Au début du séchage, la valeur initiale de la succion locale est égale à 0.55 MPa et correspond à un temps t = 0.1h. A la limite de retrait (t = t_{SL}), la succion locale enregistre une augmentation relative à hauteur de 2.2 MPa qui correspond à la pression de désaturation s_{DL} à partir de laquelle l'échantillon devient non saturé.

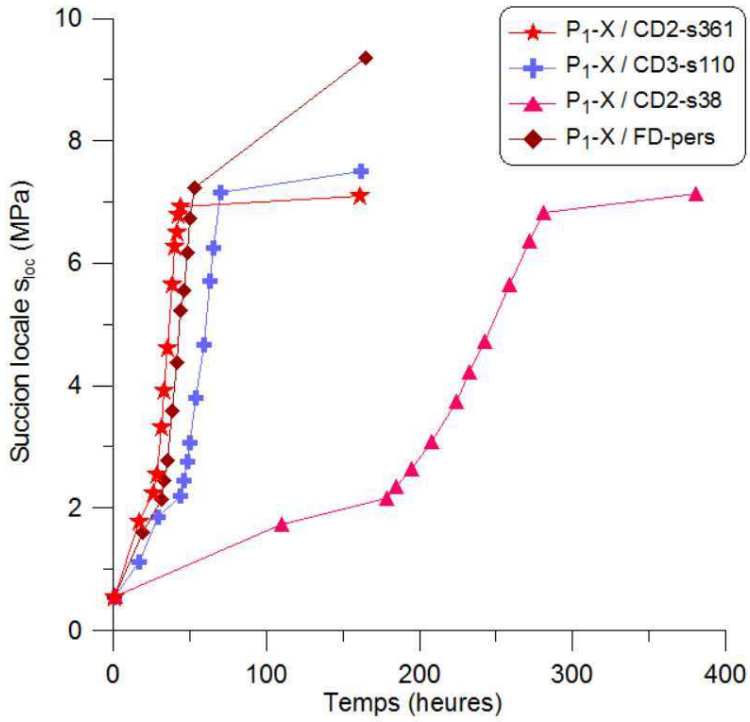


Figure IV.44 : Variations de la succion locale sur différents chemins hydriques.

Dans cette partie, nous avons effectué une estimation de la succion locale à partir du calcul approché, initié en partie IV.2. Les distributions de la succion locale obtenues dans différentes zones choisies nous ont permis de définir une loi de distribution possible de la succion locale valable sur différents chemins de séchage libre et contrôlé.

IV.4. Analyse des déformations locales via la CIN

Cette partie est dédiée à l'étude du comportement local de la matrice au cours du séchage libre et contrôlé. L'étude permettra également d'identifier les mécanismes de rupture pouvant se développer dans le matériau.

IV.4.1. Evolution des déformations locales sous dessiccation contrôlée

Les déformations locales sont présentées sous forme de cartographies Vic2D où peuvent être définies :

ε_{xx} : déformation longitudinale suivant X,

ε_{yy} : déformation transversale suivant Y,

ε_{xy} : déformation de cisaillement,

ε_1 : déformation principale majeure,

ε_2 : déformation principale mineure.

Ensuite, à partir de ces cartographies, nous allons calculer les distributions des déformations locales sur une section choisie de la surface de l'échantillon en fonction du temps.

Le calcul local sera également présenté par les déformations principales (le calcul est présenté en annexe 1.1, §1b).

IV.4.1.1 Cartographies Vic2D des déformations locales

L'analyse des déformations locales est effectuée en deux temps, à la limite de retrait et à la fin du séchage, sachant que les déformations positives sont liées à une extension (en rouge sur Vic2D) tandis que les déformations négatives sont liées à une compression (en violet sur Vic2D).

Nous faisons le choix des essais CD2-s361, CD3-s110 et CD3-s38 dont nous développerons les résultats pour chaque niveau de succion imposée. Les cartographies Vic2D des autres essais réalisés sont reportées dans l'annexe 3.6.

a- Essai à forte succion - [CD2-s361] :

→ A la limite de retrait ($w = w_{SL}$) :

La figure IV.45 présente les déformations locales d'un essai de dessiccation contrôlée (CD2-s361) à forte succion imposée à la limite de retrait (t = 26h, w_{SL} = 17%).

Les observations sont :

→ La cartographie Vic2D de la déformation longitudinale ε_{xx} (Fig. IV.45 a) montre des valeurs comprises entre deux extrémités maximale (ε_{xx}=+0.05 %) et minimale (ε_{xx}= -9.65 %) :

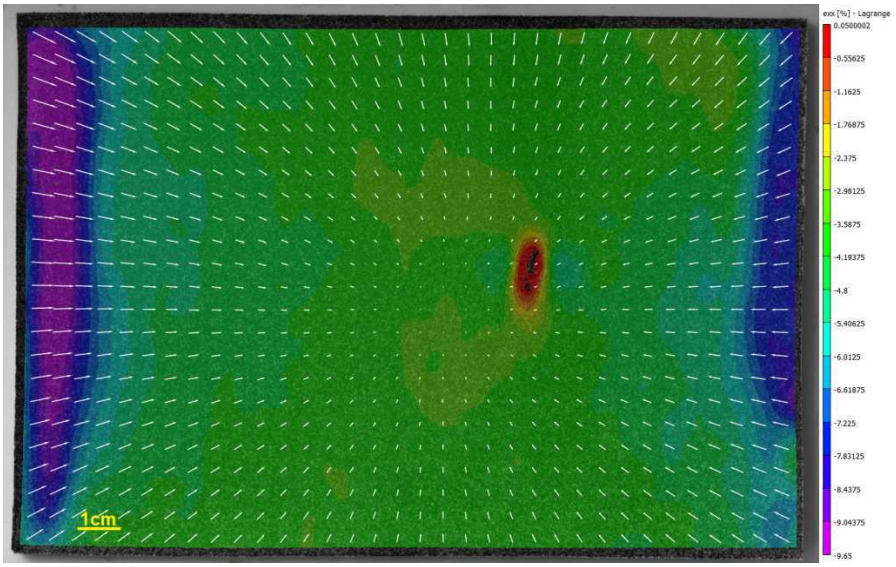
- La valeur maximale positive correspond à une extension, représentée par la zone rouge vers le centre de l'échantillon. La zone se concentre autour d'une fissure précoce provoquée par un défaut de surface (présence d'une bulle d'air).

- La valeur minimale négative correspond à une compression très importante aux niveaux des bords (en violet à gauche et en bleu à droite). Notons que la compression est très largement dominante (comprise entre ε_{xx}= -0.55 et ε_{xx}= -6 %, sans compter les bords) sur la surface du matériau hormis la zone très réduite d'extension.

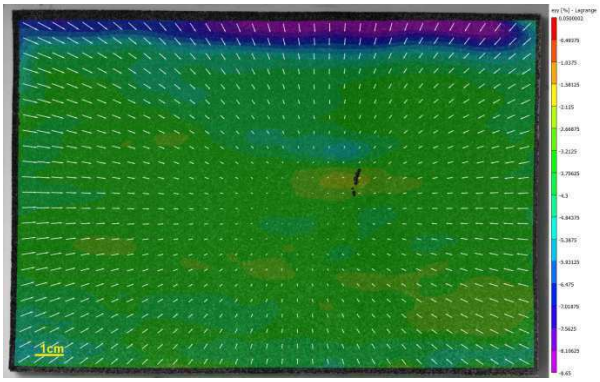
→ La déformation transversale ε_{yy} (Fig. IV.45 b) met en évidence une compression du matériau allant de ε_{yy}= -0.5 à ε_{yy}= -5.4 % avec une intensité plus importante au niveau du bord du haut à ε_{yy}= -8.65 %. Au voisinage de la fissure identifiée sur la cartographie de ε_{xx}, nous pouvons constater une zone de concentration de la déformation ε_{yy} en compression à très faible niveau ($\varepsilon_{yy} \approx$ -1%).

→ Les valeurs maximale positive et minimale négative de la déformation de cisaillement ε_{xy} (Fig. IV.45 c) sont respectivement ε_{xy} = +1.08 % et ε_{xy} = -0.63 %. La déformation de cisaillement négative est enregistrée aux limites de la fissure au dessus de laquelle une zone de déformation de cisaillement positive est également visible.

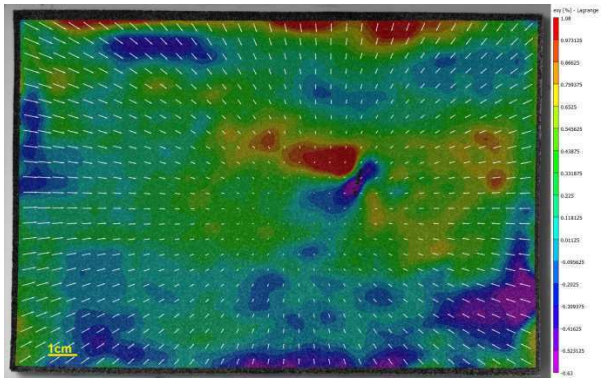
→ Les figures IV.45 (d) et (e) montrent les cartographies Vic2D des déformations principales notées respectivement ε_1, suivant la direction majeure (max ε_1 = +0.05 % et min ε_1 = -5.6 %) et ε_2, suivant la direction mineure (max ε_2 = +0.05 % et min ε_2 = -9.65 %). La déformation principale suivant la direction majeure ε_1 permet également d'identifier la fissure détectée sur la cartographie de la déformation longitudinale ε_{xx}.



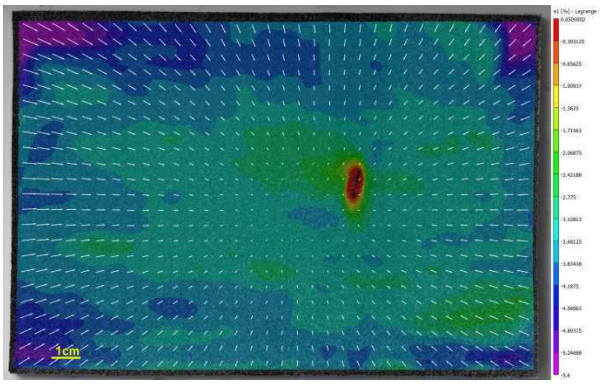
a- Déformation longitudinale ε_{xx} (%)



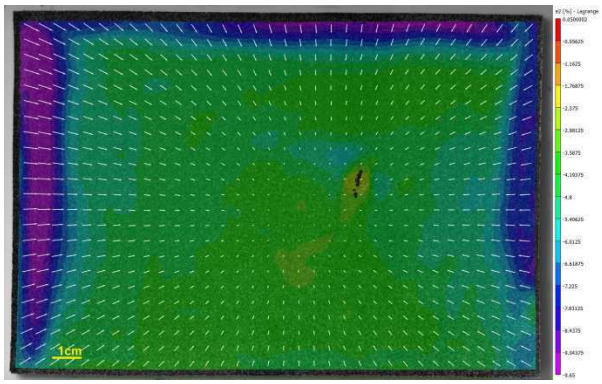
b- Déformation transversale ε_{yy} (%)



c- Déformation de cisaillement ε_{xy} (%)



d- Déformation principale ε_1 (%)



e- Déformation principale ε_2 (%)

Figure IV.45 : Cartographies Vic2D des déformations locales de l'essai CD2-s361 à t = 26h (w = w_{SL})

→ A la fin du séchage :

Tableau IV.7 : Localisation des zones critiques à forte succion imposée (CD2-s361) identifiées à partir de la figure IV. 46.

Essai analysé	**Zones critiques identifiées**		
CD2-s361	*I-CD2-s361*	*II-CD2-s361*	*III-CD2-s361*

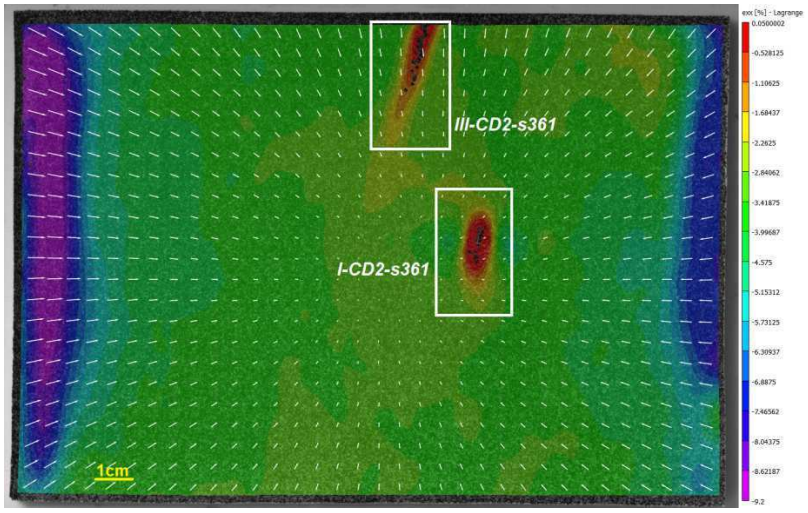
Les cartographies Vic2D des déformations locales obtenues à la fin du séchage mettent en évidence des zones de fissuration, ou susceptibles de développer des fissures. Dans cette partie, nous allons nous intéresser à l'analyse du champ des déformations locales dans ces zones que nous avons répertoriées. L'analyse des mécanismes d'amorçage et de propagation des fissures dans ces zones est traitée dans le chapitre V.

Les zones de fissuration identifiées dans le cas de l'essai CD2-s361 sont encadrées sur les cartographies Vic2D de la figure IV.46 des déformations longitudinale ε_{xx}, transversale ε_{yy} et principale ε_1.

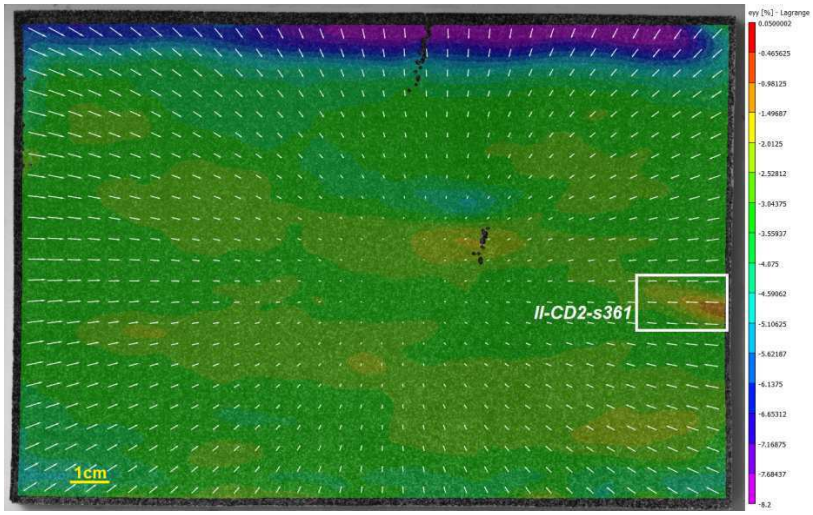
- La cartographie de la déformation longitudinale ε_{xx} (Fig. IV.46 a) montre deux fissures dans les deux zones notées [*I-CD2-s361*] et [*III-CD2-s361*] où l'extension est égale à ε_{xx} = +0.05 %.

- La cartographie de la déformation transversale ε_{yy} (Fig. IV.46 b) montre que la zone [*II-CD2-s361*] est susceptible de développer une fissure.

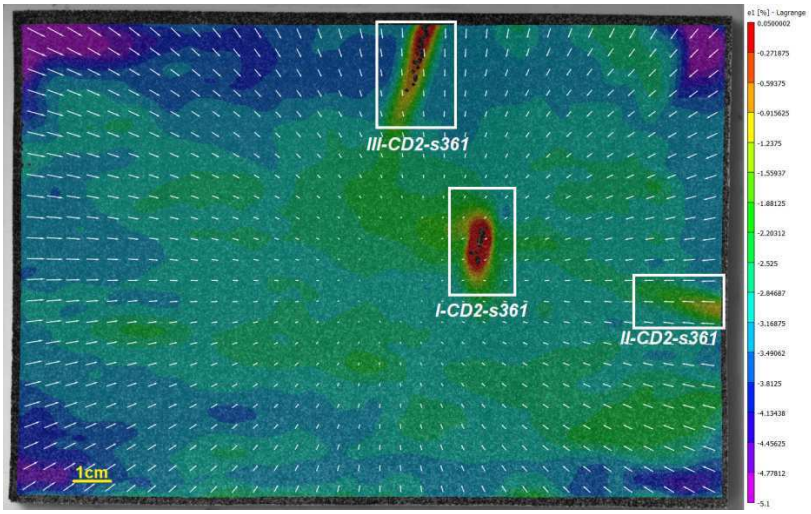
- Les trois zones peuvent être observées sur la cartographie de la déformation principale ε_1 (Fig. IV.46 c).



a- Déformation longitudinale ε_{xx} (%)



b- Déformation transversale ε_{yy} (%)



c- Déformation principale ε_1 (%)

Figure IV.46 : Localisation des zones d'extension ou de fissuration sur les cartographies Vic2D des déformations locales à la fin du séchage contrôlé : cas de l'essai CD2-s361 (t= 165h, w= 2.65%).

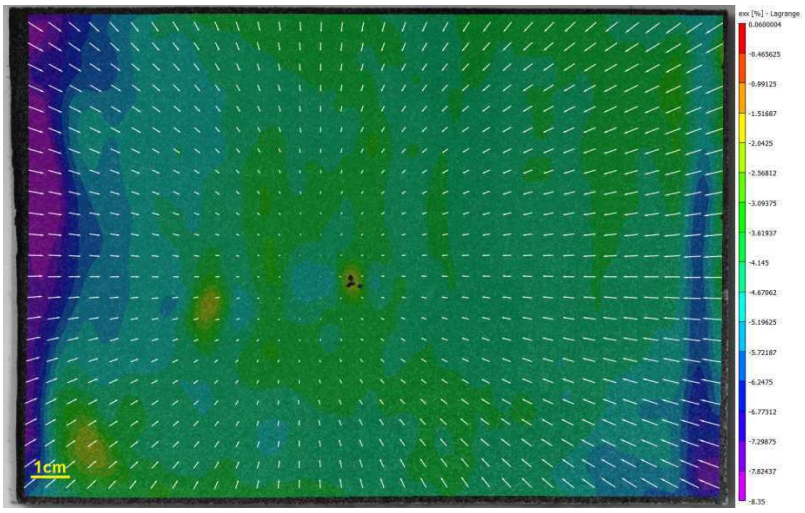
b- Essai à moyenne succion - [CD3-s110] :

→ A la limite de retrait (w = w_{SL}) :

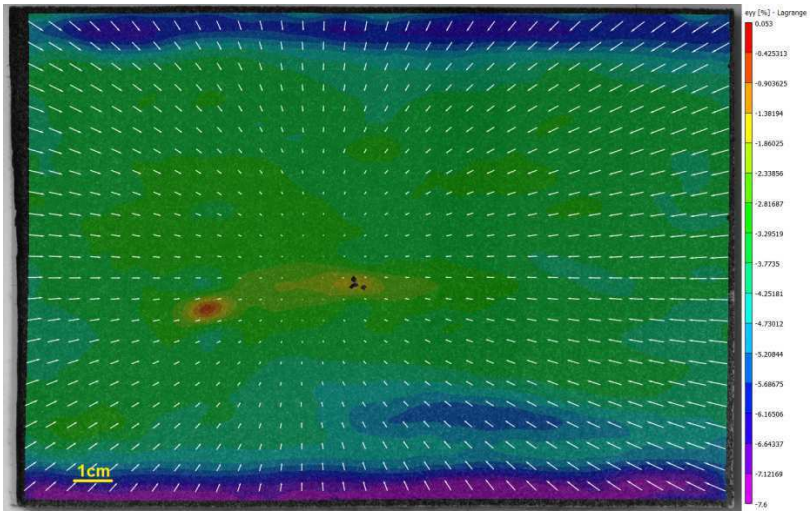
Le champ des déformations locales obtenu à la limite de retrait (w = w_{SL}), dans le cas de l'essai CD3-s110, est représenté par les cartographies Vic2D illustrées sur la figure IV.47.

La déformation longitudinale ε_{xx} (Fig. IV.47 a) varie entre une valeur maximale positive ε_{xx}=+0.06 % et une valeur minimale négative ε_{xx}= -8.35 %. A ce stade de séchage, les résultats montrent une dominance d'une compression sur la totalité de la surface du matériau avec une intensité plus importante aux bords (gauche et droit). Néanmoins, des zones critiques à très faible déformation de compression (entre ε_{xx}= -0.46 et ε_{xx}= -0.99 %) apparaissent. Ces zones sont clairement identifiées sur les cartographies de la déformation transversale ε_{yy} (Fig. IV.47 b) avec une intensité comprise entre une valeur maximale positive ε_{yy}= +0.053 % et une valeur minimale négative ε_{yy}= -7.6 %.

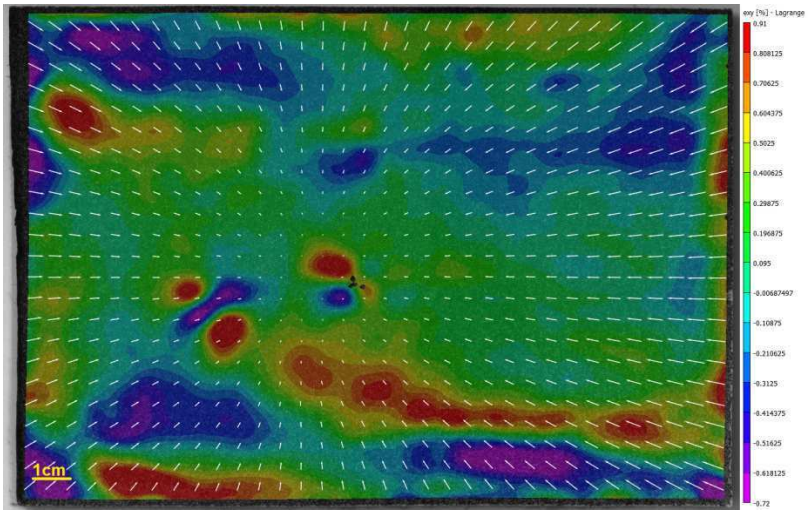
La déformation de cisaillement (Fig. IV.47 c), avec des valeurs comprises entre deux extrémités égales à ε_{xy}= +0.91 % et ε_{xy}= -0.72 %, montre des concentrations au voisinage des zones critiques qui apparaissaient aussi sur les cartographies de ε_{xx} et ε_{yy}.



a- Déformation longitudinale ε_{xx} (%)



b- Déformation transversale ε_{yy} (%)



c- Déformation de cisaillement ε_{xy} (%)

Figure IV.47 : Cartographies Vic2D des déformations locales de l'essai CD3-s110 à t = 44h (w = w_{SL}).

→ A la fin du séchage :

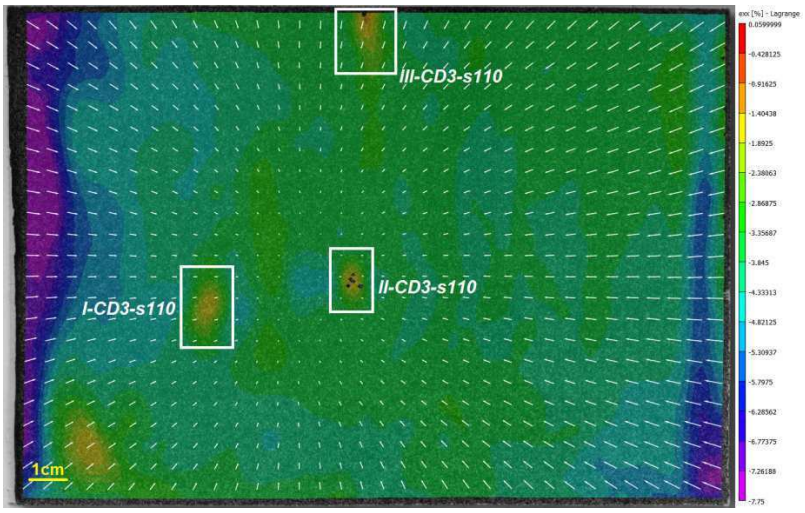
Tableau IV.8 : Localisation des zones critiques à moyenne succion imposée (110 MPa) identifiées à partir de la figure IV. 48.

Essai analysé	**Zones critiques identifiées**		
CD3-s110	*I-CD3-s110*	*II-CD3-s110*	*III-CD3-s110*

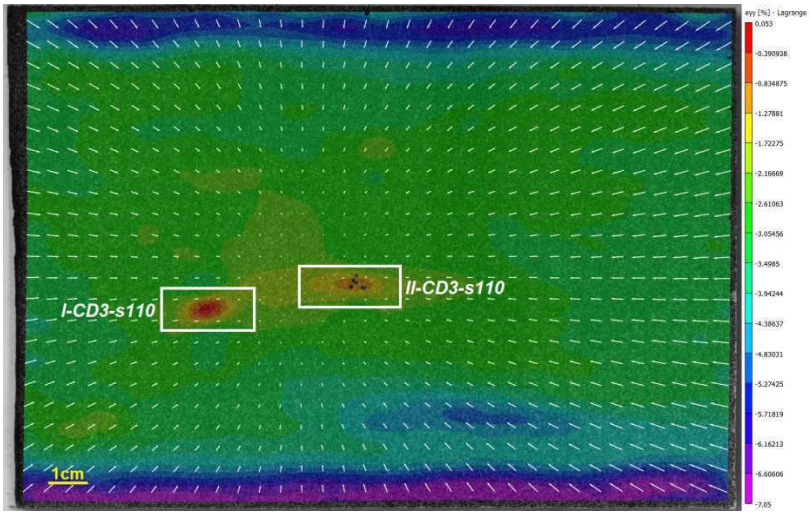
La figure IV.48 présente le champ des déformations longitudinale, transversale et principale obtenues à la fin de l'essai CD3-s110 (t= 162h, w= 1.68%). Les résultats mettent en évidence trois zones critiques notamment avec l'apparition d'une fissure dans une zone d'extension *III-CD3-s110* suivant la déformation longitudinale ε_{xx} (Fig. IV.48 a) dont la valeur maximale positive est de ε_{xx}= +0.059 %.

Les deux zones *I-CD3-s110* et *II-CD3-s110* sont identifiées sur la cartographie de la déformation transversale ε_{yy} (Fig. IV.48 b) où la valeur maximale positive est de ε_{yy}= +0.053 % et la valeur minimale négative est de ε_{yy}= -7.05 %.

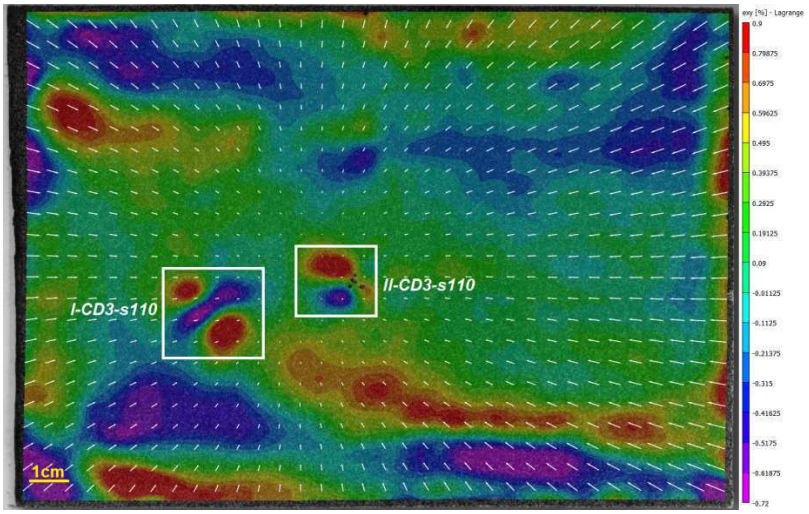
La déformation de cisaillement ε_{xy} (Fig. IV.48 c) comprise entre ε_{xy}= +0.9 % et ε_{xy}= -0.72 % montre également les deux zones critiques *I-CD3-s110* et *II-CD3-s110*.



a- Déformation longitudinale ε_{xx} (%)



b- Déformation transversale ε_{yy} (%)



c- Déformation de cisaillement ε_{xy} (%)

Figure IV.48 : Localisation des zones d'extension ou de fissuration sur les cartographies Vic2D des déformations locales à la fin du séchage contrôlé : cas de l'essai CD3-s110 (t= 162h, w=1.68%).

c- Essai à faible succion - [CD3-s38] :

Tableau IV.9 : Localisation des zones critiques à faible succion imposée (38 MPa) identifiées à partir de la figure IV.49.

Essai analysé	Zones critiques identifiées
CD3-s38	*I-CD3-s38*

La figure IV.49 présente différentes cartographies des déformations locales obtenues à la limite de retrait (Fig. IV.49 a) et à la fin du séchage (Fig. IV.49 b) dans l'essai CD3-s38. Les résultats montrent des valeurs proches dans les deux cas.

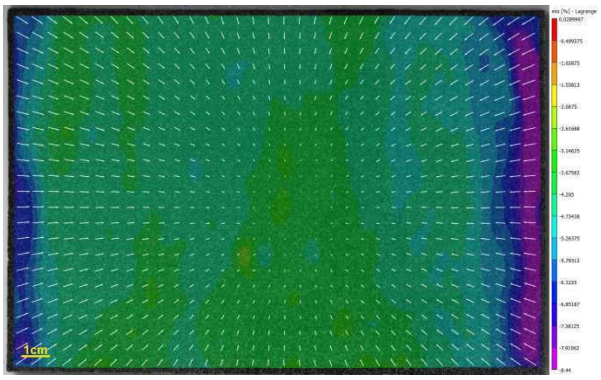
- La déformation longitudinale ε_{xx} est comprise entre ε_{xx}= +0.03 et ε_{xx}= -8.44% avec une domination de la compression sur toute la surface de l'échantillon.

- La déformation transversale ε_{yy} génère une compression du matériau avec des valeurs plus importantes aux bords (supérieur et inférieur) atteignant ε_{yy}= -7.26 %.

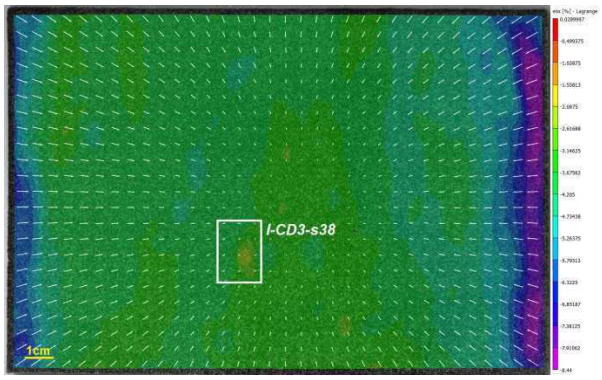
- La déformation de cisaillement ε_{xy} varie en moyenne entre une valeur maximale positive de ε_{xy}= +0.74 % et une valeur minimale négative de ε_{xy}= -1.1 %.

En effet, nous avons également constaté l'absence de zones suceptibles de fissurer les deux autres essais CD1-s38 et CD3-s38.

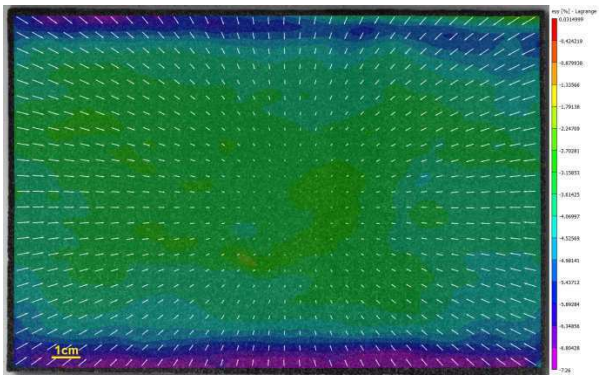
L'analyse de ces résultats a permis d'identifier une zone critique (*I-CD3-s38*) sur les cartographies Vic2D obtenues à la fin du séchage (Fig. IV.49 b). Elle est reportée dans le tableau IV.8. Cette zone fera l'objet d'une analyse dans le chapitre V.



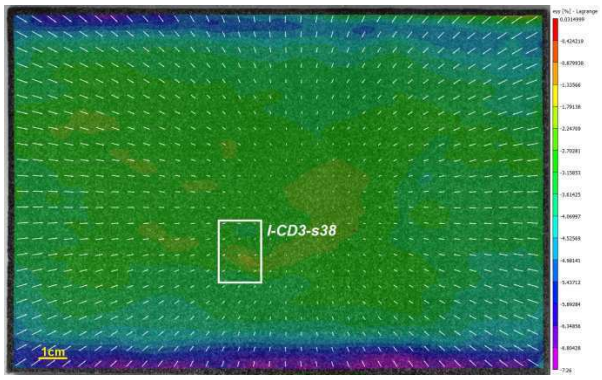
a1- ε_{xx} (%) max= +0.03 / min= -8.44



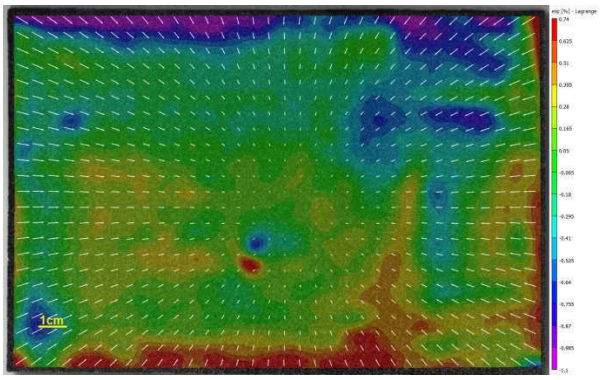
b1- ε_{xx} (%) max= +0.03 / min= -8.44



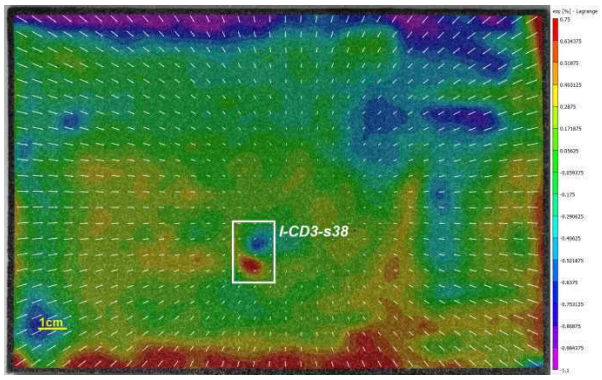
a2- ε_{yy} (%) max= +0.03 / min= -7.26



b2- ε_{yy} (%) max= +0.03 / min= -7.26



a3- ε_{xy} (%) max= +0.74 / min= -1.1



b3- ε_{xy} (%) max= +0.74 / min= -1.1

(a) A la limite de retrait (t = 179h)

(b) A la fin du séchage (t= 381h, w= 2.07%)

Figure IV.49 : Cartographies Vic2D des déformations locales de l'essai CD3-s38.

IV.4.1.2 Distributions des déformations locales dans les zones sélectionnées

Le calcul des distributions permet de suivre l'évolution des déformations locales sur une ligne en fonction du temps.

Nous avons choisi un essai de séchage contrôlé à forte succion (CD2-s361) pour effectuer ce calcul. La première partie concerne des lignes qui ne traversent pas les fissures. La deuxième partie concerne des lignes qui passent par les fissures.

a- Distributions hors zones de fissuration :

La figure IV.50 montre sur une cartographie Vic2D de ε_{xx}, prise à t=80h, les deux lignes horizontale X-X' et transversale Y-Y' de l'étude.

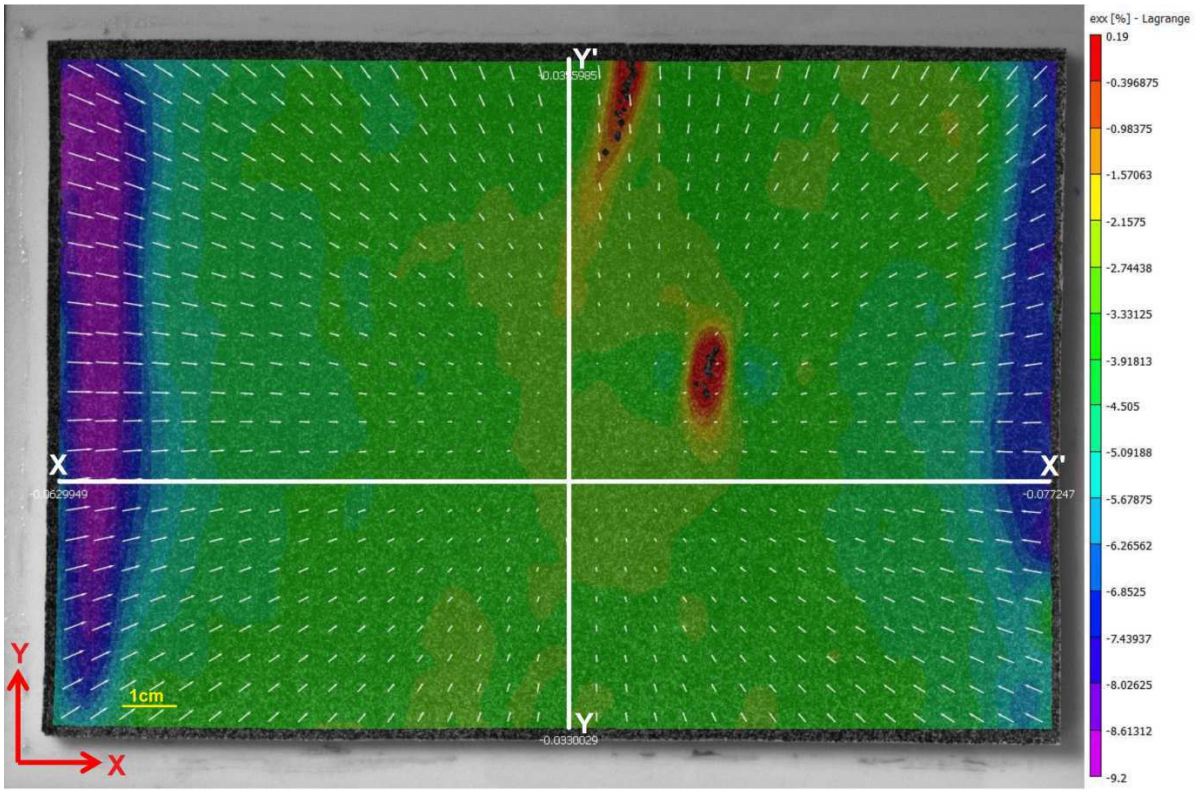


Figure IV.50 : Positions des lignes sélectionnées pour le calcul des distributions de déformations locales - cartographie ε_{xx} cas de l'essai CD2-s361 (t= 80h).

→ Analyse sur la ligne longitudinale X-X'

Les distributions des déformations locales ε_{xx}, ε_{yy} et ε_{xy} calculées sur la ligne X-X' sont représentées sur la figure IV.51. En comparant les distributions des trois déformations sur la même ligne sélectionnée, on constate que généralement ε_{xx} et ε_{yy} sont largement supérieures à ε_{xy}. La symétrie par rapport au centre de l'échantillon est plus au moins observée dans les distributions de ε_{xx} et ε_{yy}.

Avant t=14.5h, ε_{xx} et ε_{yy} augmentent progressivement en compression ($\varepsilon < 0$) sur la majeure partie de la ligne, excepté les zones proches des bords de l'échantillon où elles sont très

larges ($\varepsilon_{xx} \approx$ -10%). Après t=14.5h, ε_{xx} et ε_{yy} croissent brusquement en gardant la même tendance d'évolution de départ sur toute la ligne jusqu'à atteindre leurs valeurs maximales à environ -4% (hors zones proches des bords).

Pour ε_{xy} (Fig. IV.44 c), la tendance d'évolution est similaire à celle décrite pour ε_{xx} et ε_{yy} qui montre une augmentation rapide après t=14.5h. A la fin de séchage, les distributions sont toutes positives.

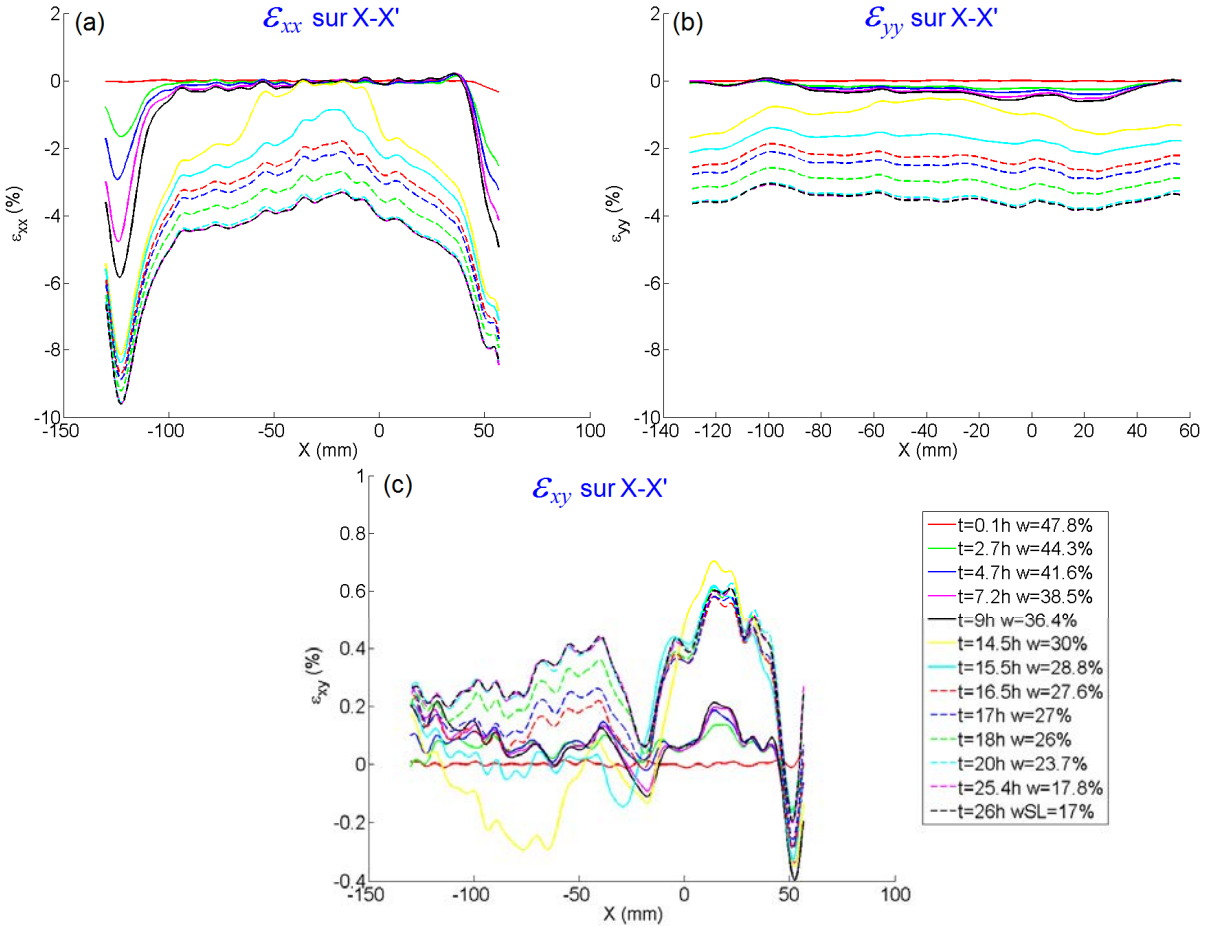


Figure IV.51 : Distributions des déformations locales suivant la ligne X-X' : (a) ε_{xx}, (b) ε_{yy} et (c) ε_{xy} en fonction du temps.

→ Analyse sur la ligne transversale Y-Y'

L'analyse des distributions des déformations locales ε_{xx}, ε_{yy} calculées sur la ligne Y-Y' (Fig. IV. 52 a et b) montre des évolutions proches de celles obtenues sur la ligne X-X'. ε_{xx} et ε_{yy} évoluent progressivement au début du séchage puis augmentent rapidement après t=14.5h. ε_{yy} (Fig. IV. 52 b) atteint des valeurs importantes au niveau des bords ($\varepsilon_{yy} \approx$ -10%).

Sur la figure IV.52 (c), ε_{xy} montre des valeurs supérieures à celles de ε_{xy} sur la ligne X-X'. Les distributions sont comprises entre une valeur maximale positive de ε_{xy}= +1.2% et une valeur minimale négative de ε_{xy}= -0.6% au niveau des bords.

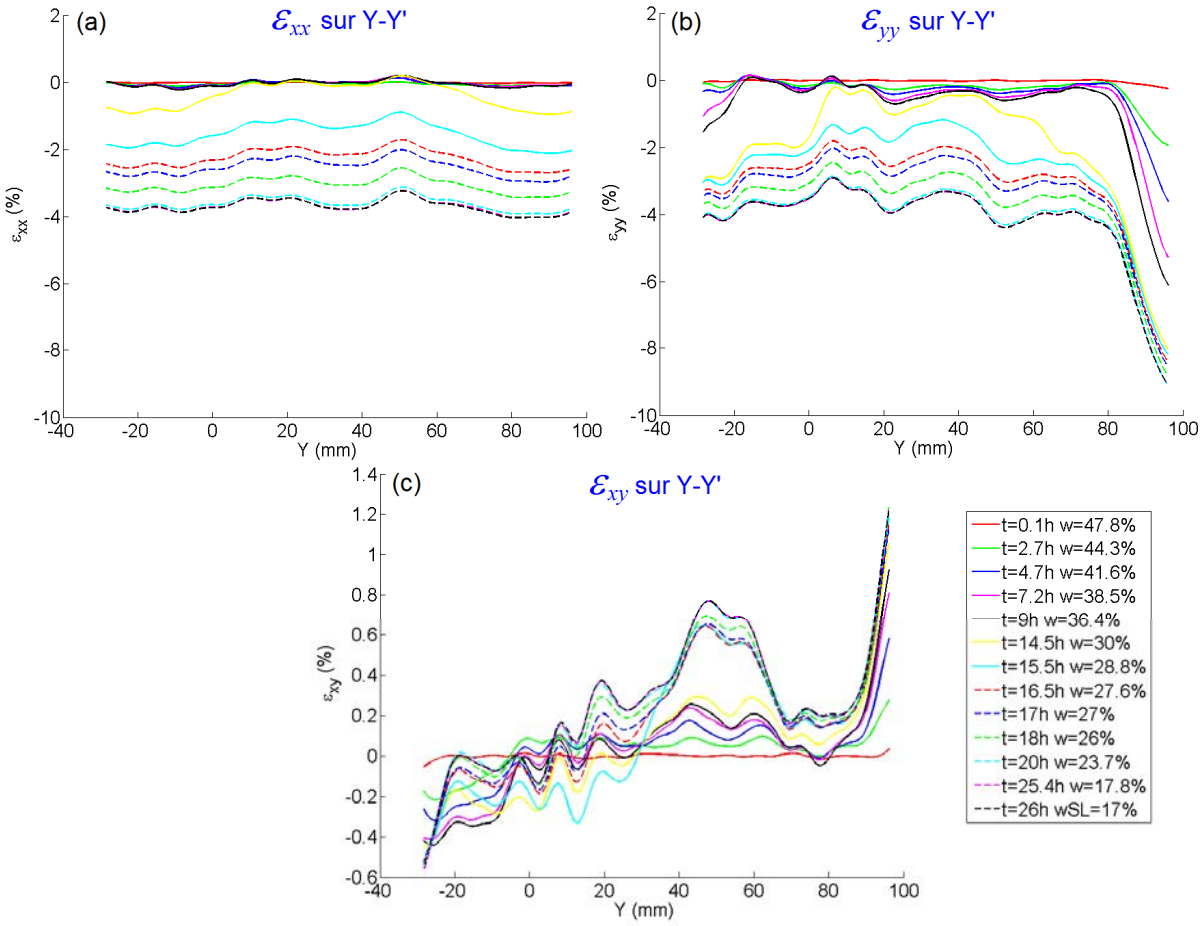


Figure IV.52 : Distributions des déformations locales suivant la ligne Y-Y' : (a) ε_{xx}, (b) ε_{yy} et (c) ε_{xy} en fonction du temps.

b- Distributions traversant les zones de fissuration :

Les deux lignes horizontale X-X' et transversale Y-Y' traversent maintenant la fissure identifiée en zone *I-CD2-s361* (Fig. IV.53). L'objectif est d'analyser les distributions des déformations locales aux voisinages de la fissure.

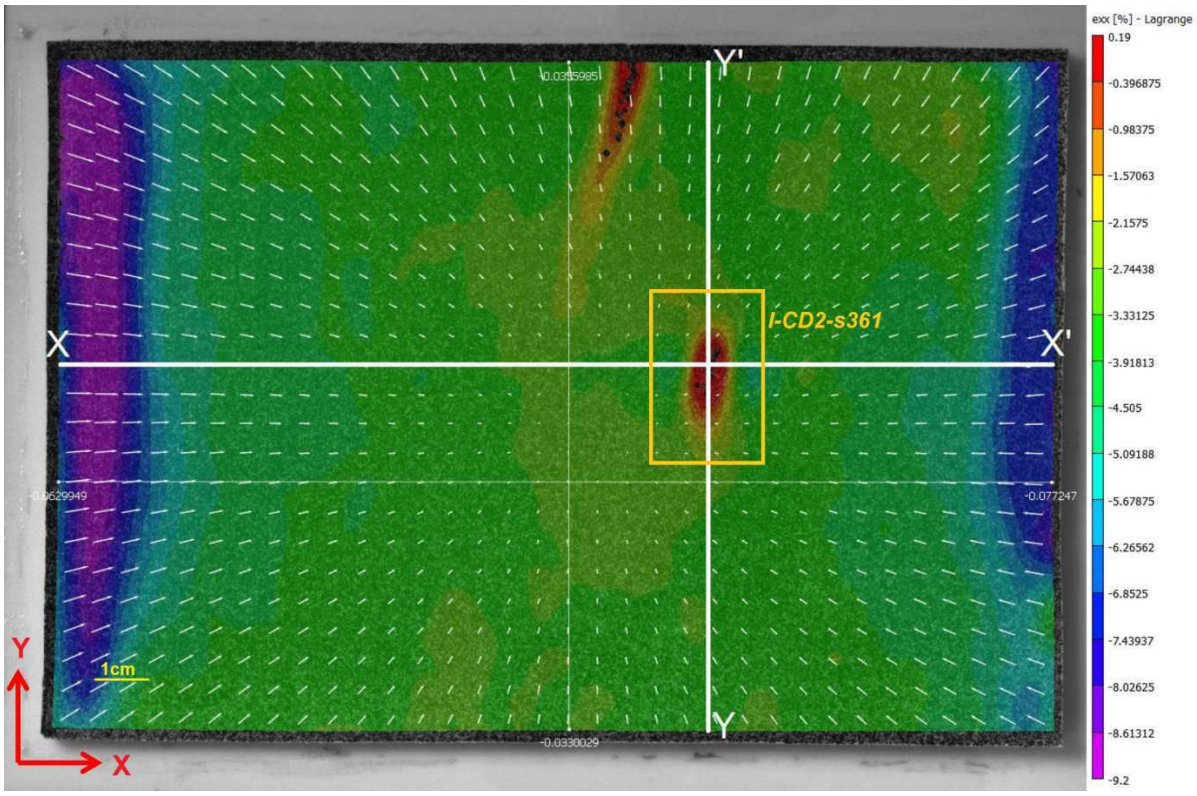


Figure IV.53 : Positions des lignes sélectionnées pour le calcul des distributions de déformations locales - cartographie ε_{xx} cas de l'essai CD2-s361 (t = 80h).

→ Analyse sur la ligne longitudinale X-X'

Les distributions des déformations locales ε_{xx}, ε_{yy} et ε_{xy}, représentées sur la figure IV.54, montrent des évolutions similaires avec celles obtenues précédemment excepté dans la zone de fissuration.

Au niveau de la fissure *I-CD2-s361*, ε_{xx} (Fig. IV.54 a) se développe rapidement en extension avec une valeur plus importante $\varepsilon_{xx} \approx +2\%$ à t= 14.5h. En revanche, ε_{yy} (Fig. IV.54 b) montre uniquement de la compression.

Pour ε_{xy} (Fig. IV.54 c), les distributions sont négatives au niveau de la fissure (max = -0.6%) et positives autour de la fissure (max = +1%).

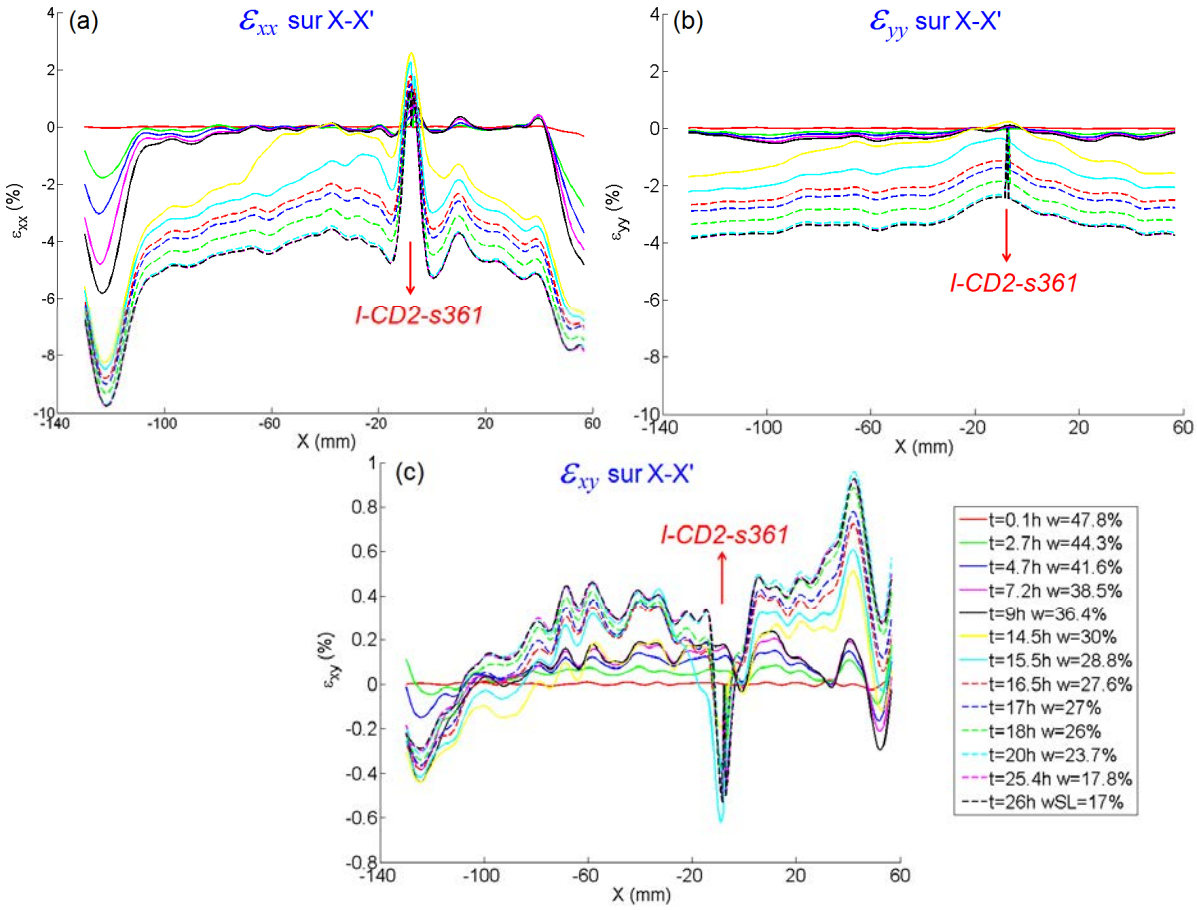


Figure IV.54 : Distributions des déformations locales suivant la ligne X-X' : (a) ε_{xx}, (b) ε_{yy} et (c) ε_{xy} en fonction du temps.

→ Analyse sur la ligne transversale Y-Y'

La figure IV.55 montre que les distributions de ε_{xx}, ε_{yy} et ε_{xy} sont proches de celles calculées sur la ligne X-X', présentées ci-dessus, notamment au voisinage de la fissure *I-CD2-s361*.

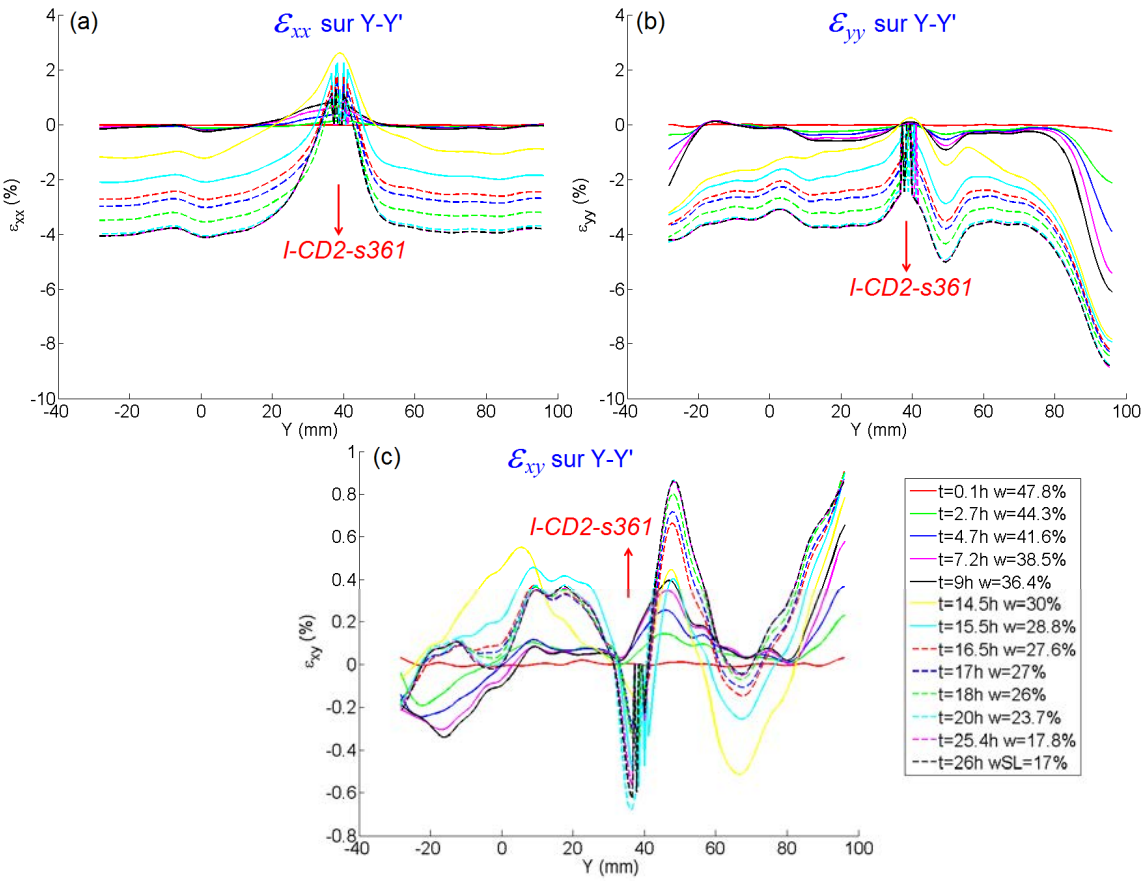


Figure IV.55 : Distributions des déformations locales suivant la ligne Y-Y' : (a) ε_{xx}, (b) ε_{yy} et (c) ε_{xy} en fonction du temps.

IV.4.1.3 Calcul local par les déformation principales

Les résultats de la CIN permettent d'effectuer un calcul local donnant des cartographies des directions principales au moyen du programme élaboré par Wei (2014) décrit en annexe 1.1.

Le but de calcul est d'identifier les différents mécanismes de fissuration qui peuvent se développer dans le matériau sous dessiccation. Cette partie est abordée plus profondément dans le chapitre V.

La figure IV.56 présente le résultat du calcul local obtenu dans la zone de fissure *I-CD2-s361*. La figure IV.56 (a) montre la cartographie des directions principales. Les vecteurs bleus désignent des déformations principales en compression, les vecteurs rouges indiquent des déformations principales en extension. La longueur de ces vecteurs représente l'intensité des déformations principales.

Le résultat montre d'une part une dominance de la compression due au retrait dans toute la zone. D'autre part, on peut observer une extension longitudinale (suivant X) à proximité de la fissure. La direction est perpendiculaire à l'orientation de la fissure (suivant Y). Ainsi, à partir de ce résultat, on peut identifier un mécanisme de fissuration par le mode I de traction.

Ce sera par cette méthode que l'identification du mode de fissuration sera abordée en chapitre V.

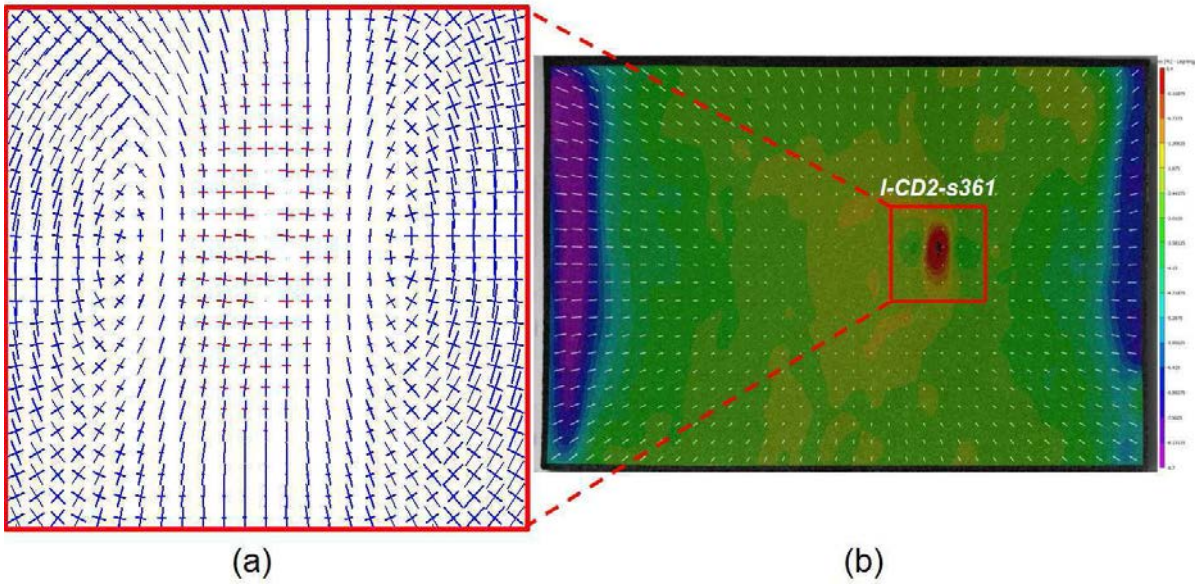


Figure IV.56 : Calcul par les déformations locales : (a) cartographie obtenue après calcul dans la zone *I-CD2-s361*, (b) cartographie ε_{xx} cas de l'essai CD2-s361 (t= 16.5h, w= 27.6%).

IV.4.2. Evolution des déformations locales sous séchage libre

La même démarche est adoptée dans l'analyse des déformations locales sur chemin de séchage libre. Nous avons choisi l'essai FD-pers (support en perspex, mouchetis très dense, T= 23°C et HR= 55%).

IV.4.2.1 Cartographies Vic2D des déformations locales

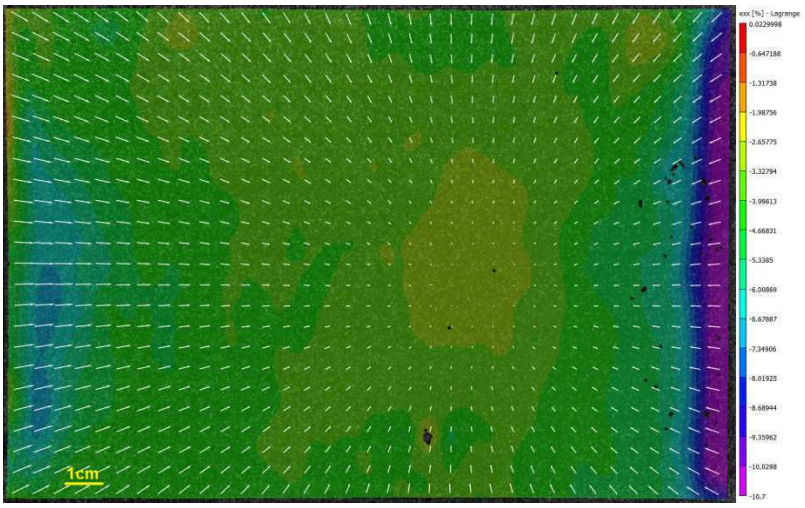
Les déformations locales obtenues sous dessiccation libre sont présentées dans deux états, à la limite de retrait et à la fin du séchage.

→ A la limite de retrait ($w = w_{SL}$) :

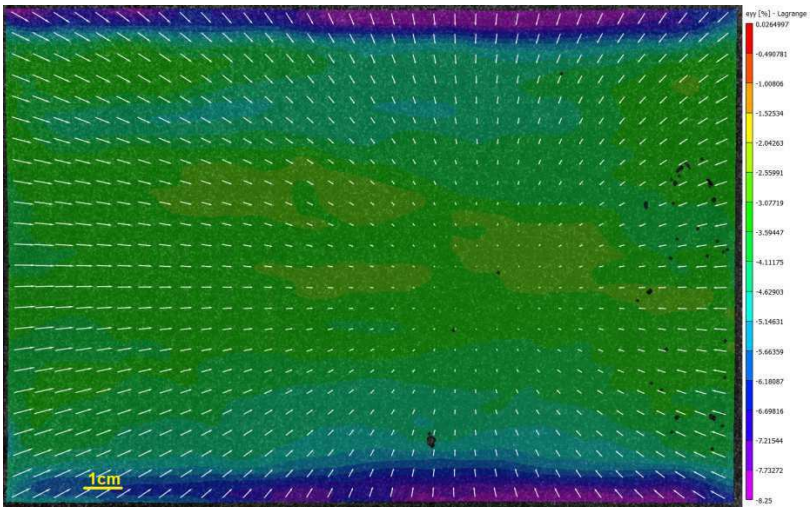
Les déformations locales, longitudinale ε_{xx}, transversale ε_{yy} et de cisaillement ε_{xy} de l'essai FD-pers sont présentées sur la figure IV.57.

- La déformation longitudinale locale (Fig. IV.57 a) est comprise entre une valeur maximale positive ε_{xx}= +0.02% et une valeur minimale négative ε_{xx}= -10.7%. Il s'agit d'une dominance de la compression dans cette direction sur la majorité de la surface de l'échantillon avec une concentration aux bords. La même tendance peut être observée sur la cartographie de la déformation transversale (Fig. IV.57 b) avec une intensité comprise entre une valeur maximale positive ε_{yy}= +0.026 % et une valeur minimale négative ε_{yy}= -8.25%.

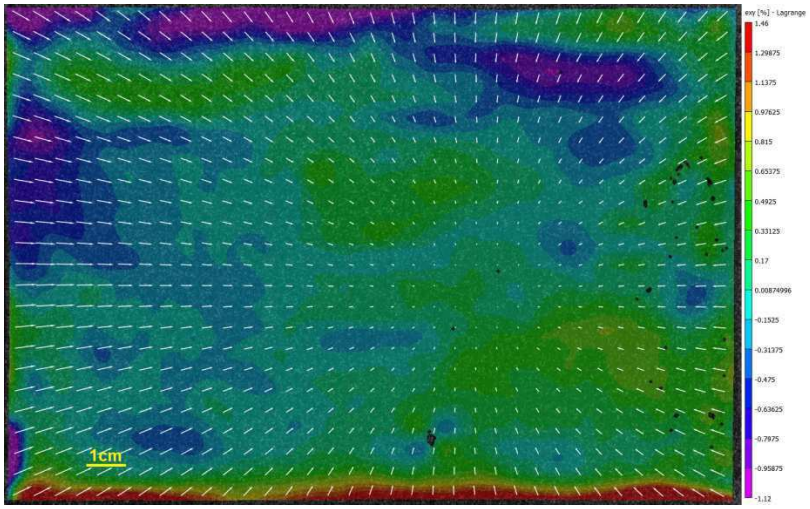
- La déformation de cisaillement (Fig. IV.57 c) montre des valeurs comprises entre deux extrémités égales à ε_{xy}= +1.46 % et ε_{xy}= -1.12 %.



a- Déformation longitudinale ε_{xx} (%)



b- Déformation transversale ε_{yy} (%)



c- Déformation de cisaillement ε_{xy} (%)

Figure IV.57 : Cartographies Vic2D des déformations locales de l'essai FD-pers à t = 31h (w = w_{SL}).

→ A la fin du séchage :

Les déformations ε_{xx}, ε_{yy} et ε_{xy} obtenues à la fin de l'essai FD-pers (t_{fin}= 164h) sont illustrées sur la figure IV.58.

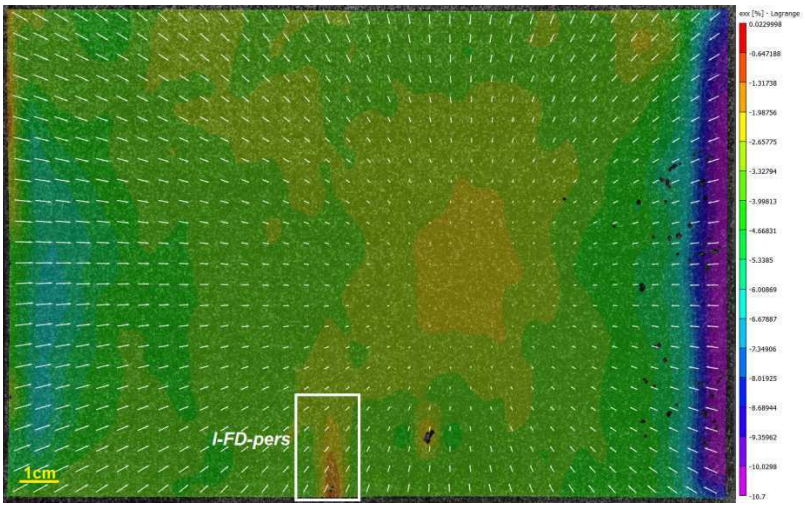
Les résultats montrent que les valeurs, maximale positive et minimale négative, atteintes à la limite de retrait sont maintenues à la fin du séchage. En effet, cette variation met en évidence deux zones critiques qui ont mené à l'apparition de deux fissures. La première zone *I-FD-pers* peut être observée sur la cartographie de la déformation ε_{xx} (Fig. IV.58 a) tandis que la deuxième zone *II-FD-pers* est identifiée suivant la déformation ε_{yy} (Fig. IV.58 b). En revanche, les deux zones sont caractérisées par une déformation en extension ($\varepsilon > 0$ en rouge) où la valeur maximale positive est de ε_{xx}= +0.023% pour la première et de ε_{yy}= +0.026% pour la deuxième.

Les valeurs de la déformation de cisaillement ε_{xy} (Fig. IV.49 c) sont comprises entre les deux limites ε_{xy}= +1.48% et ε_{xy}= -1.16%.

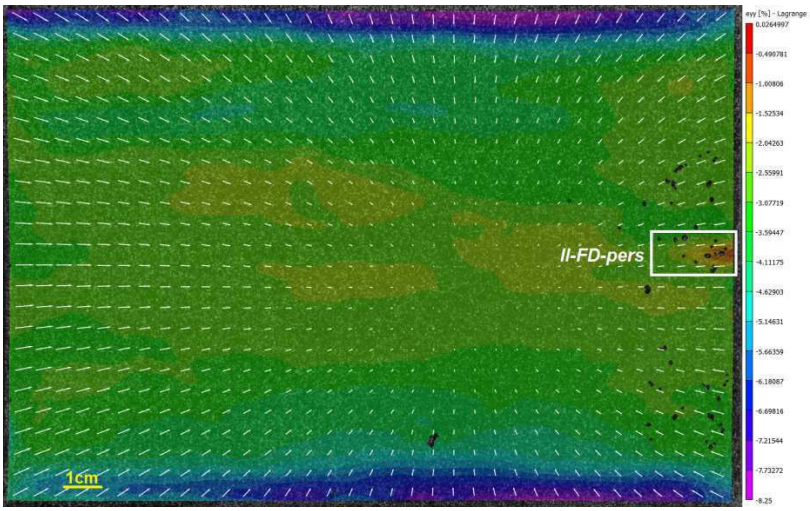
Le tableau IV.10 rappelle les zones identifiées comme critiques où le développement des fissures sur un chemin de séchage libre est possible. Cet aspect fera l'objet du chapitre V.

Tableau IV.10 : Localisation des zones critiques sur chemins de dessiccation libre.

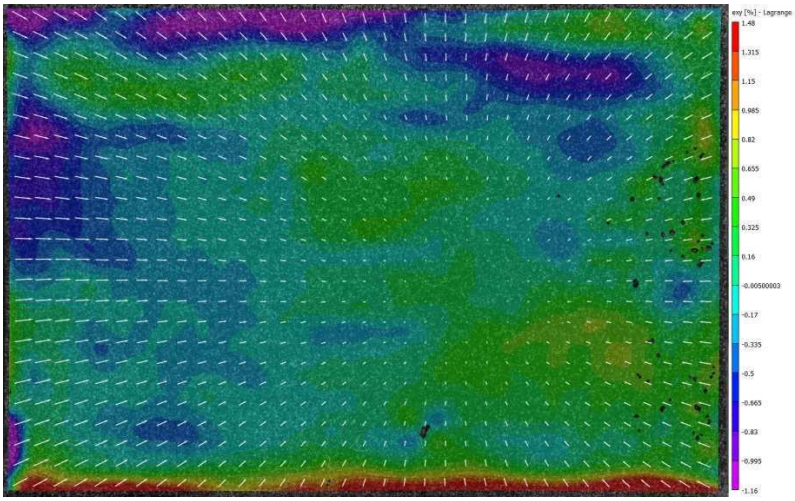
Essai analysé	**Zones critiques identifiées**	
FD-pers	*I-FD-pers*	*II-FD-pers*



a- Déformation longitudinale ε_{xx} (%)



b- Déformation transversale ε_{yy} (%)



c- Déformation de cisaillement ε_{xy} (%)

Figure IV.58 : Localisation des zones d'extension ou de fissuration sur les cartographies Vic2D des déformations locales à la fin du séchage libre : cas de l'essai FD-pers (t_{fin}= 164h, w= 1.35%).

IV.4.2.2 Distributions des déformations locales dans les zones sélectionnées

Les lignes horizontale X-X' et transversale Y-Y' sur lesquelles le calcul des distributions est effectué sont indiquées sur la cartographie Vic2D de ε_{xx} prise à t=42h, w= 7.63% (Fig. IV.59).

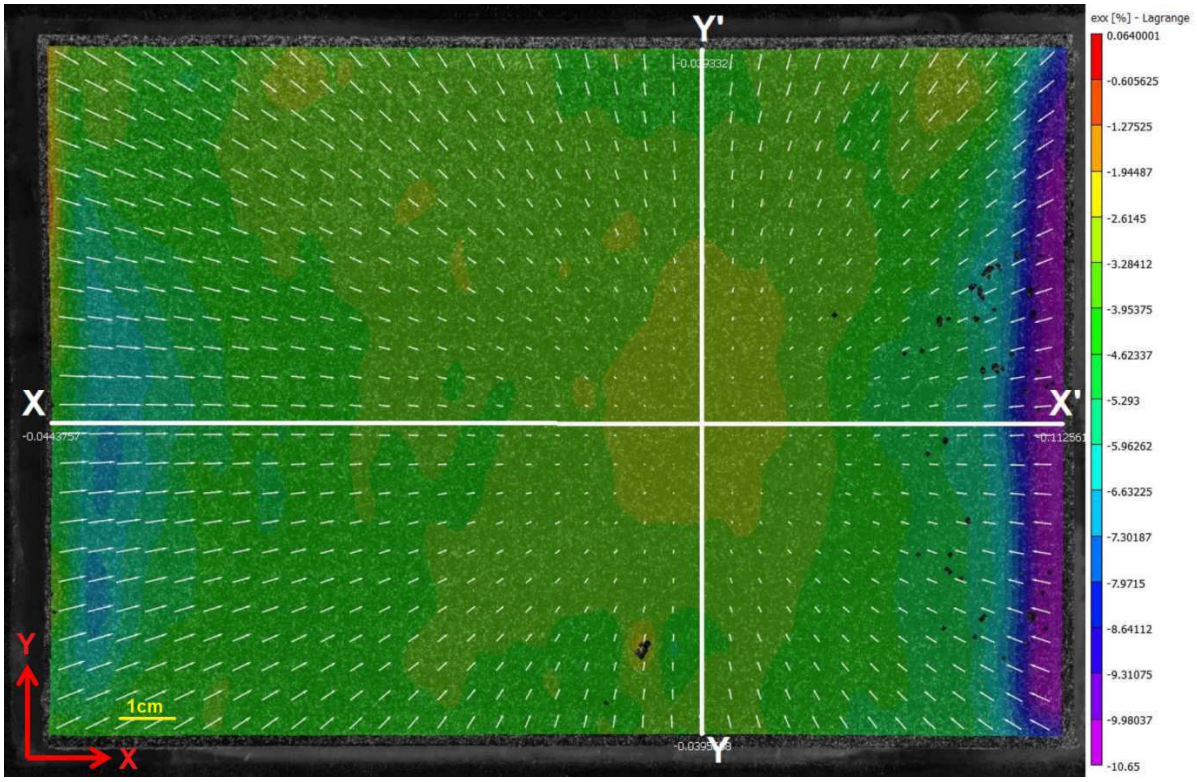


Figure IV.59 : Positions des lignes sélectionnées pour le calcul des distributions de déformations locales - cartographie ε_{xx} cas de l'essai FD-pers (t= 42h, w= 7.63%).

→ Analyse sur la ligne longitudinale X-X'

Les distributions des déformations locales ε_{xx}, ε_{yy} et ε_{xy} sont représentées sur la figure IV.60. Les courbes, en dehors des zones des bords, montrent des tendances d'évolution proches suivant ε_{xx} et ε_{yy} (Fig. IV.60 a et b) en compression, avec une augmentation progressive au début du séchage puis rapide après t=18h. ε_{xx} est très large au niveau des zones proches des bords de l'échantillon pouvant atteindre ε_{xx}= -12% (Fig. IV.60 a).

Sur la figure IV.60 (c), ε_{xy} montre des valeurs faibles comparées à celles de ε_{xx} et ε_{yy}. Les distributions sont comprises entre une valeur maximale positive de ε_{xy}= +0.2% et une valeur minimale négative de ε_{xy}= -0.4%.

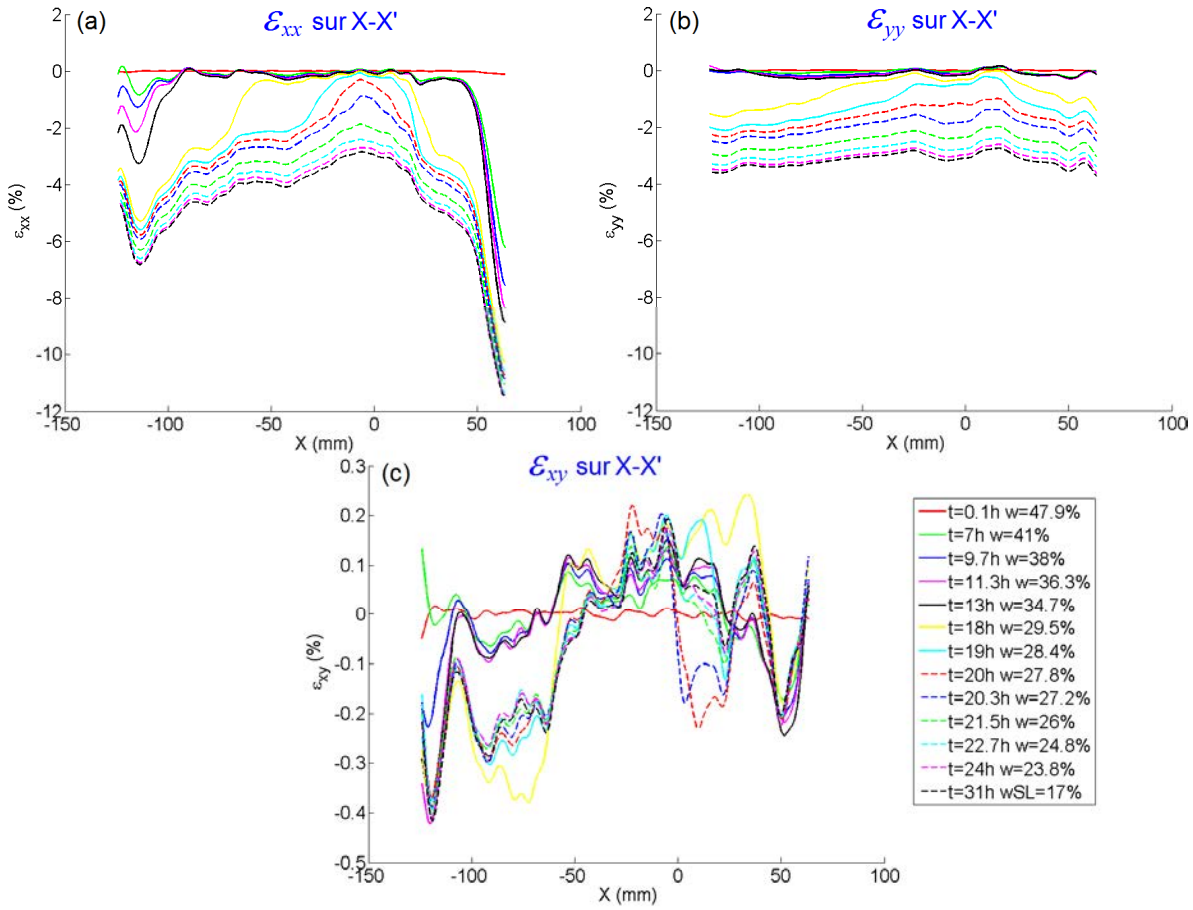


Figure IV.60 : Distributions des déformations locales suivant la ligne X-X' : (a) ε_{xx}, (b) ε_{yy} et (c) ε_{xy} en fonction du temps.

→ Analyse sur la ligne transversale Y-Y'

Les distributions présentées sur la figure IV.61 montrent des évolutions proches entre ε_{xx} (Fig. IV.61 a) et ε_{yy} (Fig. IV.61 b) en dehors des zones des bords.

Pour ε_{xy} (Fig. IV.61 c), les distributions atteignent des valeurs importantes à proximité des bords ($\varepsilon_{xy} \approx +2\%$ et $\varepsilon_{xy} \approx -1\%$).

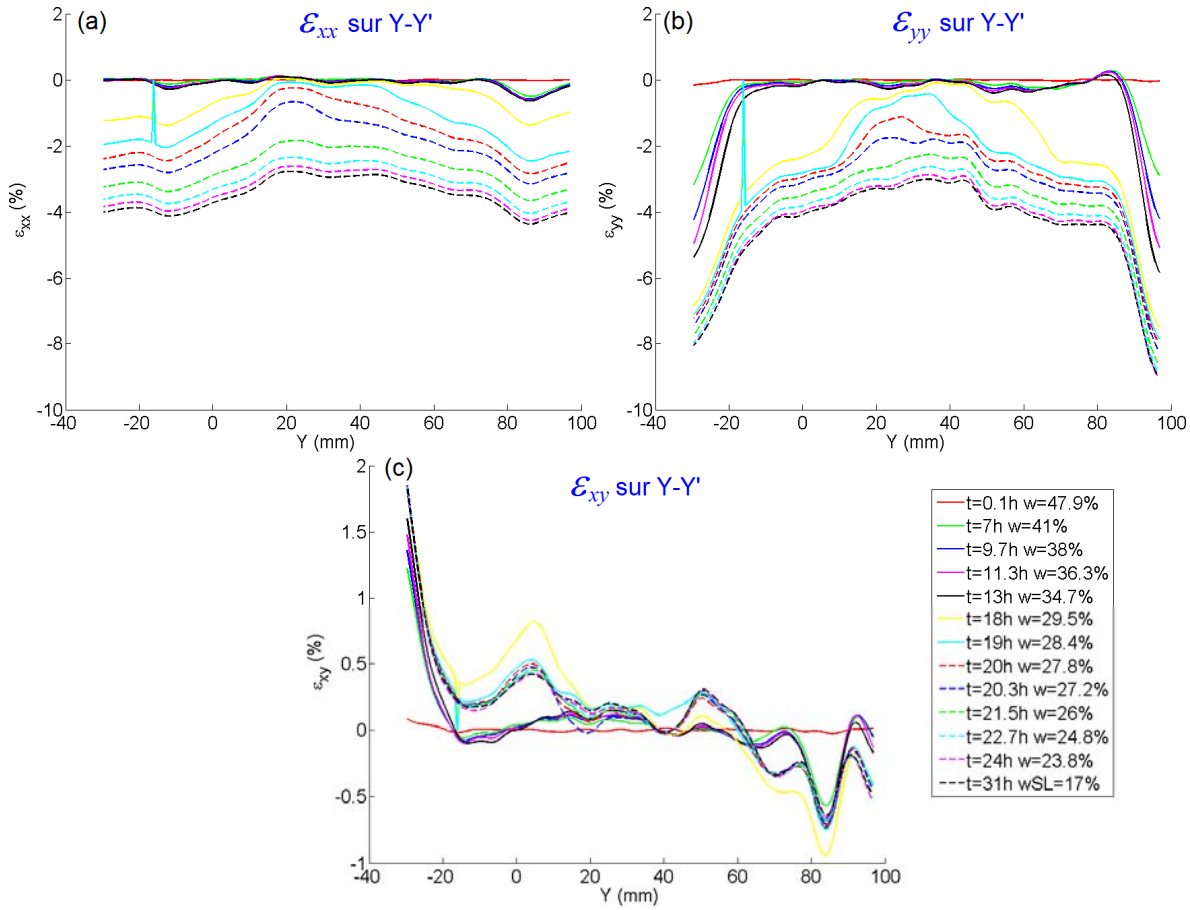


Figure IV.61 : Distributions des déformations locales suivant la ligne X-X' : (a) ε_{xx}, (b) ε_{yy} et (c) ε_{xy} en fonction du temps.

Dans cette partie, nous avons analysé les déformations locales obtenues par la CIN sur différents chemins de séchage libre et contrôlé.

- Les cartographies Vic2D des déformations locales ont permis de suivre leurs variations au cours du séchage en fonction du temps. Des zones critiques en extension, qui favorisent la rupture du matériau, ont également pu être identifiées.

- A travers le calcul des distributions, l'évolution des déformations locales a été caractérisée en fonction du temps le long d'une ligne longitudinale X-X' et transversale Y-Y'.

- Enfin, un calcul local basé sur la représentation des directions principales montre la possibilité d'identifier le mode de fissuration pouvant se développer au cours du séchage.

Le chapitre V sera consacré à l'étude de la fissuration.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité 4 volets permettant d'analyser le comportement de l'argile sous dessiccation libre et contrôlée.

Premier volet :

Cette partie concerne la caractérisation de la courbe de rétention et des variations des paramètres hydriques. Les conclusions sont les suivantes :

- A partir des variations de la teneur en eau de l'échantillon en fonction du temps, nous avons présenté les chemins hydriques correspondants aux conditions des essais. En dessiccation contrôlée, et en fonction de la succion imposée par le biais de l'humidité relative générée par la solution saline saturée, l'évolution de la teneur en eau est très rapide à forte succion imposée puis devient très lente à mesure que la succion imposée diminue. En séchage libre, la décroissance de la teneur en eau s'effectue d'une manière rapide comparable à celle du cas à forte succion imposée.

- La courbe de retrait représentée par les variations de l'indice des vides et du degré de saturation en fonction de la teneur en eau a été définie. Elle permet l'identification du comportement hydrique de l'argile notamment par ses paramètres de la limite de retrait w_{SL}=17%, et d'indice des vides de retrait e_{SL}=0.45.

- Enfin, nous avons présenté la courbe de rétention d'eau permettant de déterminer la succion globale de l'argile en fonction de sa teneur en eau au cours du séchage. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur les résultats expérimentaux de Wei (2014) et Indarto (1991) cité dans Taibi (1994). La succion est inversement proportionnelle à la teneur en eau et s'accentue lorsque cette dernière atteint des valeurs très faibles à la fin du séchage.

Deuxième volet :

Cette partie est focalisée sur le phénomène de retrait, sur chemins de séchage, à l'échelle globale et à l'échelle locale. Les conclusions sont les suivantes :

- La revue de littérature a permis d'introduire le phénomène de retrait. Ce dernier s'opère par le séchage de la surface supérieure de l'échantillon dans un premier temps. L'activation rapide de la déformation verticale dès le début de séchage est identifiée. La méthode de calcul utilisée pour l'estimation de la déformation de retrait à partir de la déformation volumique a été également exposée. La teneur en eau dans l'échantillon est homogène au cours du séchage.

- A l'échelle globale de l'échantillon, nous avons en premier lieu estimé les déformations dans les trois directions (X, Y et Z) en considérant des hypothèses fortes. Ce qui nous a permis de caractériser le retrait. Sous dessiccation contrôlée, un effet de la succion globale sur la cinétique du retrait a été mis en évidence. Plus la succion est élevée, plus le retrait est rapide. Sous dessiccation libre, les résultats ont montré que les conditions

d'essai (type de support et mouchetis appliqué) n'affectent pas d'une manière sensible l'évolution des déformations.

- A l'échelle locale, l'estimation de la déformation de retrait locale a permis de calculer les deux composantes des déformations locales (la composante mécanique et la composante du retrait), dans les trois directions (X, Y et Z).

Troisième volet :

Ce volet aborde une discussion sur l'estimation de la succion locale.

- Partant de l'hypothèse que la teneur en eau globale correspond à la teneur en eau locale, nous avons estimé la déformation verticale locale sur différents chemins hydriques. Cette méthode a permis d'effectuer un calcul de la succion locale, et de proposer une distribution possible de la succion locale en dehors des zones très proches des bords.

- Dans le cas des essais sous dessiccation contrôlée, la succion locale obtenue à la fin du séchage n'est pas égale à la succion globale imposée quelque soit le chemin hydrique. L'équilibre par phase vapeur, entre la solution saline saturée et l'eau présente dans l'échantillon, n'est pas atteint. Ceci est dû à la taille importante de l'échantillon, et l'arrêt des transferts d'eau par phase vapeur à la fin du séchage en raison de la désaturation de l'argile.

Quatrième volet :

Dans cette partie, nous avons analysé les déformations locales calculées par la CIN sur différents chemins de séchage libre et contrôlé.

- Les cartographies Vic2D établies pour les déformations locales ont permis d'une part, de suivre leur évolution au cours du séchage, et d'autre part, d'identifier les zones critiques en extension favorables à l'amorçage des fissures. Un calcul de distributions a été effectué sur ces cartographies permettant d'étudier, en fonction du temps, les variations des déformations locales sur une ligne longitudinale, puis une ligne transversale de l'échantillon.

- Une méthode de calcul local a été présentée. Cette méthode, basée sur le calcul des directions principales permet l'identification des modes de fissuration.

Chapitre V

Identification des mécanismes de fissuration sous différentes sollicitations

Chapitre V. Identification des mécanismes de fissuration sous différentes sollicitations

Sommaire :

Introduction……..300

V.1. Fissuration sur chemin de séchage……..301

V.1.1. Dessiccation contrôlée à succion imposée……..301

V.1.2. Séchage libre……323

V.1.3. Discussion……325

V.2. Poutrelles sous traction indirecte par flexion……334

V.2.1. Analyse du comportement global……...334

V.2.2. Identification du comportement local par la CIN (Vic2D)……340

V.2.3. Comparaison des résultats - Discussion……...349

V.3. Discussion……355

V.3.1. Notion de la déformation critique……...355

V.3.2. Propagation du réseau de fissures - Influence de la succion locale……360

Conclusion……363

Introduction

L'objectif de ce chapitre est de tenter d'identifier les mécanismes de rupture de l'argile soumise à différentes sollicitations hydrique et mécanique.

Le ***premier volet*** concerne la fissuration sur chemin de séchage. Il s'agit de traiter les zones critiques obtenues par l'analyse des déformations locales via la CIN sur les différents chemins de dessiccation libre et contrôlée présentés dans le chapitre IV (section IV.4) :

- Sous dessiccation contrôlée, l'analyse de la fissuration est réalisée sur les chemins effectués à faible (38 MPa), moyenne (110 MPa) et forte (361 MPa) succion imposée.

- Sous séchage libre, le traitement est effectué sous les conditions hydriques ambiantes (T= 23°C, HR= 55%).

Le ***deuxième volet*** est dédié à l'identification de la fissuration sous traction par flexion de poutrelles d'argile sous différentes succions. Plusieurs essais ont été effectués au moyen d'un dispositif expérimental de traction indirecte par flexion. Cette partie comporte :

- une analyse du comportement global régissant la poutrelle soumise à la flexion,

- la détermination des champs de déformations locales par la corrélation d'images,

- l'identification du mode de fissuration et l'influence de la succion initiale appliquée aux poutrelles.

Le ***troisième volet*** présente une discussion orientée sur la notion de déformation critique qui provoque l'amorçage de la fissuration. La propagation du réseau de fissures et l'influence de la succion locale induite, sur les différents chemins de séchage, est également abordée.

V.1. Fissuration sur chemin de séchage

Pour l'identification des mécanismes de fissuration sur chemin de séchage, nous présentons une analyse en deux temps. D'abord une investigation sous dessiccation contrôlée, puis sous séchage libre.

V.1.1. Dessiccation contrôlée à succion imposée

Le phénomène de fissuration au cours du séchage, sur les différents chemins de dessiccation contrôlée, est abordé ici pour chaque niveau de succion globale imposée.

Les caractéristiques hydriques des essais choisis en termes de température, humidité relative et succion imposée sont reportées dans le tableau V.1.

Tableau V.1 : Caractéristiques hydriques des essais de dessiccation contrôlée choisis.

Essais	Succion imposée moyenne s_{glob} (MPa)	Température moyenne T (°C)	Humidité relative moyenne HR (%)
CD3-s38	38	25.7	75.6
CD3-s110	111	26	44.7
CD2-s361	362	20.7	6.9

V.1.1.1 Faible succion (s_{glob} = 38 MPa)

A faible succion imposée, nous n'avons pas observé de zones particulières, avec concentration de la déformation en extension, ni de fissuration sur l'ensemble des échantillons. Cependant, dans le cas de l'essai CD3-s38, une région met en évidence un phénomène de changement de signe (positif → négatif) dans la déformation.

La figure V.1 présente la cartographie Vic2D de la déformation longitudinale ε_{xx} obtenue dans CD3-s38 après t= 87.7h (w= 28.8%) de séchage. La région présentant le changement de signe est précisée par la zone encadrée *I-CD3-s38*.

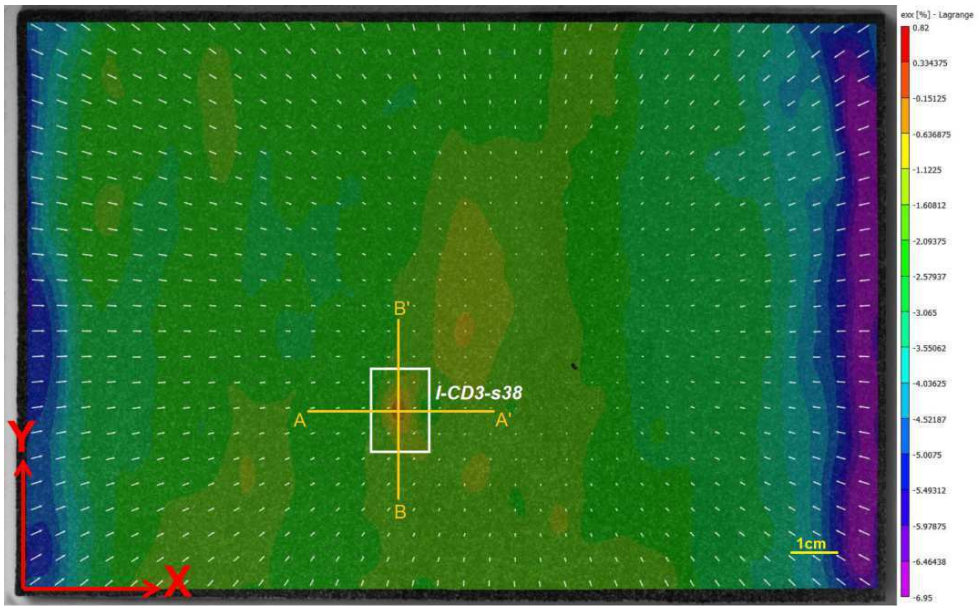


Figure V.1 : Déformation longitudinale ε_{xx} à t= 87.7h (w= 28.8%) - cas de l'essai CD3-s38.

Dans le but de mieux observer les caractéristiques des déformations locales, en particulier dans la zone *I-CD3-s38* (Fig. V.1), deux lignes ont été définies. Une ligne longitudinale A-A' et une ligne transversale B-B', le croisement est localisé au centre de la zone.

L'analyse comporte trois étapes :

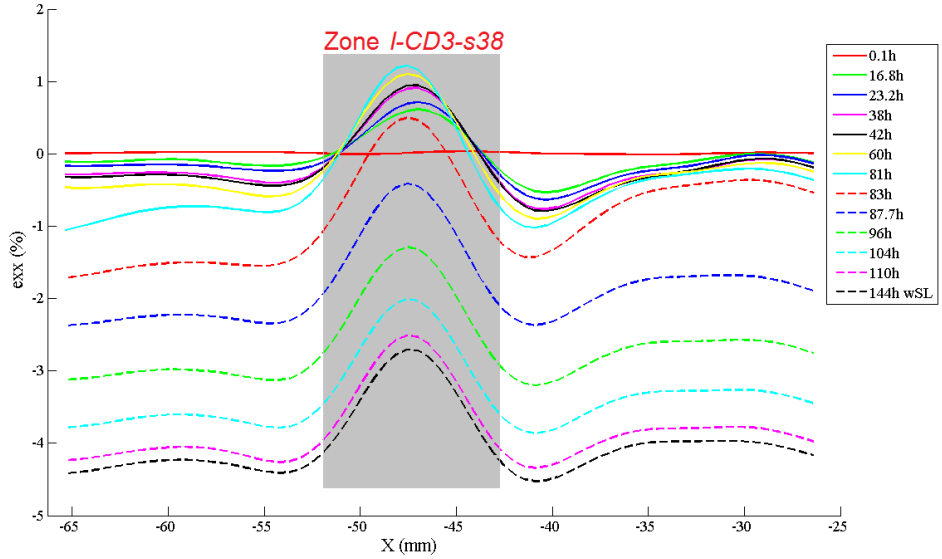
a - Interprétation des distributions locales :

Les distributions des déformations locales obtenues suivant les deux lignes A-A' et B-B' (Fig. IV.1) sont représentées sur la figure V.2 à différents temps de séchage. Notons que la déformation transversale ε_{yy} est analysée suivant la ligne B-B', tandis que les déformations longitudinale ε_{xx} et de cisaillement ε_{xy} sont tracées suivant la ligne A-A'.

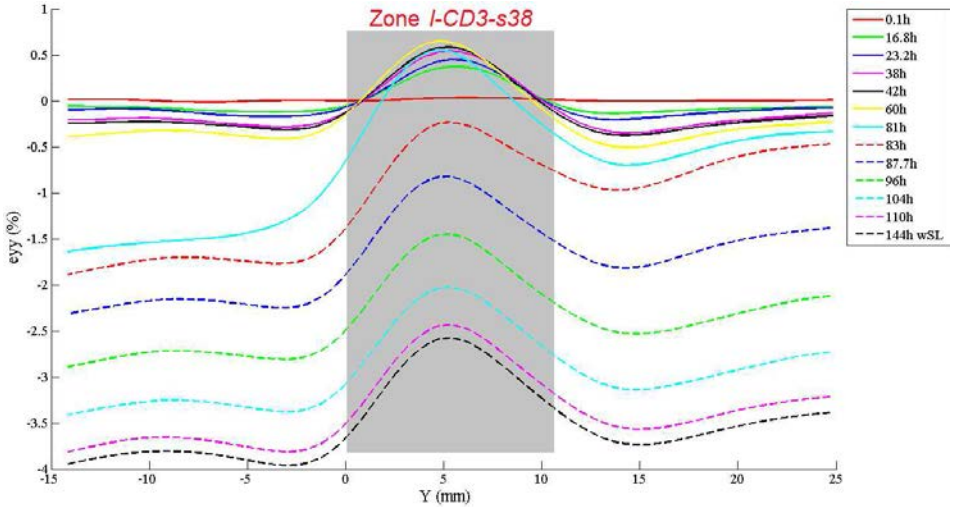
Dès le début de séchage (t=16.8h), ε_{xx} et ε_{yy} (Fig. V.2 a et b) augmentent progressivement et correspondent d'une part à une extension ($\varepsilon > 0$) au niveau de la zone analysée et d'autre part à une compression ($\varepsilon < 0$) au voisinage de cette zone.

Avant d'atteindre t=81h, l'extension de ε_{xx} continue d'augmenter dans la zone *I-CD3-s38* colorée en gris (Fig. V.2 a) en même temps que la compression évolue légèrement aux abords de la zone. A t=81h, l'extension atteint son maximum à environ ε_{xx} = +1.25% dans la zone *I-CD3-s38* tant dis que la compression enregistre environ ε_{xx} = -0.81% à gauche de la zone et environ ε_{xx} = -0.35% à droite de la zone. Après t=81h, l'extension de la zone *I-CD3-s38* chute et disparait sans provoquer de fissure apparente. La compression quant à elle augmente considérablement dans la zone et en dehors de la zone pour atteindre respectivement ε_{xx} = -3.6% et ε_{xx} = -4.18% en moyenne à la limite de retrait (t=144h).

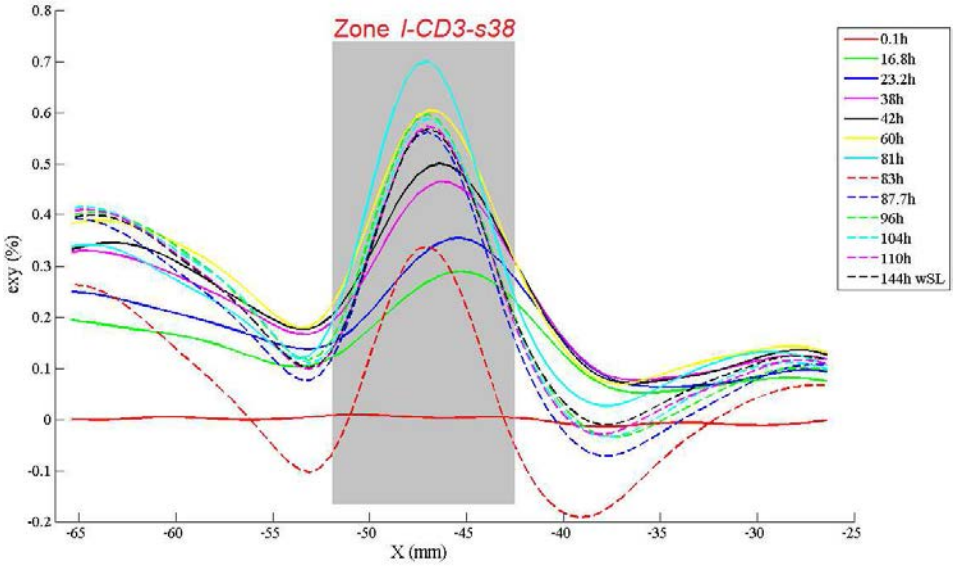
Les déformations de cisaillement (Fig. V.2 c) contrôlent les distorsions mais elles sont faibles comparées aux déformations longitudinale et transversale. ε_{xy} atteint un maximum de +0.7% lorsque ε_{xx} et ε_{yy} sont respectivement à -4.53% et -3.48%.



(a) Distribution de la déformation longitudinale ε_{xx} sur A-A'



(b) Distribution de la déformation transversale ε_{yy} sur B-B'



(c) Distribution de la déformation de cisaillement ε_{xy} sur A-A'

Figure V.2 : Distributions des déformations locales sur les lignes horizontale A-A' et verticale B-B' traversant la zone *I-CD3-s38*.

b - Analyse des résultats par la CIN :

Une investigation détaillée effectuée sur la zone *I-CD3-s38* à différents temps de séchage est présentée sur la figure V.3 en termes de déformations longitudinale ε_{xx} et transversale ε_{yy}. La zone étudiée est schématisée par une ellipse discontinue noire.

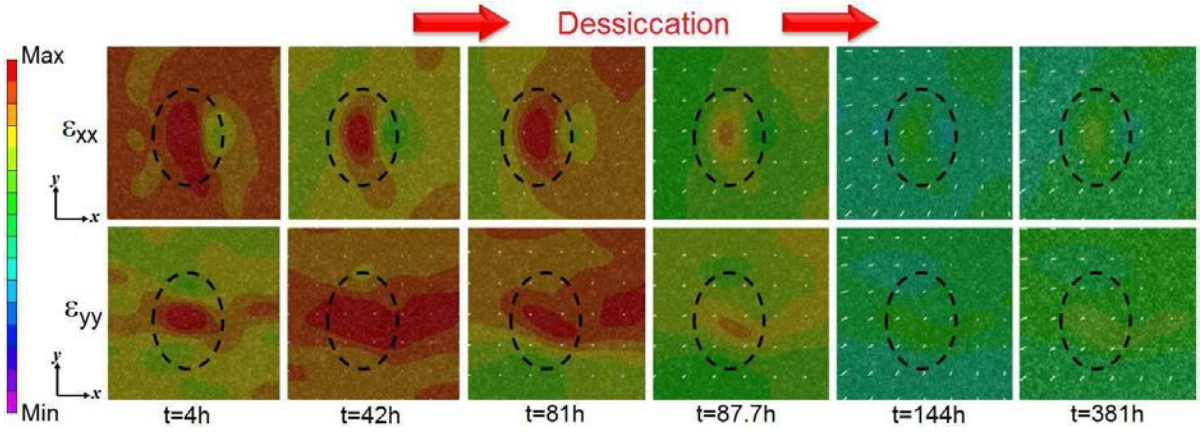


Figure V.3 : Déformations longitudinale et transversale dans la zone *I-CD3-s38* à différents temps de séchage.

Les caractéristiques hydriques (teneur en eau, succion locale et déformation de retrait) ainsi que les valeurs maximum et minimum des déformations longitudinale et transversale sont reportées dans le tableau V.2.

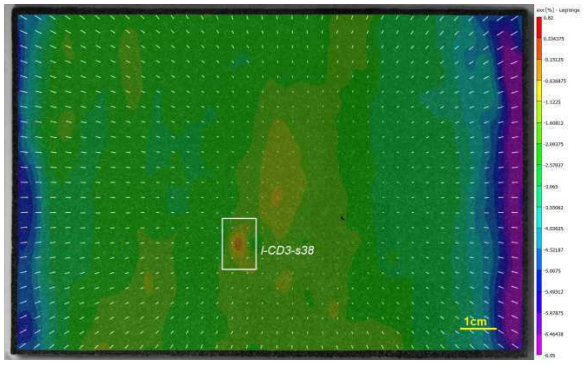
Tableau V.2 : Teneur en eau *w*, succion locale *s*, déformation de retrait ε_r et maximum et minimum de ε_{xx} et ε_{yy} dans la zone *I-CD3-s38* à différents temps de séchage.

Temps	t=4h	t=42h	t=81h	t=87.7h	t=144h	t=381h
w (%)	47.1	38.2	30.3	28.8	16.8	1.5
s_{loc} (MPa)	0.58	0.97	1.42	1.5	2.07	7.47
ε_r (%)	-0.25	-2.61	-5.04	-6.47	-8.8	-8.8
Max. ε_{xx} (%)	0.21	1.17	1.25	0	-2.67	-2.67
Min. ε_{xx} (%)	-1.1	-4.94	-7.84	-8.28	-10.09	-10.09
Max. ε_{yy} (%)	0.17	0.61	0.62	0	-2.25	-2.25
Min. ε_{yy} (%)	-0.67	-3.66	-6.33	-6.65	-7.93	-7.93

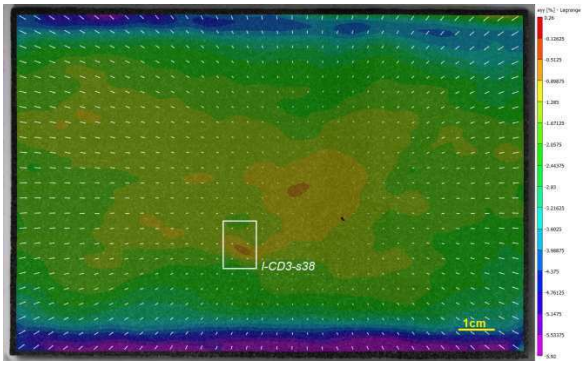
A t=4h de séchage (Fig. V.3), la zone *I-CD3-s38* subit une extension (en rouge) et affiche des déformations locales ε_{xx}= +0.21% et ε_{yy}= +0.17%. Lorsque le temps de séchage augmente (t=42h), l'intensité de la déformation en extension évolue et atteint ε_{xx}= +1.17% et ε_{yy}= +0.61%. Puis à t=81h, l'extension de la zone semble atteindre son maximum à ε_{xx}= +1.25%.

Après 87.7h de séchage, la partie en extension est très réduite dans la zone *I-CD3-s38* et constitue le point de changement de signe en passant à une déformation négative (compression). A la limite de retrait (t=144h), la zone *I-CD3-s38* apparait clairement en compression et se maintient jusqu'à la fin du séchage à t=381h.

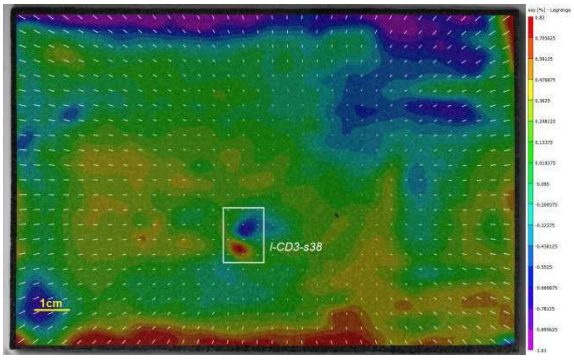
La figure V.4 montre les cartographies de ε_{xx}, ε_{yy} et ε_{xy} à t=87.7h. Cela permet d'observer l'état des déformations locales au voisinage de la zone *I-CD3-s38* au moment du changement de signe. On peut constater qu'à proximité de la zone il n'y a pas de phénomène de fissuration pouvant influencer le changement de signe de la déformation. Ainsi, nous considérons que dans cette zone, un phénomène de réversibilité de la déformation, nommé "relaxation", est identifié.



a- Déformation longitudinale ε_{xx} (%)



b- Déformation transversale ε_{yy} (%)



c- Déformation de cisaillement ε_{xy} (%)

Figure V.4 : Cartographies Vic2D des déformations locales de l'essai CD3-s38 à t= 87.7h (w= 28.8%)

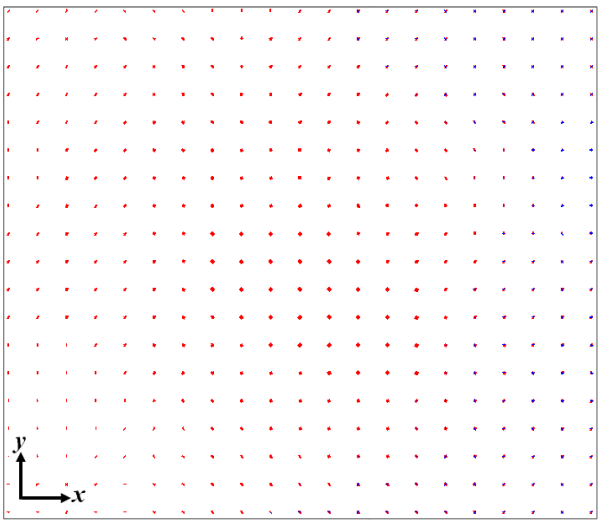
c - Analyse par les directions des déformations principales locales :

La figure V.5 présente les directions des déformations principales calculées dans la zone *I-CD3-s38* par la méthode décrite dans le chapitre II (section II.5.2 §1.b). La longueur des vecteurs désigne l'intensité des déformations principales tandis que la couleur indique son signe positif (extension) en rouge ou négatif (compression) en bleu. L'orientation des vecteurs (notée θ) est calculée par rapport à l'axe X.

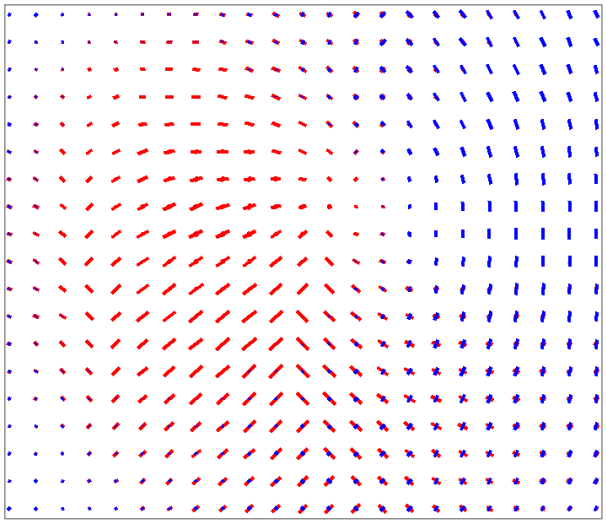
Les résultats confirment la tendance observée par la CIN sur les déformations locales. Des positions d'extension apparaissent dès le début de séchage (t=4h), puis se développent suivant différents groupements d'orientation (t=42h) mais restent contenues dans une large région en compression. A t=81h, la partie en extension se rétrécit mais avec des vecteurs plus longs, lorsque celle en compression s'intensifie avec des vecteurs qui s'allongent. Notons que certaines positions en extension comptent un seul vecteur, le second (perpendiculaire) est très faible.

Après t=87.7h de séchage, les positions en extension disparaissent entièrement, remplacées par des positions en compression. Il s'agit ici du phénomène de relaxation.

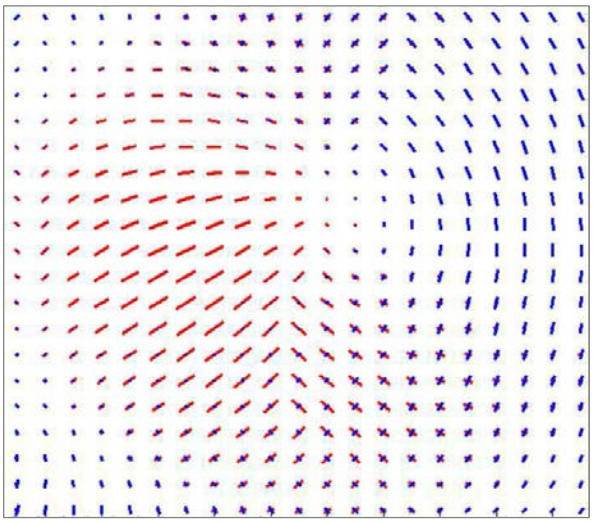
Ensuite, les déformations principales en compression continuent de se développer jusqu'à la limite de retrait à t=144h, puis se stabilisent jusqu'à la fin du séchage (t=381h).



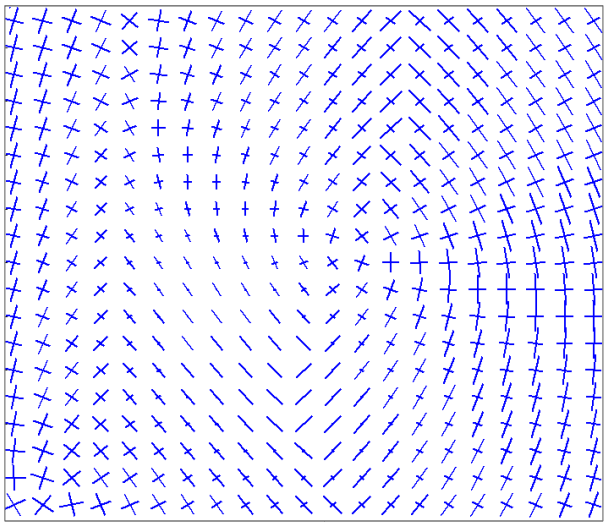
t=4h



t=42h



t=81h



t=87.7h

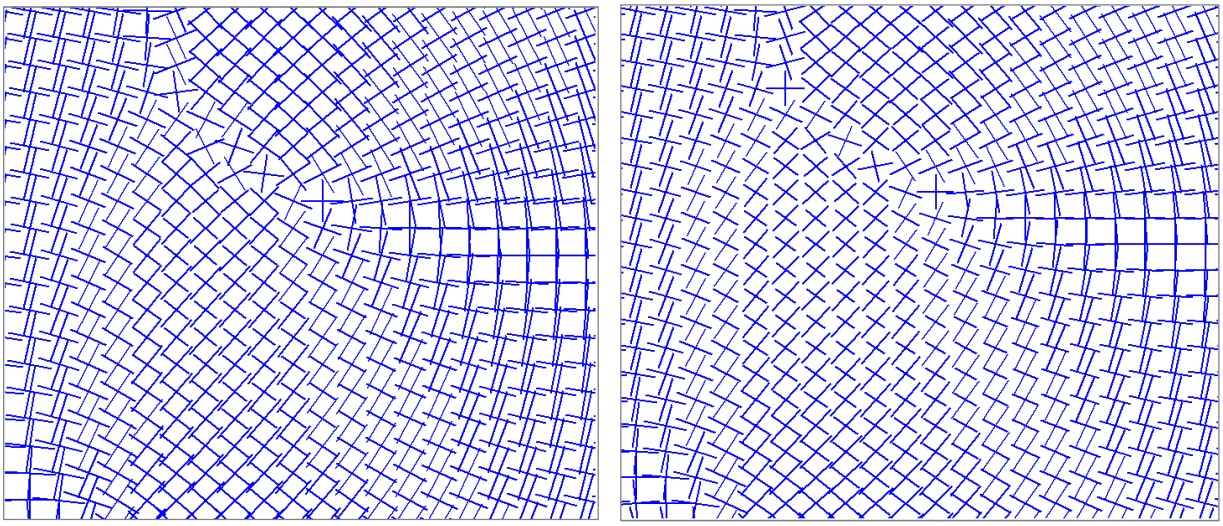


Figure V.5 : Déformations principales locales dans la zone *I-CD3-s38* identifiée sur la figure V.1 à différents temps de séchage.

V.1.1.2 Moyenne succion (110 MPa)

A moyenne succion, nous avons choisi de traiter l'essai CD3-s110 où différentes zones critiques ont été identifiées. La cartographie Vic2D de ε_{xx}, présentée à la fin du séchage (t=162h) sur la figure V.6, montre par des rectangles la localisation de ces zones.

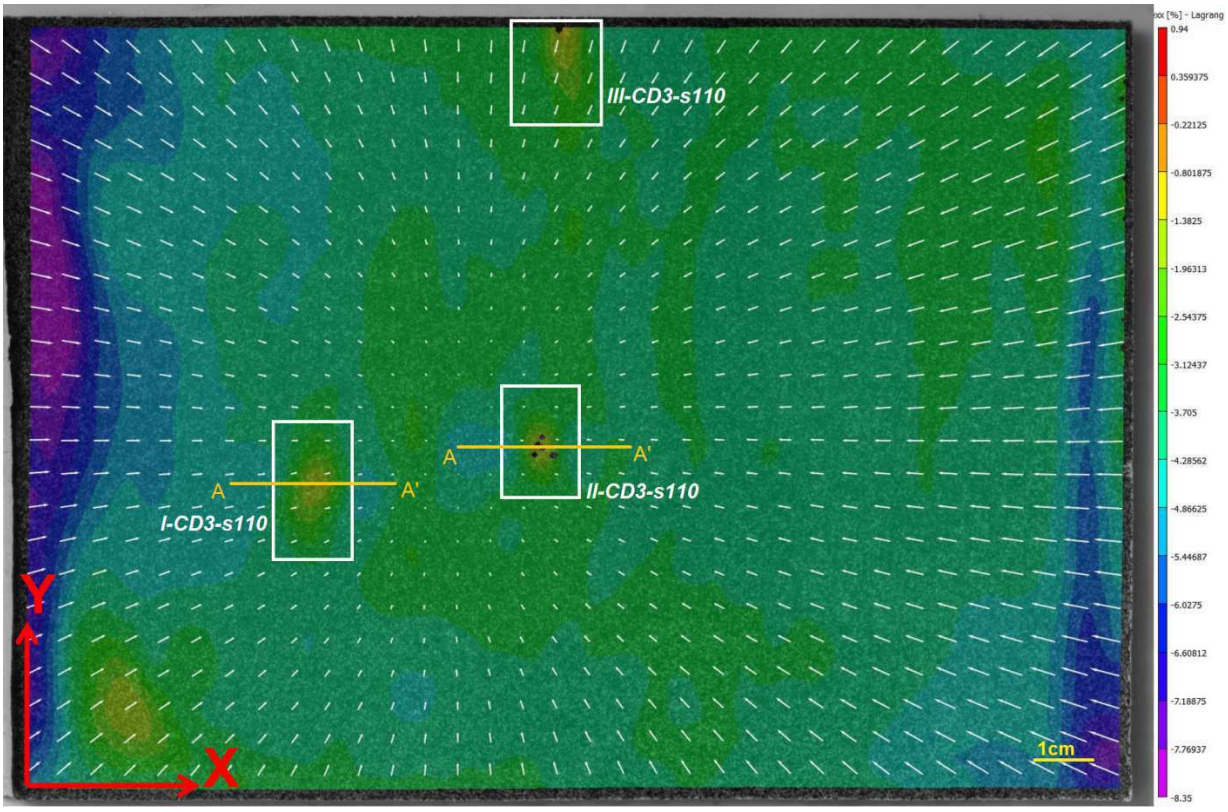


Figure V.6 : Déformation longitudinale ε_{xx} à la fin du séchage contrôlé à moyenne succion imposée (t=162h, essai CD3-s110).

L'analyse de ces zones critiques a permis d'identifier deux phénomènes : la relaxation dans les zones *I-CD3-s110* et *II-CD3-s110*, la fissuration par extension (mode I) dans la zone *III-CD3-s110*.

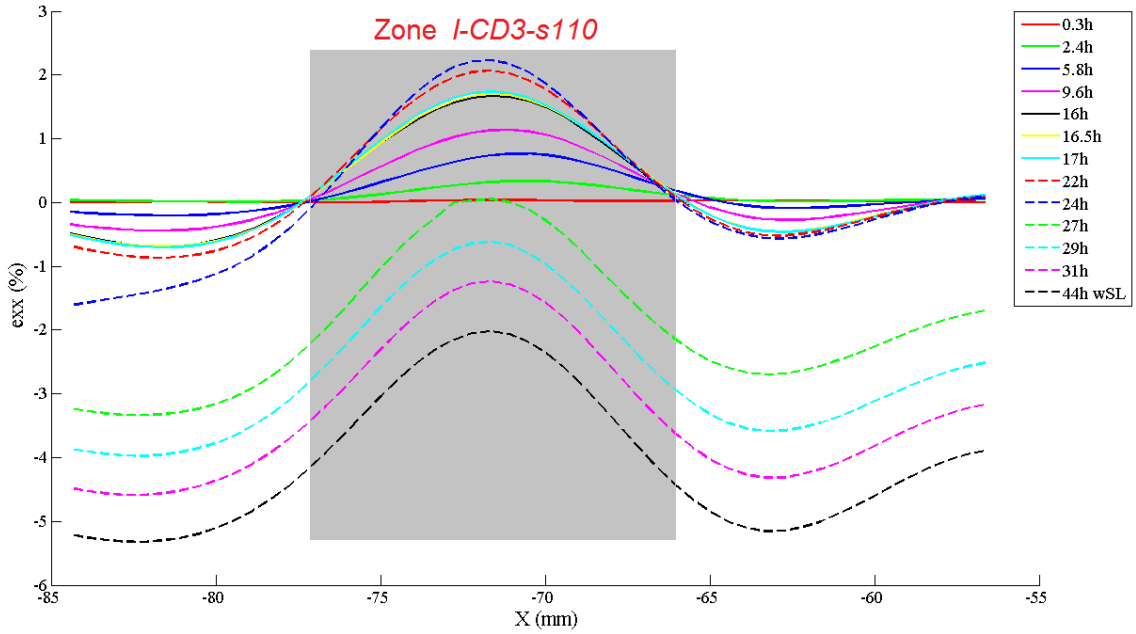
a- Phénomène de relaxation :

Les distributions de la déformation longitudinale suivant la ligne A-A' (Fig. V.6) dans les deux zones *I-CD3-s110* et *II-CD3-s110* sont présentées sur la figure V.7.

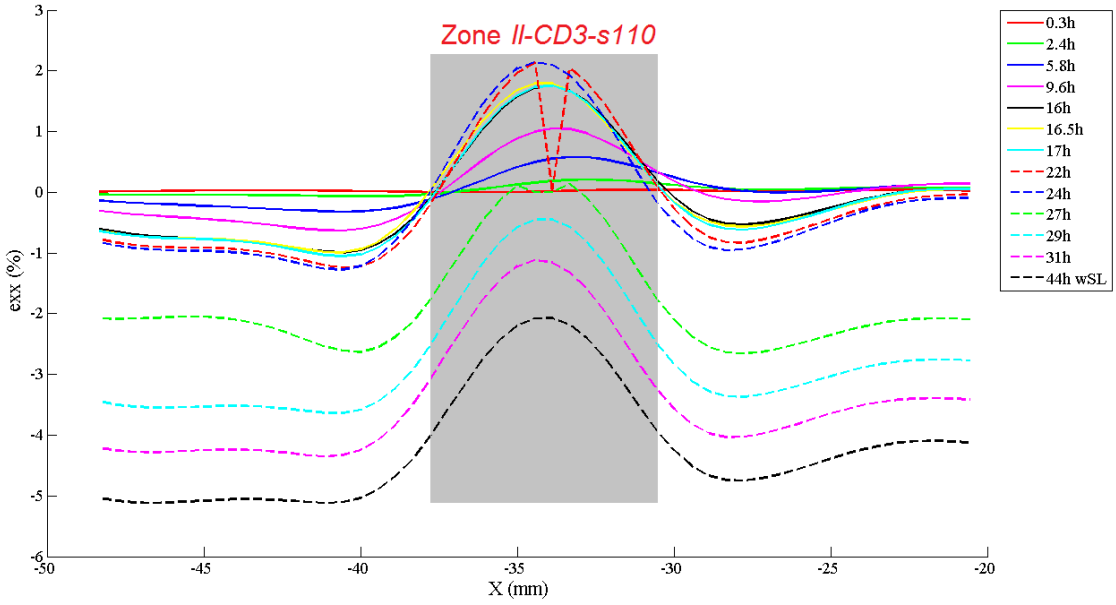
Les résultats montrent dans les deux cas (a) et (b) une extension au niveau des zones repérées et une compression à leur voisinage et ce dès le début du séchage (t=2.4h).

Avant t=24h, l'extension de ε_{xx} augmente dans les zones, indiquées par la couleur grise (Fig. V.7), et la compression enregistrée à proximité de ces zones évolue tout en restant inférieure à ε_{xx}= -1% en moyenne. A t=24h, l'extension atteint sa valeur maximale égale à ε_{xx}= +2.26% dans la zone *I-CD3-s110* et ε_{xx}= +2.14% dans la zone *II-CD3-s110*.

Après t=24h, l'extension des zones critiques chute et change de signe (de $\varepsilon > 0$ à $\varepsilon < 0$) alors que la compression en dehors de ces zones augmente fortement. Ainsi, à la limite de retrait (t=44h), la compression atteint des valeurs moyennes égalent d'une part à ε_{xx}= -2.8% et ε_{xx}= -4.82% respectivement dans la zone *I-CD3-s110* et ses cotés, d'autre part, à ε_{xx}= -3.35% et ε_{xx}= -4.72% respectivement dans la zone *II-CD3-s110* et ses cotés.



(a) Distribution de la déformation longitudinale ε_{xx} dans *I-CD3-s110*



(b) Distribution de la déformation longitudinale ε_{xx} dans *II-CD3-s110*

Figure V.7 : Distributions de la déformation longitudinale sur la ligne horizontale A-A' (Fig. V.5) traversant les zones (a) *I-CD3-s110* et (b) *II-CD3-s110*.

Une analyse par la CIN a été réalisée sur les deux zones *I-CD3-s110* et *II-CD3-s110* à différents temps de séchage. Les résultats en termes de déformations longitudinale et transversale sont regroupés et présentés sur la figure V.8.

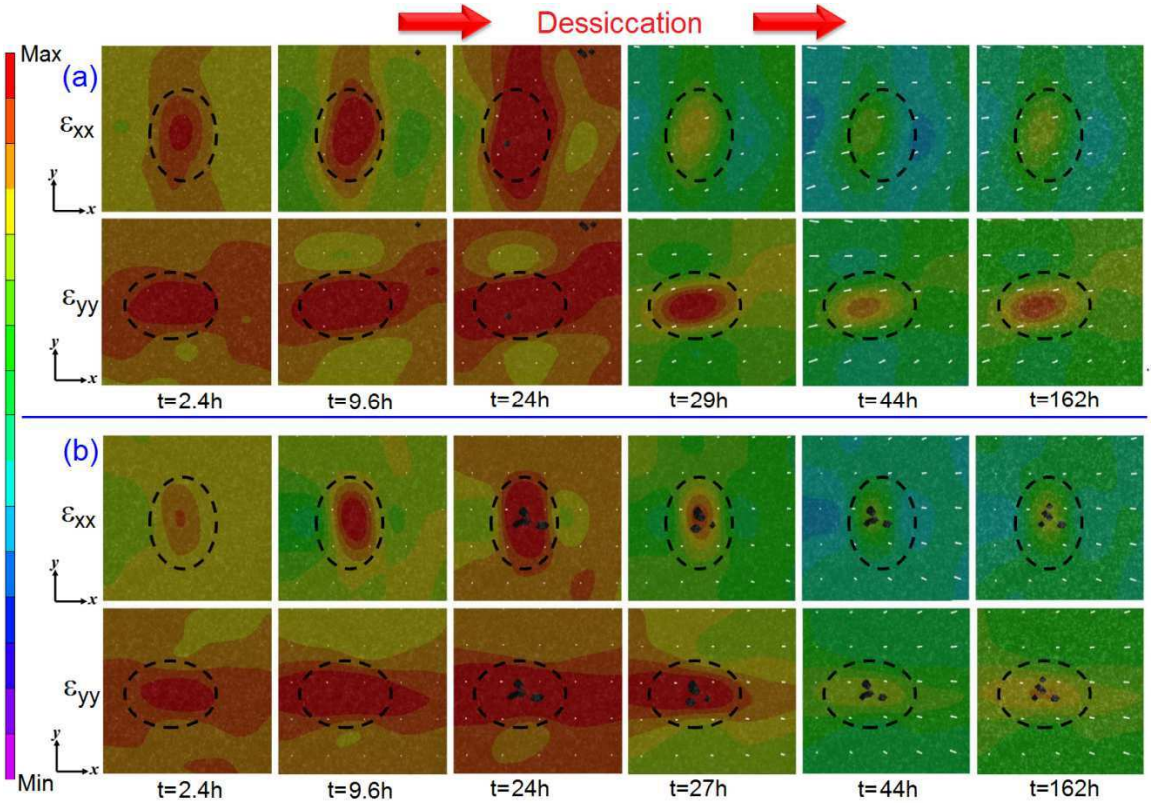


Figure V.8 : Déformations longitudinale et transversale à différents temps de séchage dans les zones (a) *I-CD3-s110* et (b) *II-CD3-s110*.

Les valeurs maximum (Max) et minimum (Min) des déformations longitudinale ε_{xx} et transversale ε_{yy} (Fig.V.8) ainsi que les paramètres hydriques locaux (teneur en eau, succion et déformation de retrait) correspondant à chaque temps de séchage sont reportés dans le tableau V.3.

Tableau V.3 : Teneur en eau *w*, succion locale *s*, déformation de retrait ε_r et maximum et minimum de ε_{xx} et ε_{yy} dans la zone *I-CD3-s110* et *II-CD3-s110* à différents temps de séchage.

Temps	t=2.4h	t=9.6h	t=24h	t=27h	t=29h	t=44h	t=162h
w (%)	46	40.4	30.3	28.5	27.1	16.9	1.7
s_{loc} (MPa)	0.62	0.88	1.60	1.73	1.85	2.20	7.51
ε_r (%)	-0.45	-1.94	-5.08	-5.78	-6.39	-7.76	-7.76
Max. ε_{xx} (%)	0.96	1.99	2.26	0.24	0	0	0
Min. ε_{xx} (%)	-1.96	-3.37	-7.32	-7.76	-8.21	-9.32	-9.32
Max. ε_{yy} (%)	0.34	0.8	2.49	1.5	0.74	0	0
Min. ε_{yy} (%)	-1.41	-3.11	-6.66	-7.13	-7.52	-8.39	-8.39

Les résultats de la figure V.8 montrent que dès le début de séchage, ε_{xx} et ε_{yy} dans les zones *I-CD3-s110* (Fig. IV.8 a) et *II-CD3-s110* (Fig. IV.8 b) apparaissent en extension jusqu'à t=24h où leurs valeurs maximales sont respectivement +2.26% et +2.49%. A partir de t=27h pour *II-CD3-s110* et t=29h pour *I-CD3-s110*, l'intensité de l'extension amorce sa diminution, qui est plus prononcée suivant ε_{xx} comparée à celle suivant ε_{yy}.

A la limite de retrait (t=44h), ε_{xx} et ε_{yy} changent de signe et apparaissent en compression dans les deux zones *I-CD3-s110* et *II-CD3-s110*. Cette tendance se maintient jusqu'à la fin du séchage (t=162h).

Dans la continuité de cette analyse, un calcul par les directions des déformations principales locales a été effectué et les résultats dans les deux zones *I-CD3-s110* et *II-CD3-s110* sont exposés respectivement sur les figures V.9 et V.10.

Entre le début de séchage et t=24h, les déformations principales locales montrent les deux zones *I-CD3-s110* et *II-CD3-s110* en extension avec des vecteurs rouges dont la longueur croît avec le temps suivant différents groupements d'orientation. A t=29h pour *I-CD3-s110* (Fig. V.9) et t=27h pour *II-CD3-s110* (Fig. V.10), la présence des vecteurs rouges se réduit considérablement marquant ainsi l'atténuation de l'extension et l'amorçage du changement de signe dans les déformations principales. La compression caractérisée par les vecteurs bleus augmente et devient dominante. A la limite de retrait (t=44h), l'extension disparait complètement, remplacée par la compression qui se stabilise jusqu'à la fin du séchage (t=162h).

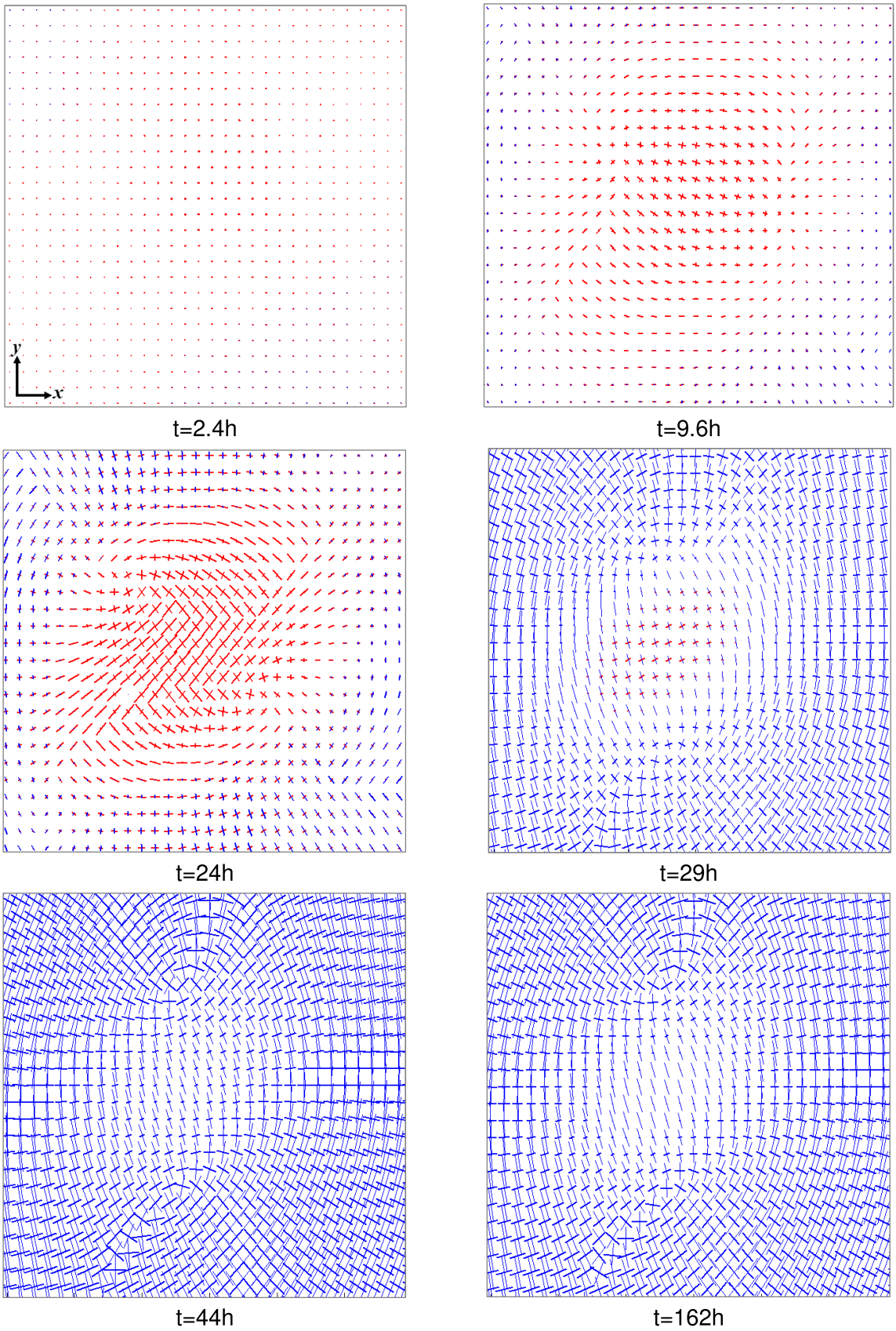


Figure V.9 : Déformations principales locales dans la zone *I-CD3-s110* identifiée sur la figure V.6 à différents temps de séchage.

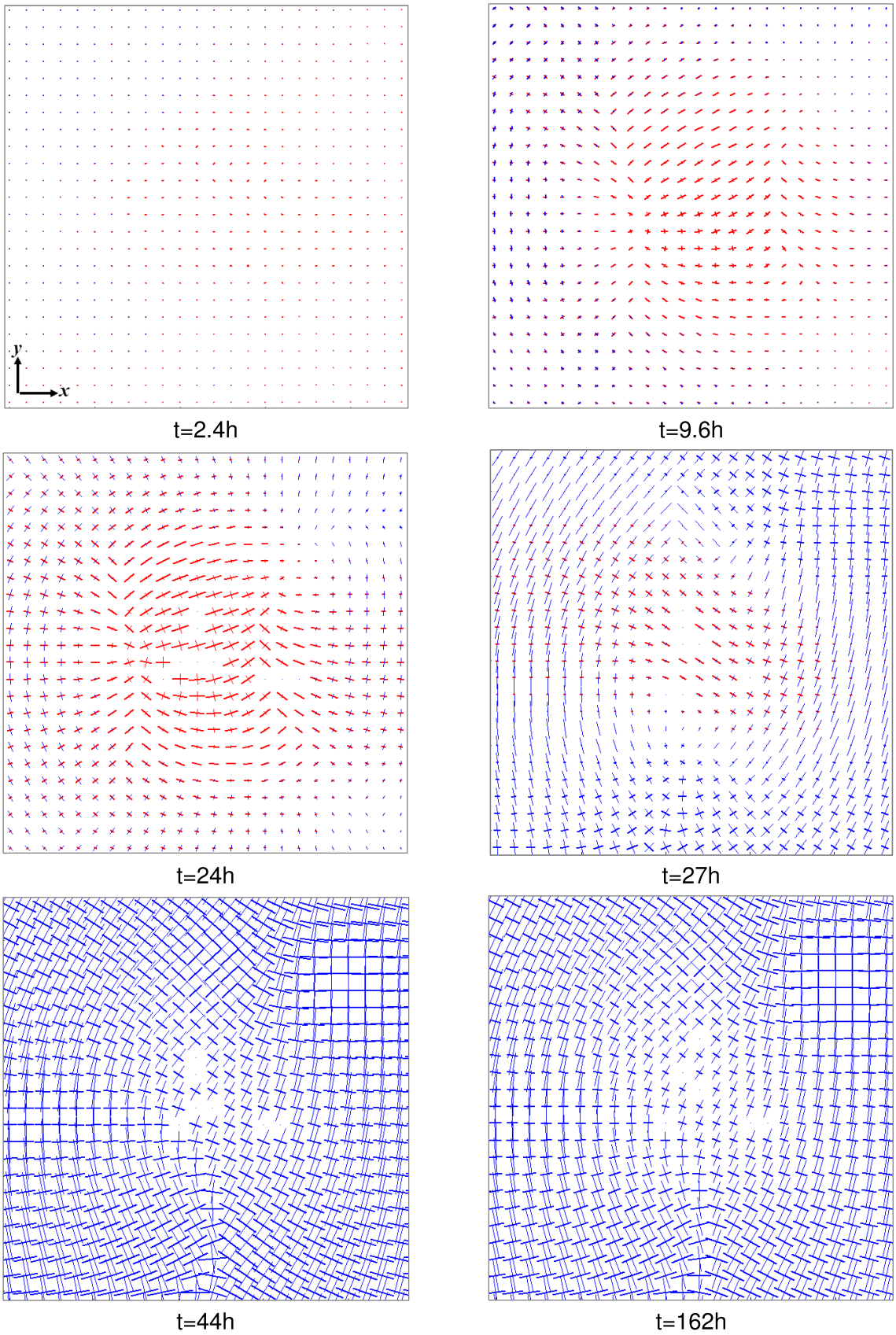


Figure V.10 : Déformations principales locales dans la zone *II-CD3-s110* identifiée sur la figure V.6 à différents temps de séchage.

b- Fissuration par extension (mode I) :

La zone *III-CD3-s110*, qui a été identifiée sur la figure V.6 au niveau du bord, met en évidence le mode de fissuration par extension également appelé "mode d'ouverture" (mode I). Ceci est intervenu à un stade avancé du retrait avec ε_r = -8.1%. Il a été difficile d'observer ce phénomène sur les cartographies Vic2D ayant considéré comme référence l'image t=0, car la compression totale mesurée est importante.

Pour visualiser le développement de la fissure, nous avons réalisé un calcul de CIN en prenant comme référence l'image à la limite de retrait (t=44h). Le but est de s'affranchir de la déformation de retrait (ε_r), et tenir compte uniquement de la composante mécanique des déformations locales. Celle-ci étant responsable de l'amorçage et de la propagation des zones de fissuration.

La figure V.11 présente l'évolution de ε_{xx} dans la zone *III-CD3-s110* obtenue à partir de ce calcul.

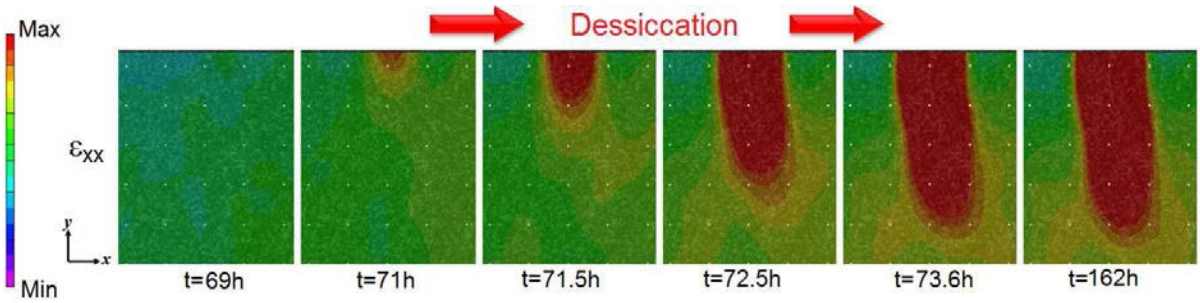


Figure V.11 : Déformation longitudinale dans la zone *III-CD3-s110* à différents temps de séchage.

Les caractéristiques des différentes cartographies Vic2D présentées sur la figure V.11 à différents temps de séchage sont reportées dans le tableau V.4.

Tableau V.4 : Teneur en eau *w*, succion locale *s* et maximum et minimum de ε_{xx} dans la zone *III-CD3-s110* à différents temps de séchage.

Temps	t=69h	t=71h	t=71.5h	t=72.5h	t=73.6h	t=162h
w (%)	2.1	1.85	1.77	1.6	1.5	1.7
s_{loc} (MPa)	7.1	7.15	7.16	7.18	7.2	7.51
Max. ε_{xx} (%)	0.66	0.71	0.72	0.73	0.74	0.77
Min. ε_{xx} (%)	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03

Notons que les valeurs de ε_{xx} obtenues, en extension, sont très proches des valeurs de sa composante mécanique déduite par le calcul suivant :

$$\overline{\varepsilon}_{xx} = \varepsilon_{xx} - \varepsilon^{r}_{xx} \qquad [V.1]$$

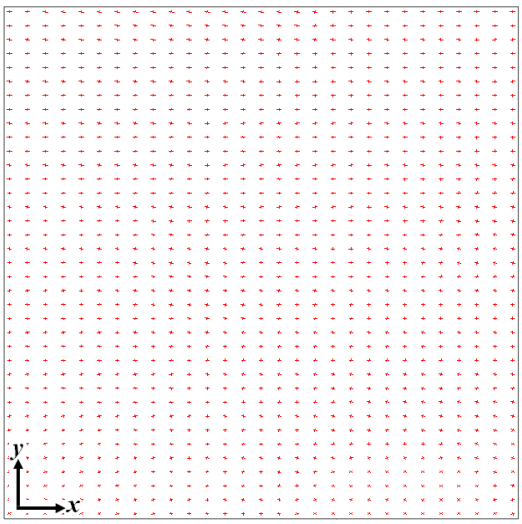
Remarque : nous avons appliqué cette démarche pour toutes les fissures apparues au niveau des bords de l'échantillon sur les différents chemins de séchage étudiés dans cette partie.

A t=69h, ε_{xx} marque des valeurs comprises entre ε_{xx}= 0% et ε_{xx}= +0.66% sans apparition claire de zones en extension. Deux heures après (t=71h), l'extension s'amorce (zone rouge) sous une déformation maximale égale à ε_{xx}= +0.71%. Ensuite, entre t=71.5h et la fin du séchage (t=162h), la zone en extension conserve son niveau. L'ouverture de la fissure était tellement faible, qu'il n'est pas possible de l'observer sans le calcul ci-dessus.

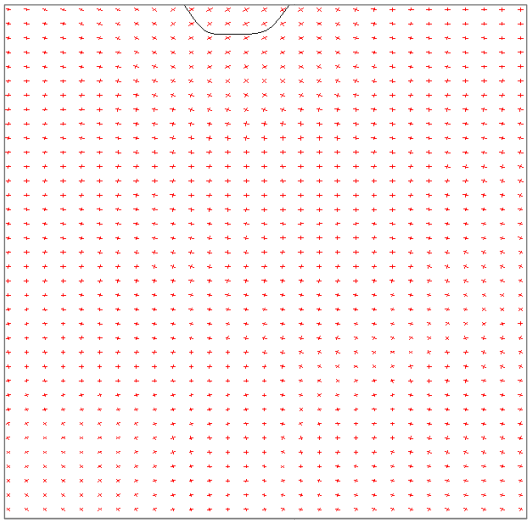
→ *Calcul par les directions des déformations principales* :

D'autre part, les directions principales des déformations locales, associées aux différentes cartographies Vic2D de la figure V.11, ont été calculées et représentées sur la figure V.12. Les vecteurs représentant l'intensité des déformations principales majeure et mineure apparaissent en rouge (extension) sur toute la surface de la zone analysée. Afin de différencier la région où la fissure se crée, nous avons délimité cette dernière avec une ligne de couleur noire.

Les résultats précisent l'analyse par la CIN présentée ci-dessus. A partir de t=72.5h, on observe le développement des déformations en extension suivant la direction X, qui est perpendiculaire au sens de propagation de la fissure. Ceci confirme que la fissure est due au mécanisme de fissuration en mode ouverture par extension. Dans son étude sur la même argile sous séchage libre, Wei et al. (2016) a observé que le mode I était prépondérant dans les mécanismes de rupture.



t=69h



t=71h

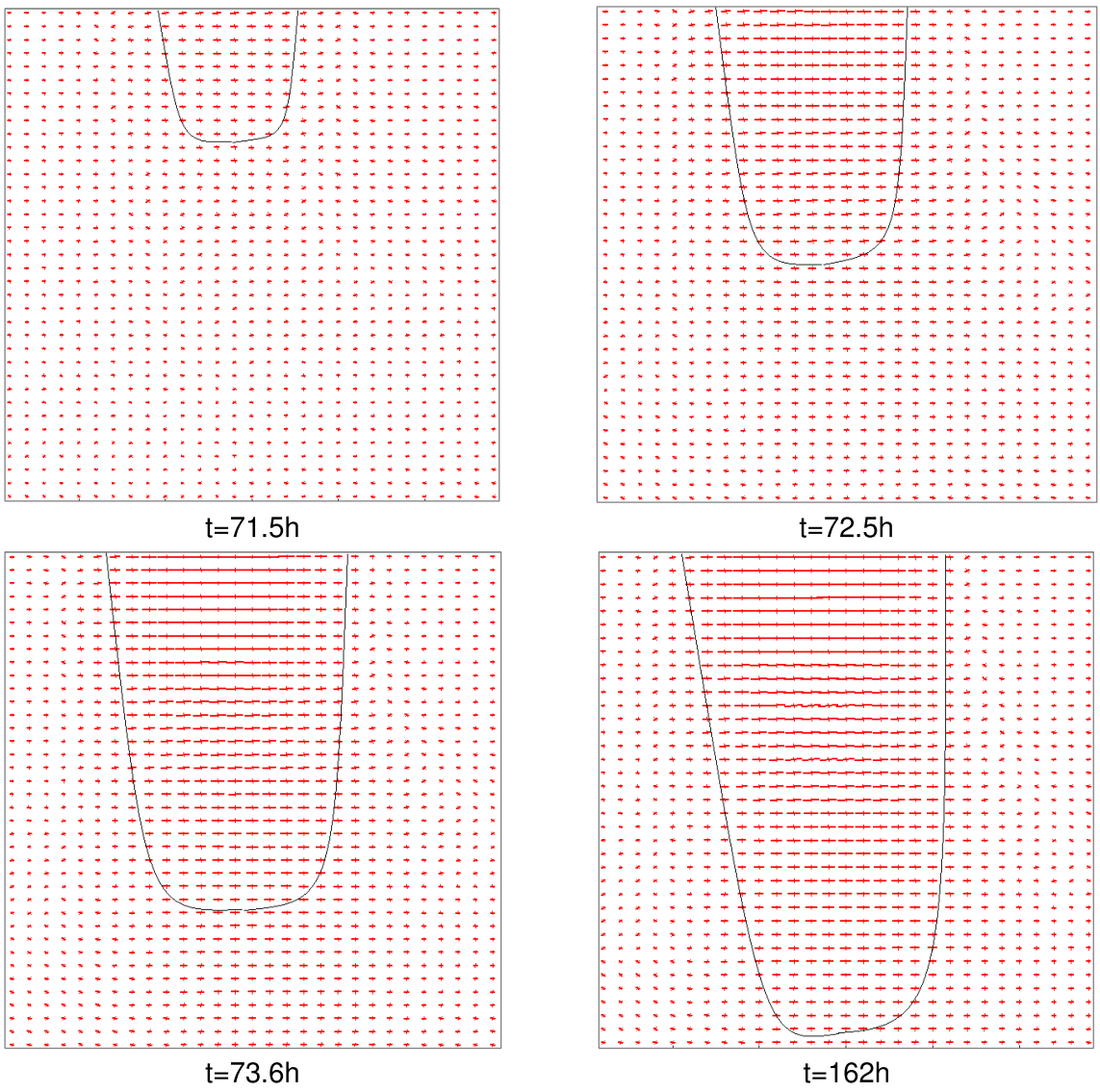


Figure V.12 : Déformations principales locales dans la zone *III-CD3-s110* à différents temps de séchage.

V.1.1.3 Forte succion (361 MPa)

Différentes fissures ont été identifiées au cours de séchage dans le traitement de l'essai CD2-s361. Pour une représentation permettant de visualiser ces zones critiques sur le même plan, nous avons choisi la cartographie Vic2D de la déformation principale majeure ε_1 illustrée sur la figure V.13.

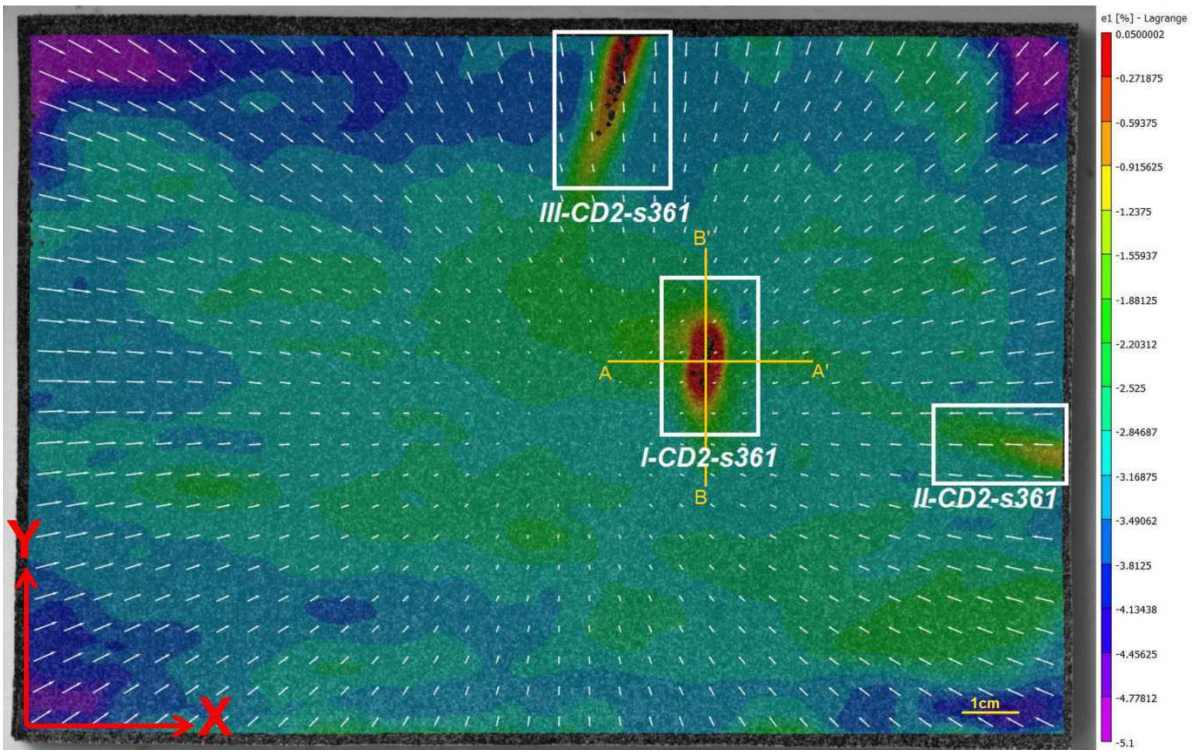


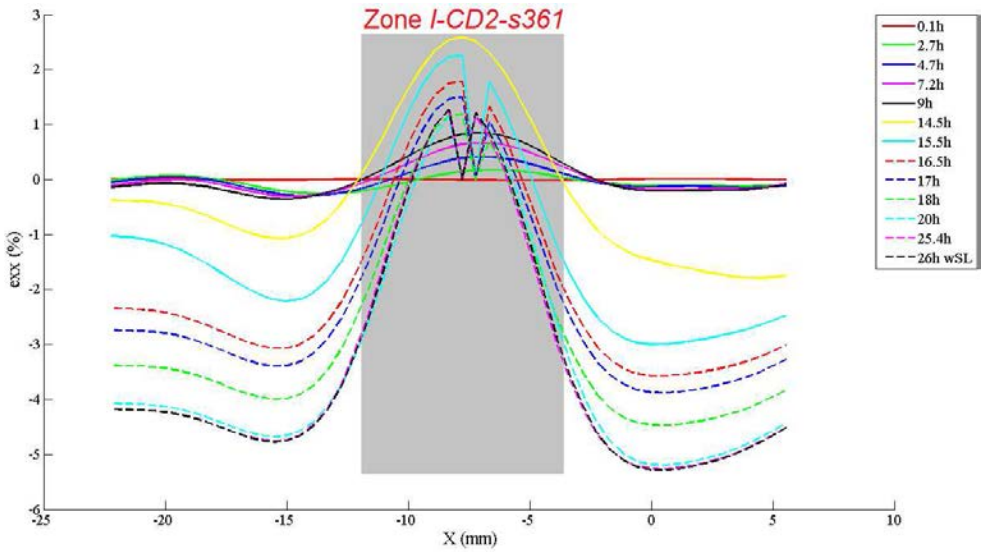
Figure V.13 : Déformation principale majeure ε_1 à la fin de séchage contrôlé à forte succion imposée (t=161h, essai CD2-s361).

Au cours de séchage, trois zones critiques observées apparaissent comme des fissures ou des zones à forte extension à la fin de l'essai. La première zone *I-CD2-s361* s'est activée près du centre de l'échantillon. Les deux zones *II-CD2-s361* et *III-CD2-s361* apparaissent au niveau des bords.

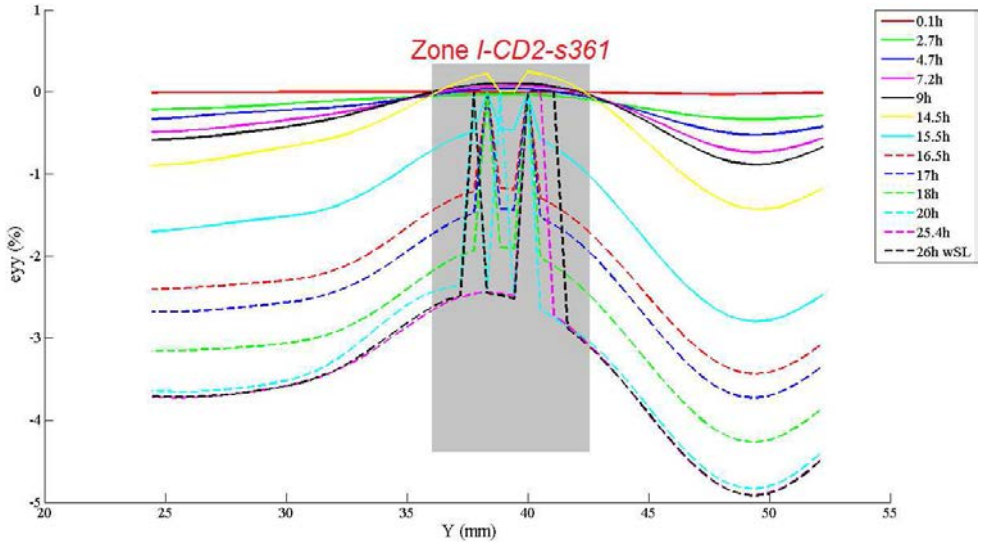
a- Fissuration au centre de l'échantillon :

Une analyse locale, basée sur les distributions et cartographies Vic2D des déformations ainsi que le calcul des déformations principales, a été conduite dans la zone *I-CD2-s361*.

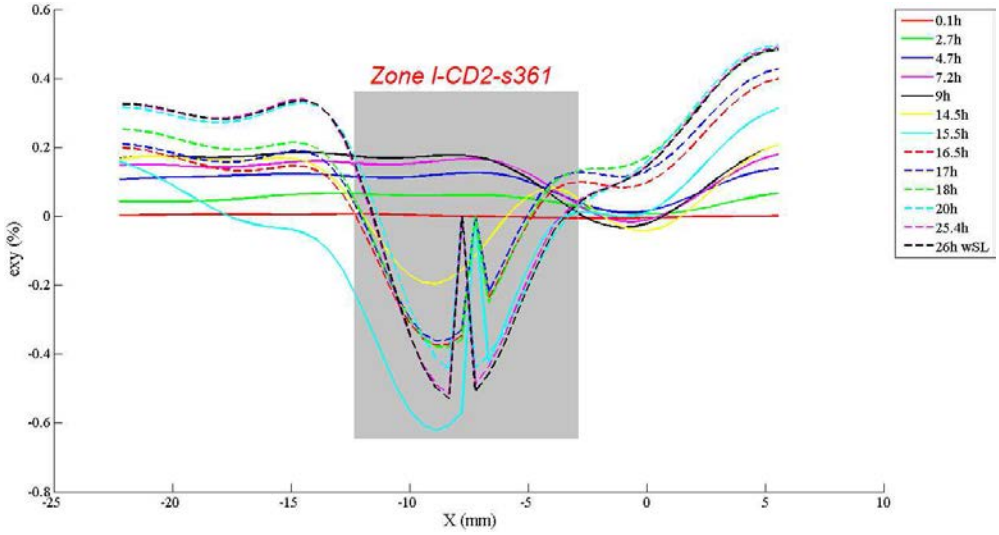
La figure V.14 présente les distributions des déformations ε_{xx}, ε_{xy} et ε_{yy} dans *I-CD2-s361*, sur les lignes A-A' et B-B' indiquées sur la figure V.13, à différents temps de séchage allant jusqu'à la limite de retrait.



(a) Distribution de la déformation longitudinale ε_{xx} sur A-A'



(b) Distribution de la déformation transversale ε_{yy} sur B-B'



(c) Distribution de la déformation de cisaillement ε_{xy} sur A-A'

Figure V.14 : Distributions des déformations locales sur les lignes horizontale A-A' et verticale B-B' traversant la zone *I-CD2-s361*.

Les résultats de la distribution ε_{xx} sur A-A' (Fig. V.14 a) montrent que la zone *I-CD2-s361* se distingue très tôt (t=2.7h) par une extension à ε_{xx}= +0.18%. Cette dernière progresse avec le séchage et atteint son maximum à t=14.5h pour une valeur de ε_{xx}= +2.6%. A ce stade de séchage, on enregistre une compression à -1% en moyenne de chaque coté de la zone.

Après t=14.5h, l'extension dans la zone tend à diminuer indiquant que la fissure s'initie, tandis que la compression sur les deux cotés de la fissure augmente progressivement jusqu'à atteindre sa valeur maximale de ε_{xx}= -4.7% à la limite de retrait (t_{SL}=26h).

En parallèle, la distribution de la déformation ε_{yy} sur la ligne B-B' (Fig. V.14 b) présente des valeurs très faibles (proches de zéro) dans *I-CD2-s361* du début de séchage jusqu'à t=14.5h (max ε_{yy}= +0.25%). Ceci confirme le mode d'ouverture (mode I) par extension ayant permis le développement de la fissure identifiée dans ε_{xx}. Sur les deux cotés de la zone, une compression évolue jusqu'à atteindre ε_{yy}= -1% à t=14.5h.

Au-delà de t=14.5h, ε_{yy} apparait en compression sur toute la ligne B-B' qui progresse en raison du retrait de l'échantillon jusqu'à sa limite à t=26h. A cet instant, ε_{yy} atteint des valeurs maximales moyennes de ε_{yy}= -2.9% et ε_{yy}= -4.1% respectivement dans la zone et sur les cotés de la zone.

Pour ε_{xy} (Fig. V.14 c), les distributions sont négatives (max $\varepsilon_{xy} \approx$ -0.6%) au niveau de la fissure *I-CD2-s361* et positives au voisinage de cette fissure (max $\varepsilon_{xy} \approx$ +0.4%).

→ *Analyse par les cartographies des déformations :*

L'investigation détaillée effectuée sur la zone *I-CD2-s361* à différents temps de séchage est illustrée sur la figure V.15 en termes de ε_{xx} et ε_{yy}. La zone étudiée est délimitée par une ellipse discontinue noire.

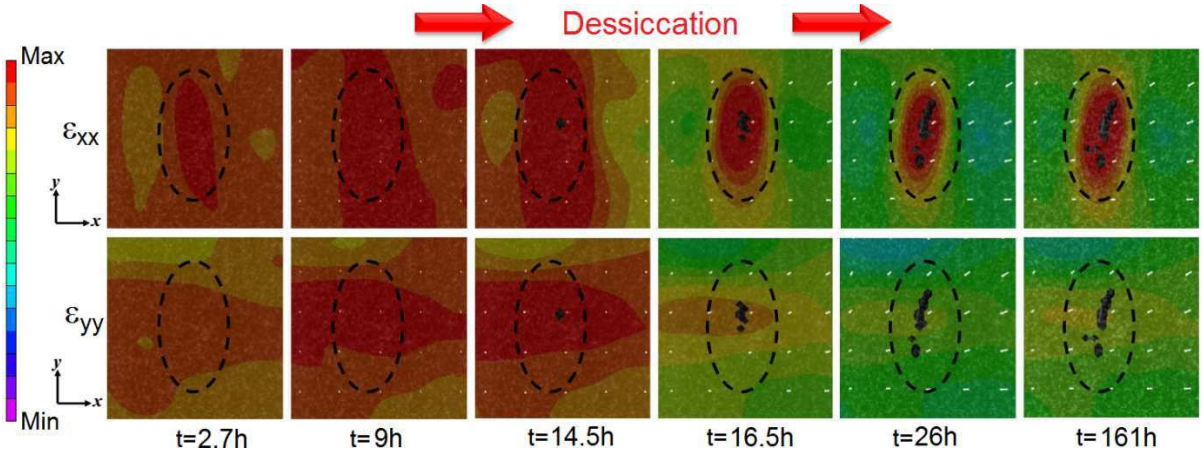


Figure V.15 : Déformations longitudinale et transversale dans la zone *I-CD2-s361* à différents temps de séchage.

Les caractéristiques hydriques (teneur en eau, succion locale et déformation de retrait) ainsi que les valeurs maximum et minimum associées aux cartographies de la figure V.15 sont reportées dans le tableau V.5.

Tableau V.5 : Teneur en eau *w*, succion locale *s*, déformation de retrait ε_r et maximum et minimum de ε_{xx} et ε_{yy} dans la zone *I-CD2-s361* à différents temps de séchage.

Temps	t=2.7h	t=9h	t=14.5h	t=16.5h	t=26h	t=161h
w (%)	44.3	36.4	30	27.6	16.8	2.6
s_{loc} (MPa)	0.71	1.20	1.61	1.74	2.15	7.11
ε_r (%)	-0.96	-3.02	-4.9	-6.24	-7.93	-7.93
Max. ε_{xx} (%)	0.39	0.87	2.62	1.78	1.32	1.32
Min. ε_{xx} (%)	-2.42	-5.8	-8.2	-8.7	-9.11	-9.11
Max. ε_{yy} (%)	0.13	0.31	0.26	0	0	0
Min. ε_{yy} (%)	-1.95	-5.55	-7.5	-7.95	-8.65	-8.65

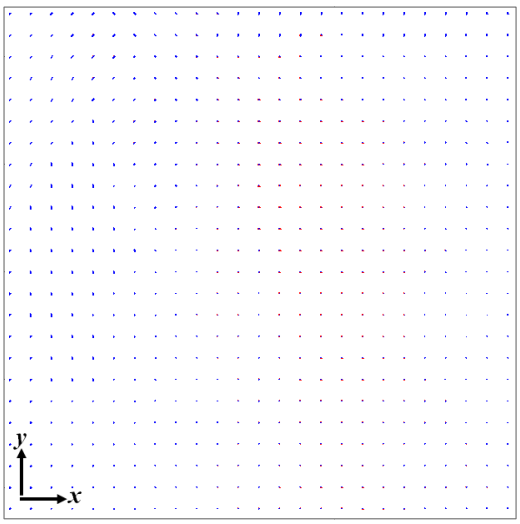
Les résultats de la figure V.15 illustrent l'évolution du champ des déformations ε_{xx} et ε_{yy} dans la zone *I-CD2-s361* au cours du séchage. Avant t=14.5h, la zone apparait en extension suivant les deux directions X et Y. Après t=14.5h, la fissure s'est développée. ε_{xx} et ε_{yy} tendent vers une compression due au retrait excepté la région de la fissuration qui présente encore une extension suivant ε_{xx}.

→ *Analyse par les directions des déformations principales :*

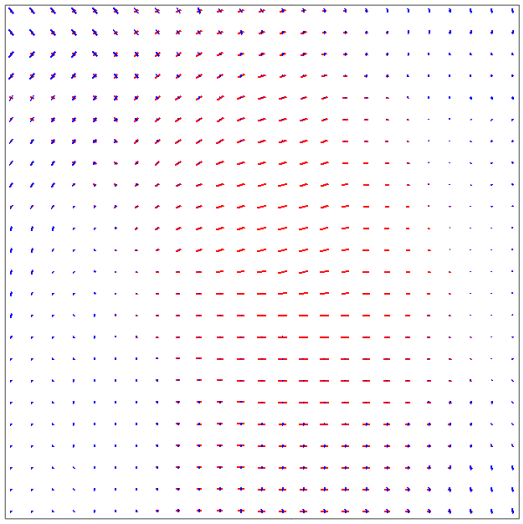
Le mécanisme est bien mis en évidence dans le plan des directions principales (Fig. V.16).

Au début du séchage, la zone étudiée *I-CD2-s361* met en évidence une partie en extension caractérisée par les vecteurs rouges. Ces derniers s'allongent se densifient jusqu'à t=14.5h où ils se stabilisent en étant orientés suivant la direction X, perpendiculaire à la propagation de la fissure qui s'est développée suivant la direction Y.

Après t=14.5h, l'extension devient une compression due à une relaxation après formation de la fissure. Ceci est clairement visible à t=16.5h où la densité des vecteurs rouge chute considérablement aux alentours de la fissure déjà formée.



t=2.7h



t=9h

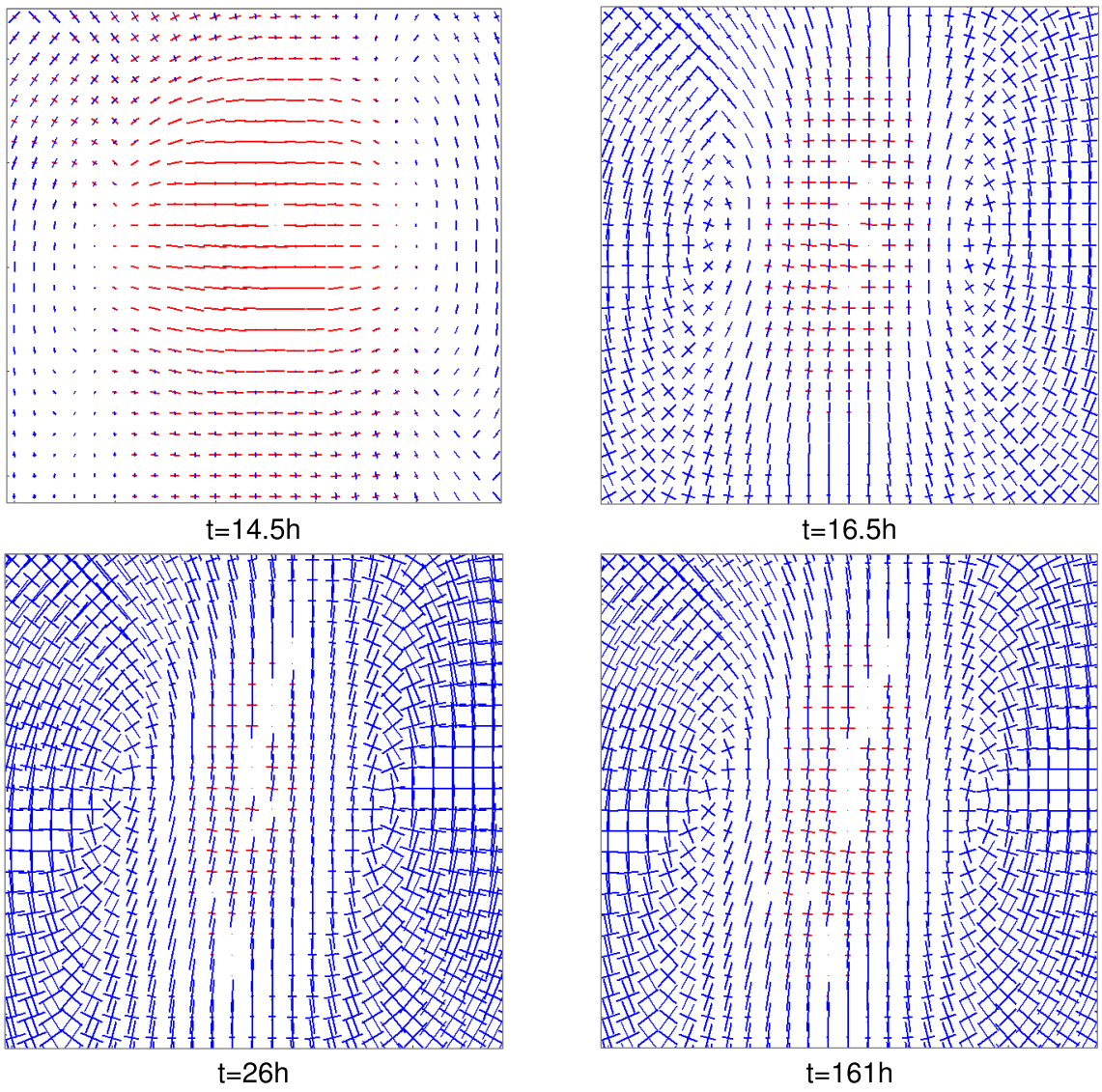


Figure V.16 : Déformations principales locales dans la zone *I-CD2-s361* à différents temps de séchage.

b- Fissuration aux bords de l'échantillon :

Au cours du séchage, deux fissures se sont formées partant des bords de l'échantillon. Dans l'analyse par la CIN, les cartographies des déformations ne permettent pas d'observer la zone d'extension car la déformation liée au retrait est très importante. Celle-ci atteint son maximum à ε_r = -7.93%. Afin de faire apparaitre la zone critique, nous avons réalisé le calcul décrit précédemment à moyenne succion (section V.1.1.2 §b), utilisant un état de référence proche de la limite de retrait.

La figure V.17 présente les évolutions de ε_{xx} dans la zone *III-CD2-s361* et de ε_{yy} dans la zone *II-CD2-s361* obtenue à différents temps de séchage.

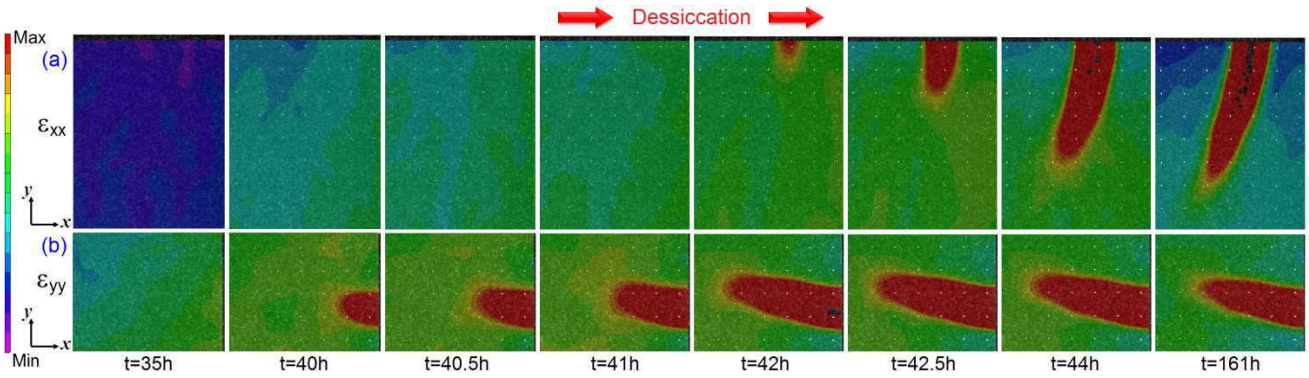


Figure V.17 : Déformations longitudinale et transversale respectivement dans les deux zones (a) *III-CD2-s361* et (b) *II-CD2-s361* à différents temps de séchage.

Les différentes cartographies Vic2D présentées sur la figure V.17 sont accompagnées des caractéristiques reportées dans le tableau V.6.

Tableau V.6 : Teneur en eau *w*, succion locale *s* et maximum et minimum de ε_{xx} et ε_{yy} respectivement dans les deux zones *III-CD2-s361* et *II-CD2-s361* à différents temps de séchage.

Temps	t=35h	t=40h	t=40.5h	t=41h	t=42h	t=42.5h	t=44h	t=161h
w (%)	7.62	3.74	3.51	3.27	2.9	2.73	2.5	2.65
s_{loc} (MPa)	4.61	6.27	6.4	6.51	6.72	6.8	6.93	7.11
Max. ε_{xx} (%)	0.59	0.704	0.71	0.714	0.724	0.742	0.93	1.375
Min. ε_{xx} (%)	-0.027	-0.027	-0.027	-0.027	-0.027	-0.027	-0.027	-0.027
Max. ε_{yy} (%)	0.418	0.612	0.638	0.658	0.752	0.77	0.774	0.86
Min. ε_{yy} (%)	-0.032	-0.032	-0.032	-0.032	-0.032	-0.032	-0.032	-0.032

A t=35h (Fig. V.17), il n'y a pas de zones en extension qui apparaissent dans les déformations ε_{xx} et ε_{yy}. Après t=40h de séchage, une zone en extension apparait puis se développe dans la partie *II-CD2-s361*. Cette zone commence du bord, parallèlement à l'axe X, sous une déformation ε_{yy} = +0.61%. Cette extension montre une légère variation allant jusqu'à ε_{yy} = +0.86% à la fin du séchage (t=161h).

Dans la zone *III-CD2-s361*, l'extension s'initie plus tard à partir de t=42h sous une déformation ε_{xx} = +0.72%. Puis, elle évolue suivant l'axe Y jusqu'à la fin de séchage (t=161h) où elle enregistre la valeur de ε_{xx} = +1.37%.

Remarque : les valeurs en extension atteintes dans les deux zones *II-CD2-s361* et *III-CD2-s361* à t=161h ont des valeurs très proches de la composante mécanique des déformations locales ε_{yy} et ε_{xx}, obtenues en considérant la totalité du retrait.

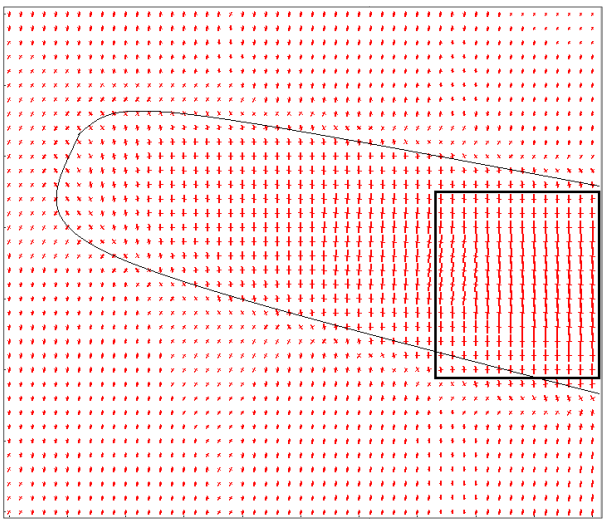
→ *Analyse par les directions des déformations principales :*

Les directions des déformations principales calculées pour les deux zones *II-CD2-s361* et *III-CD2-s361* sont représentées sur la figure V.18, respectivement a1 et b1, à la fin du séchage (t=161h). A droite de chaque zone, nous avons représenté le zoom de la partie encadrée

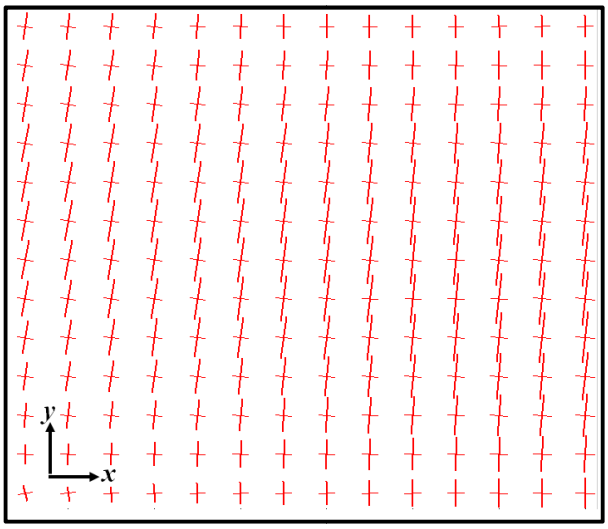
dans a2 et b2. La fissure de la zone *II-CD2-s361* identifiée est délimitée par un contour en noir.

Nous pouvons constater que, dans les deux cas, la direction de la fissure est perpendiculaire aux extensions principales caractérisées par les longs vecteurs. Ainsi, les deux fissures correspondent au mécanisme d'ouverture par extension (mode I).

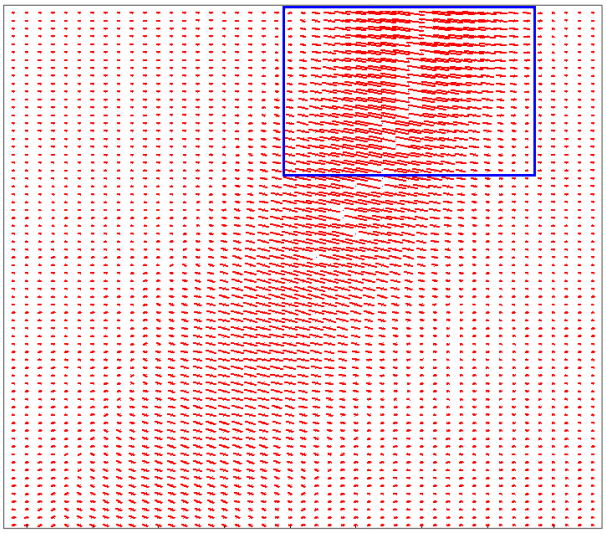
Notons que dans le cas *II-CD2-s361* (Fig. V.18 a1), la fissure n'est pas visible à l'œil nu, elle est inexistante en revanche la zone présente des déformations en extension élevées. Dans le cas de la zone *III-CD2-s361*, une légère ouverture peut être observée (Fig. V.18 b2), et les déformations d'extensions tendant légèrement à diminuer. En effet, plus l'ouverture de la fissure est large, les déformations d'extension diminuent et l'énergie est relaxée suite au développement de la fissure.



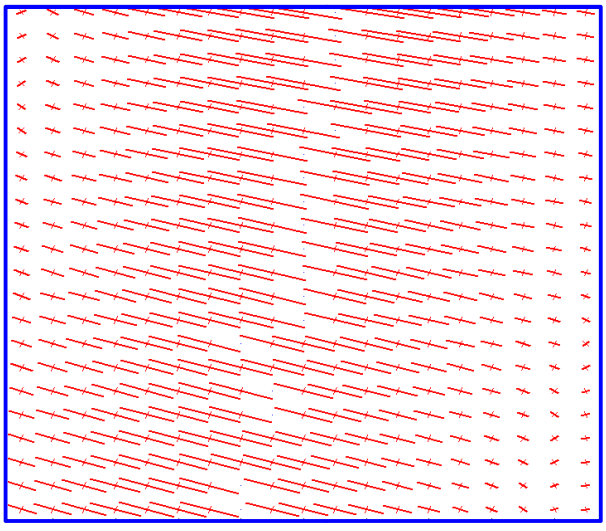
a1- Zone *II-CD2-s361*



a2- Partie encadrée agrandie



b1- Zone *III-CD2-s361*



b2- Partie encadrée agrandie

Figure V.18 : Déformations principales locales calculées à la fin de séchage (t=161h) dans les deux zones (a) *II-CD2-s361* et (b) *III-CD2-s361*.

V.1.2. Séchage libre

Les essais sous dessiccation libre ont été réalisés dans différentes conditions de support et de mouchetis.

Les résultats obtenus via la CIN, présentés dans le chapitre IV (section IV.3.2), ont montré la formation de quelques fissures durant le séchage. Afin d'analyser cette fissuration sur ses chemins de séchage, nous avons choisi l'essai FD-pers dont les caractéristiques d'essai sont rappelées dans le tableau V.7.

Tableau V.7 : Température *T*, humidité relative *HR* et conditions de l'essai FD-pers.

Nom de l'essai (FD : free dessiccation)	T (°C)	HR (%)	Conditions de support et du mouchetis
FD-pers	22.6	55.3	Mouchetis très dense + *S2-perspex*

La figure IV.19 présente la cartographie Vic2D de la déformation principale majeure ε_1 correspondante à la fin du séchage (t=165h). Deux zones critiques sont identifiées, elles sont encadrées et référenciés sous les noms *I-FD-pers* et *II-FD-pers*.

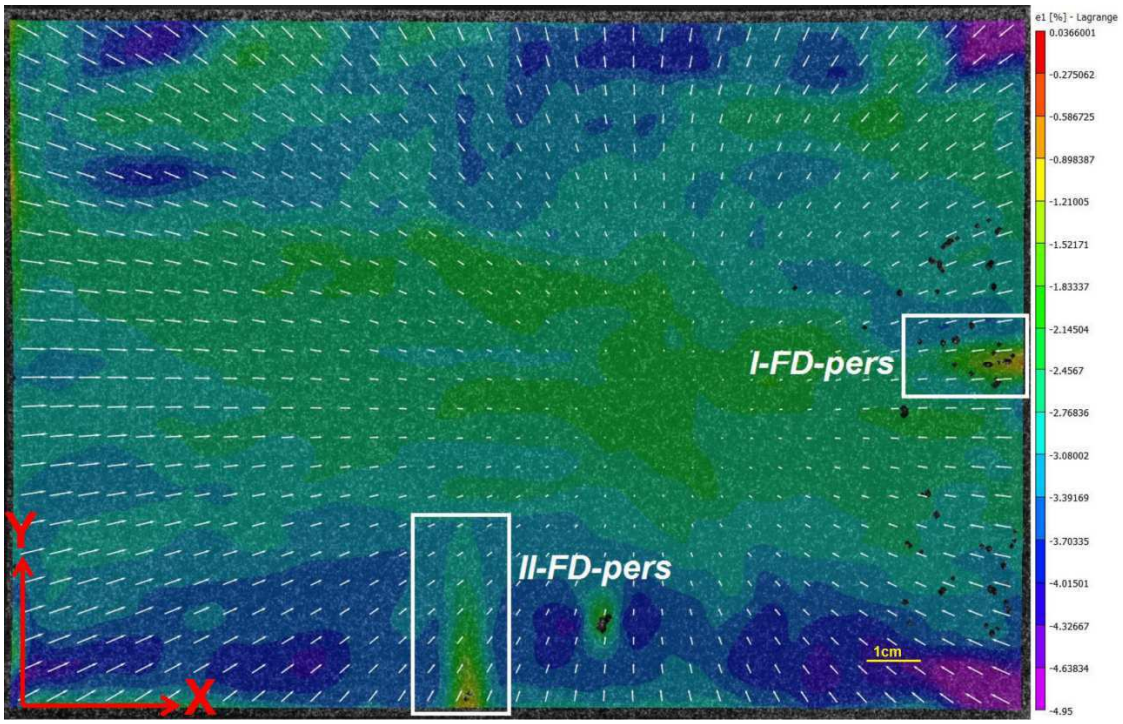


Figure V.19 : Déformation principale majeure ε_1 à la fin de séchage libre (t=165h, essai FD-pers).

a - Analyse de la fissuration par la CIN :

Une investigation locale détaillée est effectuée via les résultats de la CIN, obtenus par le calcul dont la référence a été fixée à la limite de retrait. Cette procédure, réalisée précédemment à dessiccation contrôlée lorsque les fissures se forment aux bords de l'échantillon, permet de limiter l'effet de la déformation de retrait (évaluée dans ce cas à ε_r = -7.4%).

La figure V.20 présente les évolutions de ε_{xx} et ε_{yy} à travers les cartographies Vic2D des deux zones respectivement *II-FD-pers* et *I-FD-pers* à différents temps de séchage.

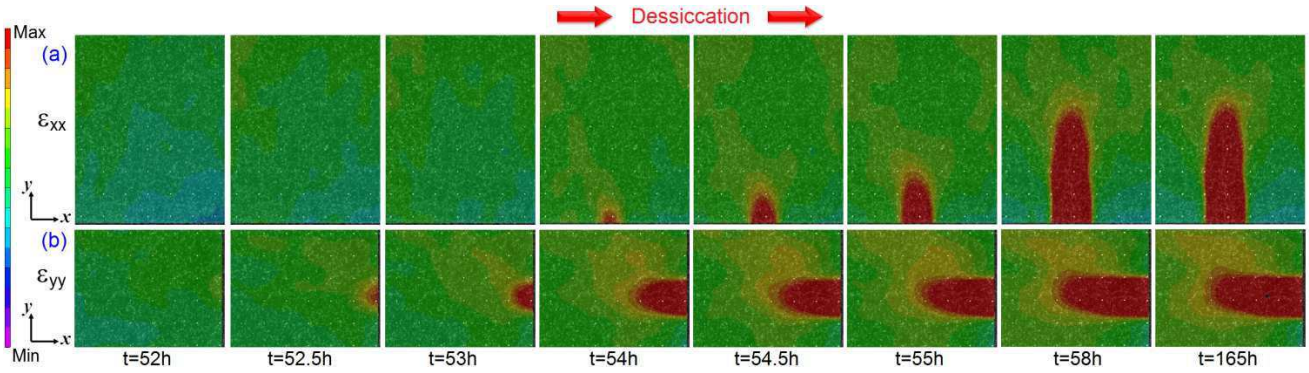


Figure V.20 : Déformations ε_{xx} et ε_{yy} respectivement dans les zones (a) *II-FD-pers* et (b) *I-FD-pers* à différents temps de séchage.

Nous avons reporté les caractéristiques correspondantes aux différentes cartographies Vic2D présentées ci-dessus dans le tableau V.8.

Tableau V.8 : Teneur en eau *w*, succion locale *s* et maximum et minimum de ε_{xx} et ε_{yy} respectivement dans les deux zones *II-FD-pers* et *I-FD-pers* à différents temps de séchage.

Temps	t=52h	t=52.5h	t=53h	t=54h	t=54.5h	t=55h	t=58h	t=165h
w (%)	2.27	2.11	1.98	1.8	1.73	1.65	1.5	1.35
s_{loc} (MPa)	7.1	7.15	7.22	7.25	7.26	7.27	7.32	9.35
Max. ε_{xx} (%)	0.636	0.656	0.668	0.698	0.71	0.724	0.83	0.88
Min. ε_{xx} (%)	-0.025	-0.025	-0.025	-0.025	-0.025	-0.025	-0.025	-0.025
Max. ε_{yy} (%)	0.806	0.816	0.818	0.844	0.848	0.86	0.882	0.884
Min. ε_{yy} (%)	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026

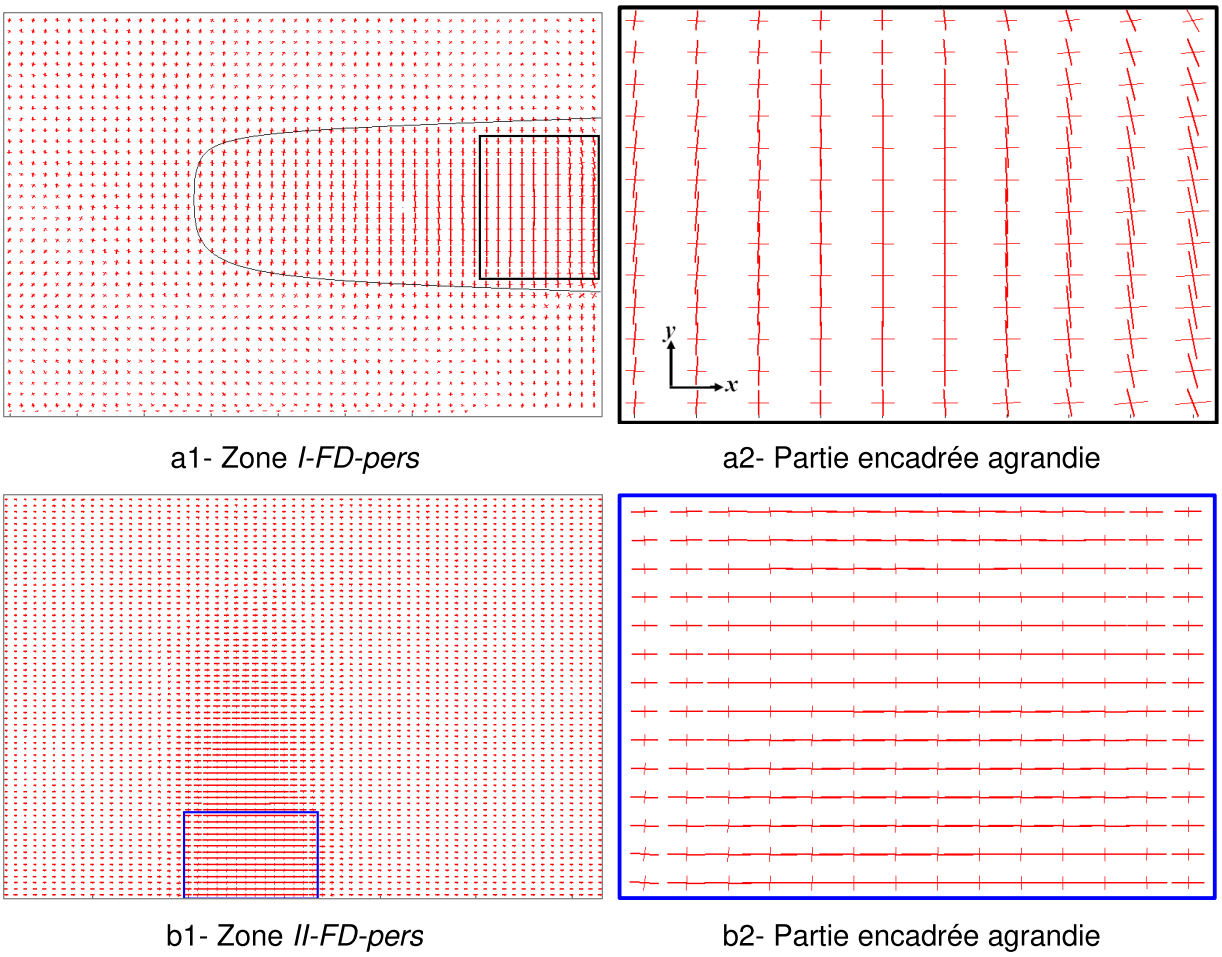
Dans la zone *I-FD-pers*, l'extension apparait à t=52.5h, lorsque ε_{yy} = +0.82%, suivant l'axe X en partant du bord. Celle-ci s'oriente vers l'intérieur de l'échantillon en conservant le même niveau d'intensité jusqu'à à la fin du séchage (t=165h). Notons que dans la partie en extension, l'ouverture de la fissure est très infime.

En parallèle, la déformation ε_{xx} commence à montrer des signes d'extension dans la seconde zone *II-FD-pers* à partir de t=54h (ε_{xx} = +0.7%). Dans ce cas, la fissure se développe suivant l'axe Y en partant du bord vers l'intérieur de l'échantillon. A la fin de séchage (t=165h), l'extension atteint une valeur de ε_{xx}= +0.88% sans ouverture notable de la fissure.

b - Analyse de la fissuration par les directions des déformations principales :

A la fin du séchage (t=165h), les résultats du calcul des déformations principales majeure et mineure dans les deux zones *I-FD-pers* et *II-FD-pers* sont illustrés sur la figure V.21 respectivement a1 et b1. Les parties du début des fissures (proches des bords) sont également agrandies et présentées à coté de chaque zone respectivement a2 et b2. Le contour de la fissure *I-FD-pers* est assez bien identifié (Fig. V.21 a1).

Nous constatons que, dans les deux cas, la direction de la fissure est perpendiculaire à l'extension principale caractérisée par les vecteurs de longueur élevée. Il s'agit donc d'une fissuration suivant le mécanisme d'ouverture par extension (mode I).



a1- Zone *I-FD-pers* a2- Partie encadrée agrandie

b1- Zone *II-FD-pers* b2- Partie encadrée agrandie

Figure V.21 : Déformations principales locales calculées à la fin de séchage (t=165h) dans les zones (a) *I-FD-pers* et (b) *II-FD-pers*.

V.1.3. Discussion

V.1.3.1 Dessiccation contrôlée - Influence de la succion globale imposée

L'analyse de la fissuration sur chemin de séchage contrôlé présentée dans la première partie de ce chapitre nous a permis d'identifier le mécanisme de fissuration, qui est principalement dû au mode d'ouverture par extension (mode I). Nous avons pu également identifier le phénomène de relaxation qui apparait dans certaines zones de l'échantillon.

Nous allons maintenant discuter et analyser l'apparition des fissures au centre de l'échantillon au cours du séchage en tentant d'introduire l'influence de la succion imposée.

a - Fissuration au centre de l'échantillon :

Les vitesses de séchage associées à chaque niveau de succion imposée sont rappelées sur la figure V.22 en fonction du temps. Ainsi, nous avons indiqué les positions des différentes

zones critiques par les symboles de couleur bleue. Ces dernières sont toutes localisées dans la partie comprise entre t_1 et t_2 où la vitesse de séchage associée est stabilisée.

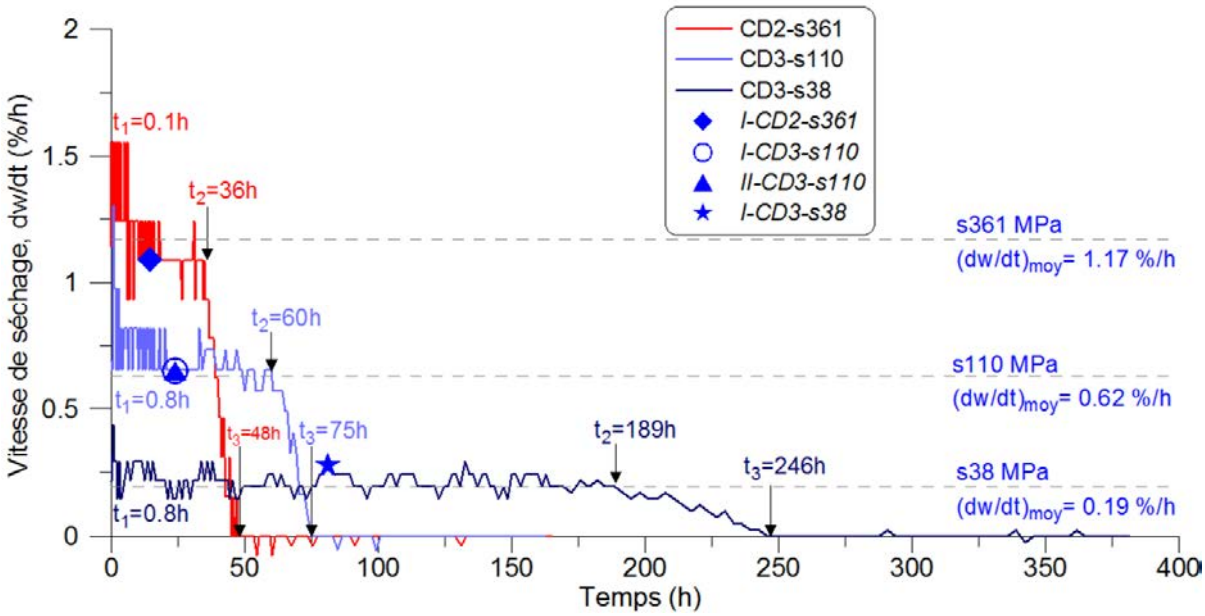


Figure V.22 : Vitesse de séchage à forte, moyenne et faible succion imposée en fonction de la teneur en eau.

Nous avons sélectionné sur la figure V.23 les distributions de ε_{xx} localisées dans les zones concernées par la fissuration au centre de l'échantillon.

Il s'agit des zones réparties selon le niveau de la succion imposée comme suit :

→ Forte succion : *I-CD2-s361* (Fig. V.23 a),

→ Moyenne succion : *I-CD3-s110* (Fig. V.23 b1) et *II-CD3-s110* (Fig. V.23 b2),

→ Faible succion : *I-CD3-s38* (Fig. V.23 c).

La "ligne max" est définie comme étant la ligne qui comporte les points sommets de ε_{xx} dans la zone étudiée à différents temps de séchage.

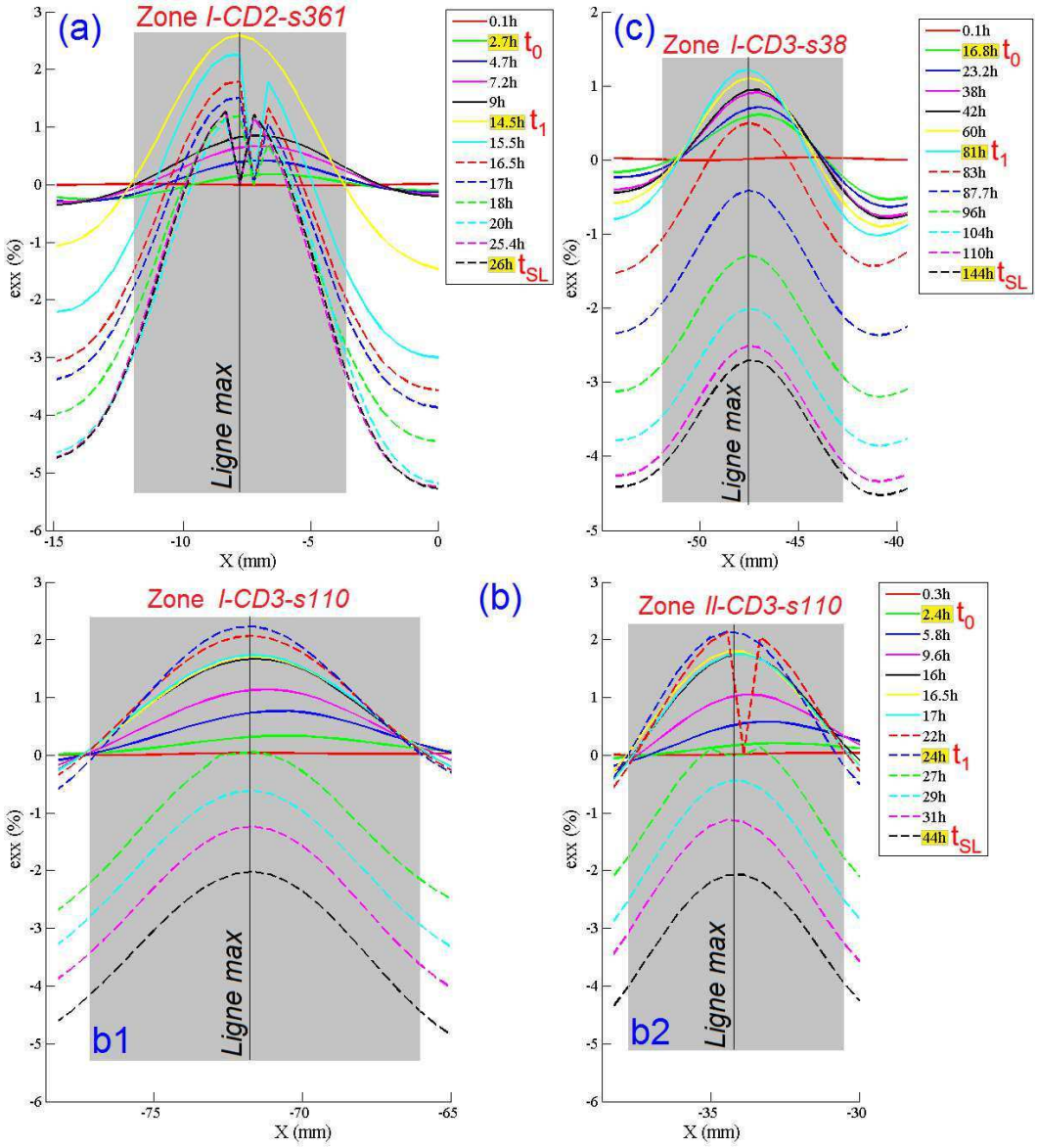


Figure V.23 : Distributions de ε_{xx} dans les zones au centre de l'échantillon (a) *I-CD2-s361*, (b) *I-CD3-s110* et *II-CD3-s110*, (c) *I-CD3-s38*.

Ensuite, 3 points (Fig. V.23) sont sélectionnés au début du séchage (t_0), au maximum de ε_{xx} (t_1) et à la limite de retrait (t_{SL}).

Nous avons reporté dans le tableau V.9 les valeurs de ε_{xx} correspondantes à ces 3 points définis dans chaque zone.

Tableau V.9 : Valeurs de ε_{xx} associées aux points t_0, t_1 et t_{SL} dans chaque zone.

Zones	***I-CD2-s361***		***I-CD3-s110***		***II-CD3-s110***		***I-CD3-s38***	
Points	t (h)	ε_{xx} (%)	t (h)	ε_{xx} (%)	t (h)	ε_{xx} (%)	t (h)	ε_{xx} (%)
t_0	2.7	+0.18	2.4	+0.33	2.4	+0.2	16.8	+0.61
t_1	14.5	+2.6	24	+2.26	24	+2.14	81	+1.25
t_{SL}	26	0	44	-2.01	44	-2.08	144	-2.72

Une représentation des valeurs données dans le tableau V.9 est effectuée sur la figure V.24 en fonction du temps.

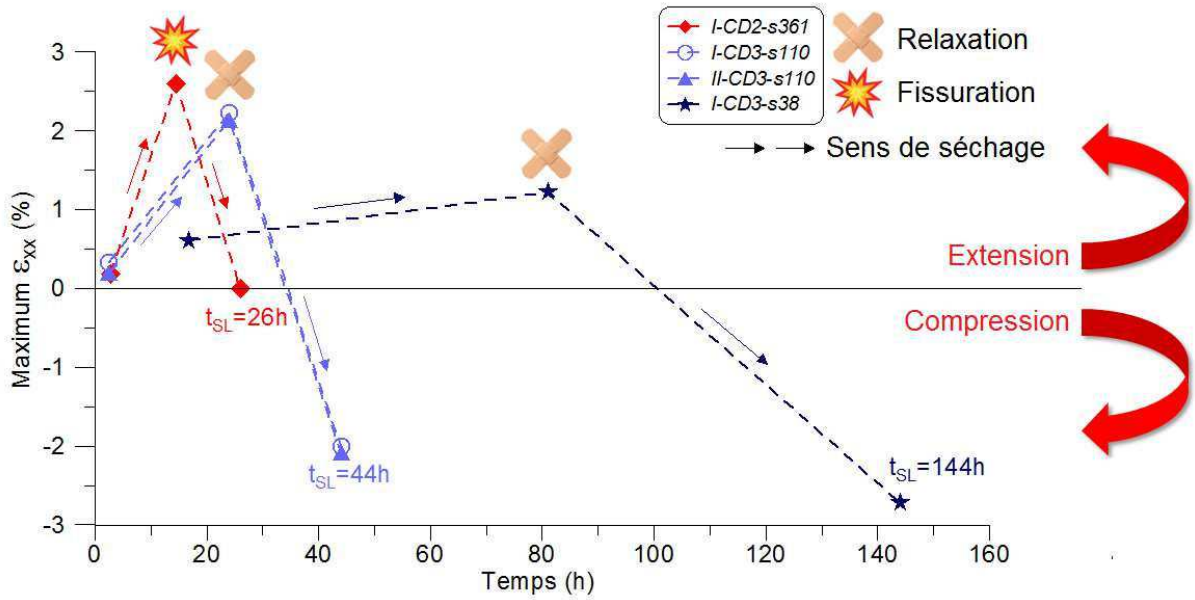


Figure V.24 : Représentation schématique des points t_0, t_1 et t_{SL} dans le plan [ε_{xx} - temps].

Au début de séchage, le point t_0 apparait en extension ($\varepsilon_{xx} > 0$) dans toutes les zones. Cela peut être lié à différentes causes dont de probables défauts de surface (formation de bulles d'air lors de la préparation de l'échantillon par exemple). Ainsi, ces zones sont susceptibles d'induire une fissuration durant au début de séchage. L'effet de la succion imposée peut être utilisé pour tenter d'expliquer les phénomènes obtenus dans chaque zone.

Tableau V.10 : Discussion sur l'effet de la succion imposée.

Niveaux	**Faible succion**	**Moyenne succion**	**Forte succion**
Zones	*I-CD3-s38*	*I-CD3-s110* et *II-CD3-s110*	*I-CD2-s361*
T (°C)	25.7	26	20.7
HR (%)	75.6	44.7	6.9
dw/dt (%/h)	0.19	0.62	1.17
Résultats	Relaxation	Relaxation	Fissuration

Le tableau V.10 permet de donner des éléments de comparaison entre les essais à différentes succions. Nous pouvons constater que la succion imposée joue un rôle important dans l'apparition des fissures durant la phase de retrait sur un chemin de séchage. A mesure que la succion imposée augmente, des fissures peuvent plus facilement se développer dans les zones en extension (mode I) après avoir atteint des déformations critiques. Celle identifiée à forte succion (*I-CD2-s361*) est égale à ε^{cr} = +2.6%.

b - Fissuration aux bords de l'échantillon :

Contrairement aux fissures qui se développent au centre de l'échantillon, où l'on peut observer des déformations en extension et en compression, les fissures localisées aux bords

de l'échantillon se créent alors que les déformations sont principalement en compression. Ceci a également été constaté dans les résultats obtenus dans Wei (2014).

Dans notre étude, la fissuration aux bords s'est amorcée à un stade avancé de séchage. Ceci peut être observé sur la figure V.24 où sont positionnés les temps de départ des différentes fissures. Les positions se situent entre t_2 et t_3 correspondant à la phase où la vitesse de séchage chute.

Ainsi, les déformations en compression dues au retrait sont très élevées et ne permettent pas de distinguer les faibles déformations en extension liées aux fissures. Pour cela, nous avons dû s'affranchir de la déformation de retrait et de considérer uniquement la déformation responsable de la fissuration selon l'équation suivante :

$$\begin{cases} \overline{\varepsilon}_{xx} = \varepsilon_{xx} - \varepsilon^{r}_{xx} \\ \overline{\varepsilon}_{yy} = \varepsilon_{yy} - \varepsilon^{r}_{yy} \end{cases} \quad [V.2]$$

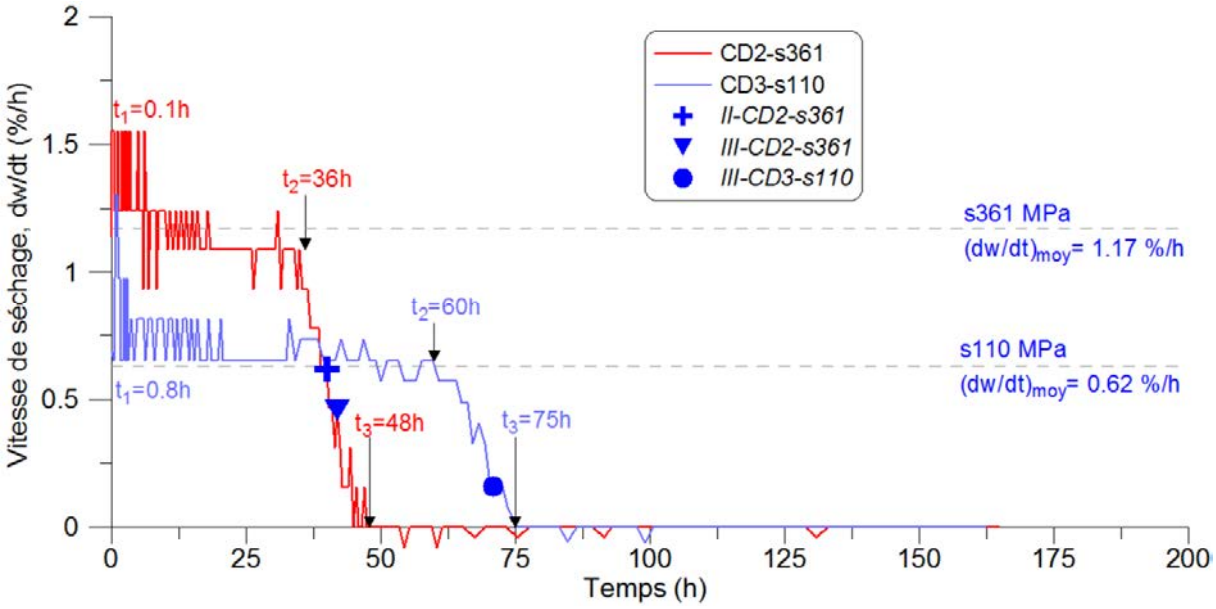


Figure V.25 : Fissuration aux bords de l'échantillon à différents niveaux de succion imposée.

Les fissures aux bords identifiées sont rassemblées sur la figure V.26 en fonction du niveau de succion imposée.

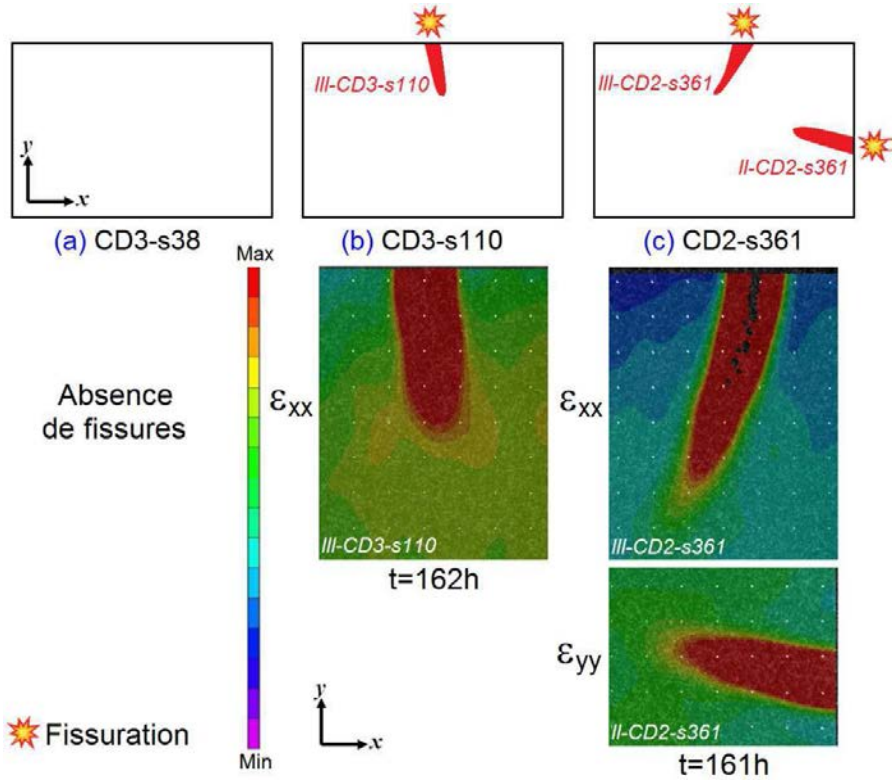


Figure V.26 : Fissuration aux bords de l'échantillon à différents niveaux de succion imposée.

La figure V.26 (a) à faible succion imposée ne présente aucune fissure. Une fissure partante du bord, de tendance parallèle à l'axe Y, s'est développée dans la zone *III-CD3-s110* à moyenne succion imposée (Fig. V.26 b). Enfin, ce sont deux fissures qui se forment depuis les bords à forte succion imposée (Fig. V.26 c), la première dans la zone *II-CD2-s361* suivant X et la seconde dans la zone *III-CD2-s361* suivant Y. Le mécanisme de fissuration identifié dans ces trois fissures est celui d'ouverture par extension (mode I).

Nous constatons une influence apparente de la succion imposée sur le développement de fissures aux bords de l'échantillon. A mesure que celle-ci augmente, des fissures s'amorcent à partir des bords et se propagent vers l'intérieur de l'échantillon. D'une part, ce résultat est concordant avec celui obtenu ci-dessus concernant les fissures au centre. D'autre part, les niveaux de déformations en extension sont faibles comparés à ceux enregistrés aux fissures du centre :

- Fissure dans la zone *III-CD3-s110* : $\overline{\varepsilon}_{xx}$ = [+0.71 à +0.77] %

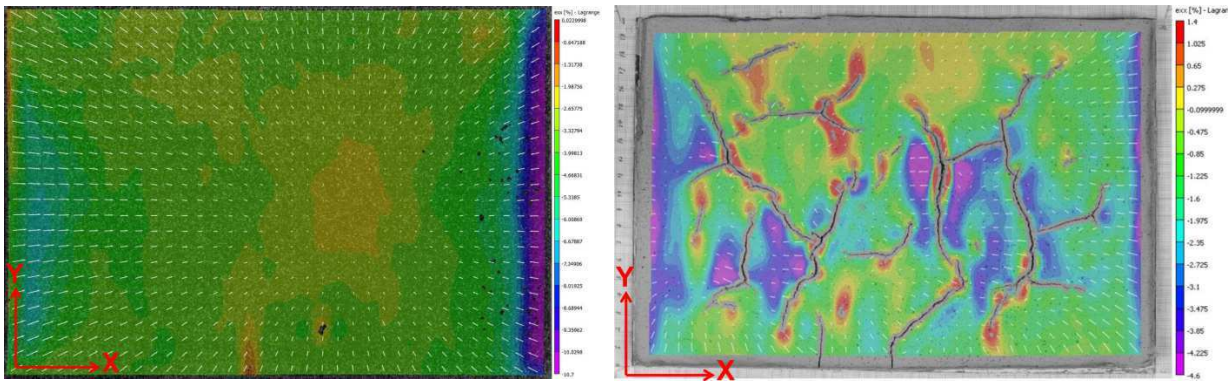
- Fissures dans les zones *II-CD2-s361* et *III-CD2-s361* : respectivement $\overline{\varepsilon}_{yy}$ = [+0.61 à +0.86] % et $\overline{\varepsilon}_{xx}$ = [+0.72 à +1.37] %.

Les limites de l'intervalle des valeurs correspondent à l'extension au moment de l'amorçage de la fissure et l'extension à la fin de séchage.

V.1.3.2 Fissuration - comparaison entre chemins de séchage libre et contrôlé

La fissuration sur chemins de dessiccation libre parait plus complexe car on ne contrôle pas les paramètres de température d'humidité relative.

La figure V.27 présente les différences pouvant exister entre les résultats de séchage à différentes conditions. Nous avons d'une part l'essai FD-pers, que nous avons réalisé (séchage libre sur un support en perspex) et l'essai obtenu par Wei (2014) où l'état initial (w = w_L), la période dans l'année et le lieu sont les éléments qui différencient les deux essais.



(a) FD-pers à la fin du séchage (t=165h) (b) Kaolin P300 au cours du séchage (t=9h)

Figure V.27 : Cartographies Vic2D de ε_{xx} sur chemins de séchage libre : comparaison entre (a) cette étude, (b) résultats de Wei (2014) sur le même type de matériau.

Les deux essais de la figure V.27 montrent des phénomènes très différents. Le cas (a), pris à la fin du séchage, montre quelques rares fissures aux bords de l'échantillon. Le cas (b) montre la formation d'un réseau de fissures dense, avec des zones en extension allant jusqu'à ε_{xx}= +1.4%, dès 9h de séchage.

L'essai FD-pers a été répété dans différentes conditions, en variant les paramètres comme la teneur en eau initiale, la confection de la boue par exemple. Nous n'avons pas réussi à reproduire un réseau de fissures aussi dense que celui de Wei (2014).

Nous allons maintenant tenter de confronter la fissuration lors d'un essai de séchage libre (FD-pers) avec celle obtenue sous dessiccation contrôlée à forte succion (CD2-s361). Le séchage à succion imposée se déroule dans une chambre confinée de 54 L de volume où il est possible de maitriser les paramètres hydriques.

La figure V.28 présente les caractéristiques hydriques des deux chemins en termes de variations de la teneur en eau (w) et de l'humidité relative (HR) en fonction du temps.

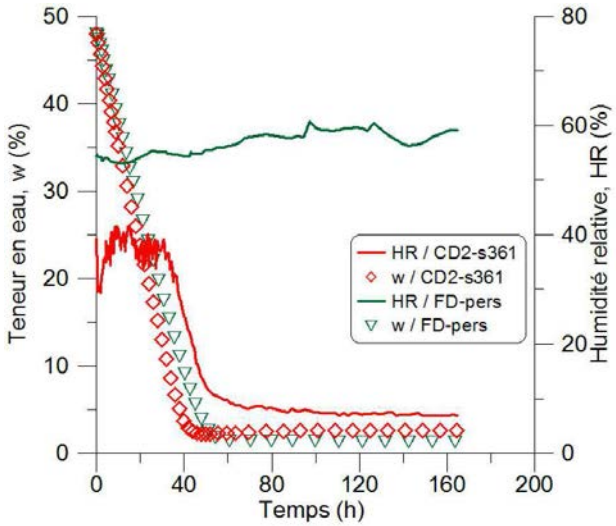


Figure V.28 : Caractéristiques hydriques des deux chemins FD-pers et CD2-s361 dans les plans [w - t] et [HR - t].

Le temps correspondant au début des fissures est indiqué sur les courbes de vitesse de séchage de la figure V.29. Dans les deux cas, les fissures se développent lorsque la vitesse de séchage diminue (entre t_2 et t_3).

Ces courbes montrent des vitesses de séchage proches (Fig. V.29), malgré des niveaux d'humidité relative très différents. Les évolutions de perte de masse sont quasi-similaires.

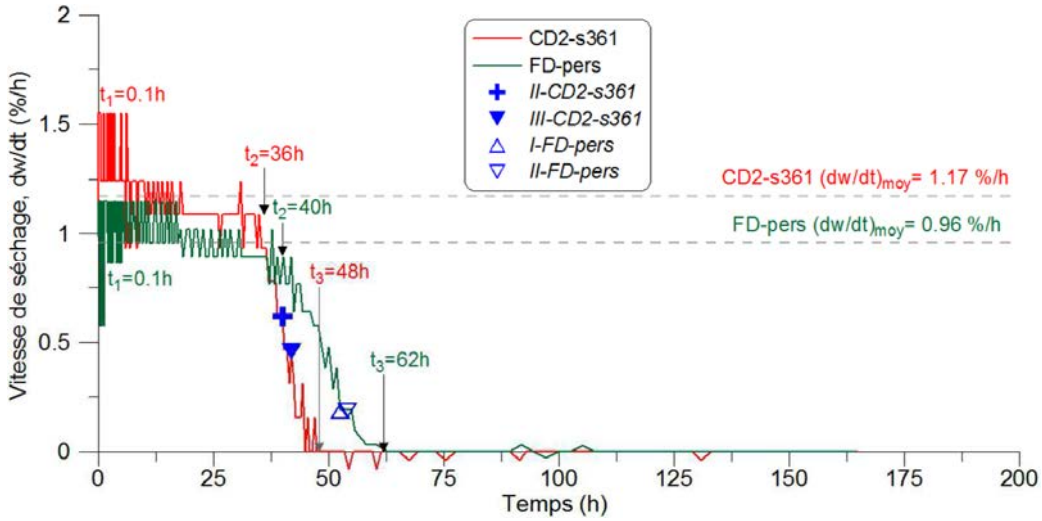


Figure V.29 : Localisation des temps de début des fissures sur les courbes [dw/dt - w] des deux chemins FD-pers et CD2-s361.

Les résultats de fissuration obtenus sur les deux chemins de séchage sont présentés sur la figure V.30. A la fin du séchage, les déformations ε_{xx} et ε_{yy} montrent deux fissures aux bords de l'échantillon dans les deux cas (a) et (b).

Le mécanisme de fissuration identifié est celui d'ouverture par extension (mode I). Les valeurs des déformations en extension au voisinage de chaque fissure sont reportées dans le tableau V.11.

Tableau V.11 : Valeurs d'extension dans les différentes zones entre l'amorçage de la fissure et la fin du séchage.

Niveaux	**FD-pers**		**CD2-s361**	
Zones	*I-FD-pers*	*II-FD-pers*	*II-CD2-s361*	*III-CD2-s361*
ε_{xx} (%)	-	+0.7 à +0.88	-	+0.72 à +1.37
ε_{yy} (%)	+0.82 à +0.88	-	+0.61 à +0.86	-

Les niveaux des déformations en extension sont comparables entre les différentes fissures suivant ε_{xx} et ε_{yy} séparément. Ainsi, les valeurs d'extension favorables à la formation des fissures dans CD2-s361 (ε_{xx}= +0.72% et ε_{yy}= +0.61%) sont proches de celles de FD-pers (ε_{xx}= +0.7% et ε_{yy}= +0.82%). Ceci est lié à la déformation critique qui fera l'objet de la discussion prévue dans la troisième partie de ce chapitre.

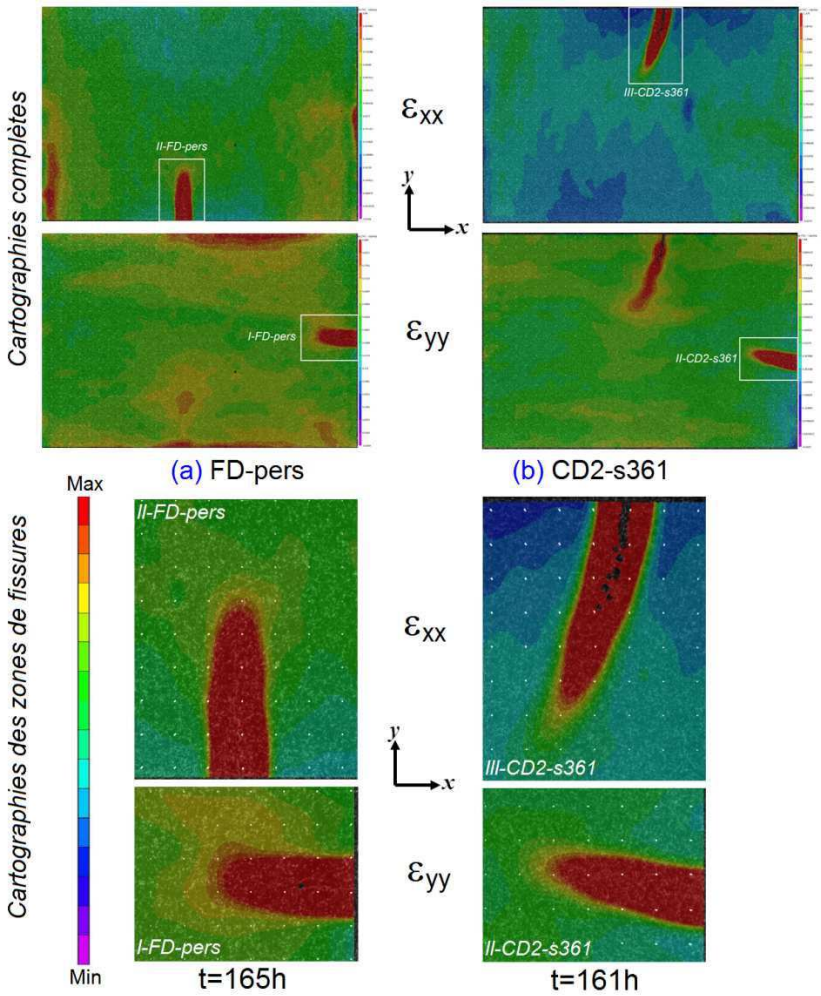


Figure V.30 : Fissuration sur chemins de séchage libre et contrôlé : (a) FD-pers, (b) CD2-s361.

Nous pouvons constater à travers cette analyse, qu'à partir d'un chemin de séchage libre, nous avons abouti à un même schéma de fissuration que celui d'un chemin de séchage contrôlé. Ainsi, la fissuration apparait comme largement influencée par la cinétique du séchage. Par conséquent, au-delà d'une certaine valeur de la déformation, qu'on appellera "déformation critique", les fissures s'amorcent et se développent.

V.2. Poutrelles sous traction indirecte par flexion

V.2.1. Analyse du comportement global

A travers la sollicitation de traction indirecte par flexion sur des poutrelles d'argile, soumises à une succion initiale imposée, nous allons tenter de comprendre le mécanisme de rupture obtenu sous chemins de séchage contrôlé (partie V.1.1 de ce chapitre). Il s'agit du mécanisme d'ouverture par extension (mode I) pour lequel nous allons analyser les déformations en extension et les contraintes de traction σ_t qui favorisent l'apparition de la fissuration.

V.2.1.1 Caractéristiques des poutrelles et des essais réalisés

La figure V.31 illustre l'état de la poutrelle (35×10×10 mm^3) soumise à une sollicitation de traction indirecte par flexion. Nous pouvons distinguer, après application de la charge F, deux zones caractérisées par une fibre supérieure comprimée et une fibre inférieure tendue. Cette dernière nous intéresse plus particulièrement à partir de laquelle la fissure s'amorce à la rupture.

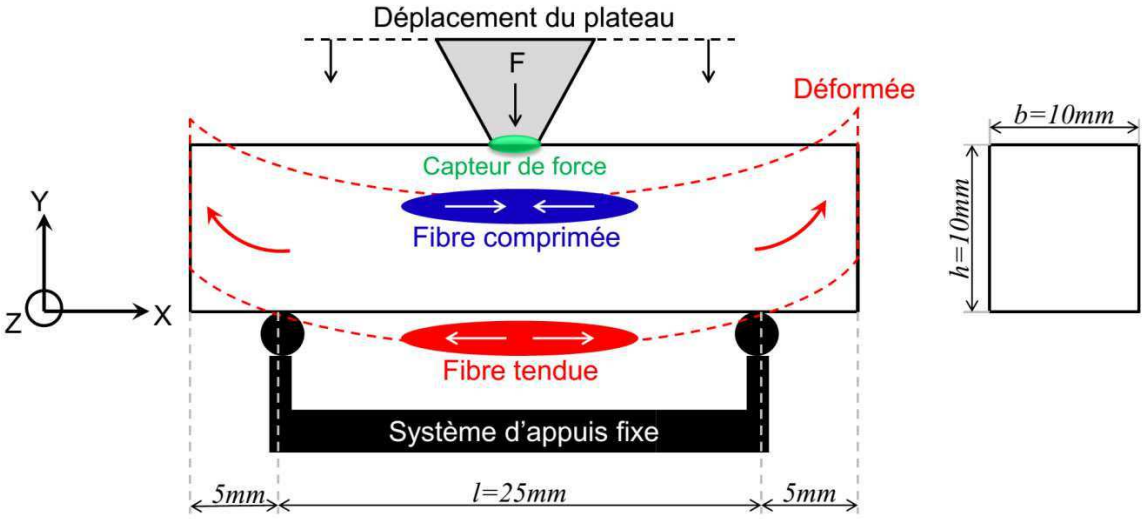


Figure V.31 : Représentation schématique de la déformée d'une poutrelle d'argile sous traction indirecte par flexion.

Remarque : la flexion appliquée dans ce cas est proche de la flexion 3 points. Pour des raisons de faisabilité, un contact ponctuel entre la charge F et la surface supérieure de la poutrelle entrainerait la destruction du capteur de force. Pour cela, nous avons assuré en ce point un contact surfacique sous forme de bande de 3 mm de largeur.

Les poutrelles sont soumises à différents niveaux de succion initiale suivant la méthode détaillée dans le chapitre II (partie II.6.2). La nomenclature et les caractéristiques des essais réalisés sont reportées dans le tableau V.12. Il s'agit de 4 poutrelles différentes, numérotées de 1 à 4 avec 2 poutrelles verticales et 2 poutrelles horizontales, pour chaque niveau de succion imposée.

Tableau V.12 : Nomenclature et caractéristiques des essais de traction indirecte par flexion.

Niveaux imposés		Faible succion (38 MPa)	Moyenne succion (110 MPa)	Forte succion (361 MPa)
Noms des essais	Plan vertical "V"	Flex1-s38$_V$	Flex1-s110$_V$	Flex1-s361$_V$
		Flex2-s38$_V$	Flex2-s110$_V$	Flex2-s361$_V$
	Plan horizontal "H"	Flex3-s38$_H$	Flex3-s110$_H$	Flex3-s361$_H$
		Flex4-s38$_H$	Flex4-s110$_H$	Flex4-s361$_H$
HR (%)		75.6	44.7	6.9
dw/dt (%/h)		0.14	0.4	0.61
w_f (%)		8.15	6.3	4.5

→ L'indication "V" et "H" dans la nomenclature des essais désigne le plan dans lequel sont découpées les poutrelles dont le schéma est illustré sur la figure V.32. Pour cela, nous avons adopté un code couleur afin de distinguer la poutrelle horizontale (rouge), la poutrelle verticale (turquoise clair) et le sens du chargement en flexion "F" (bleu).

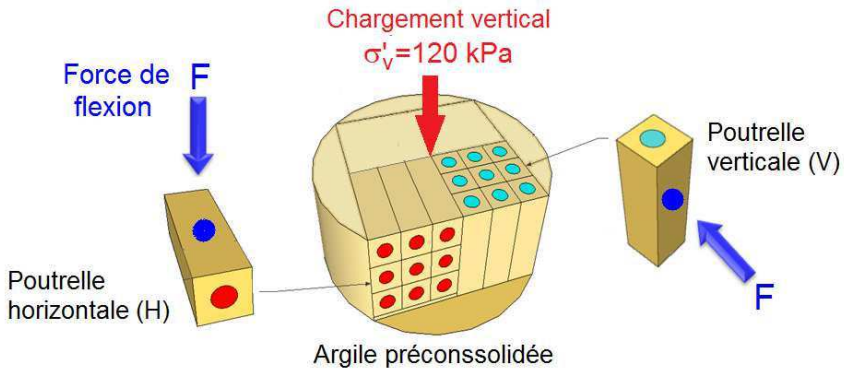


Figure V.32 : Méthode de découpe des poutrelles suivant les plans horizontal et vertical.

Remarque : toutes les poutrelles, suivant les deux plans vertical et horizontal, ont été découpées à partir de la même carotte d'argile préconsolidée sous σ'_v = 120kPa.

→ La vitesse de séchage (dw/dt) est déduite à partir des évolutions de la teneur en eau en fonction de temps, sous chaque succion imposée avant l'étape de stabilisation. La méthode de calcul adoptée est décrite en chapitre II (partie II.6.2, section 2). Ces courbes sont rappelées sur la figure V.33.

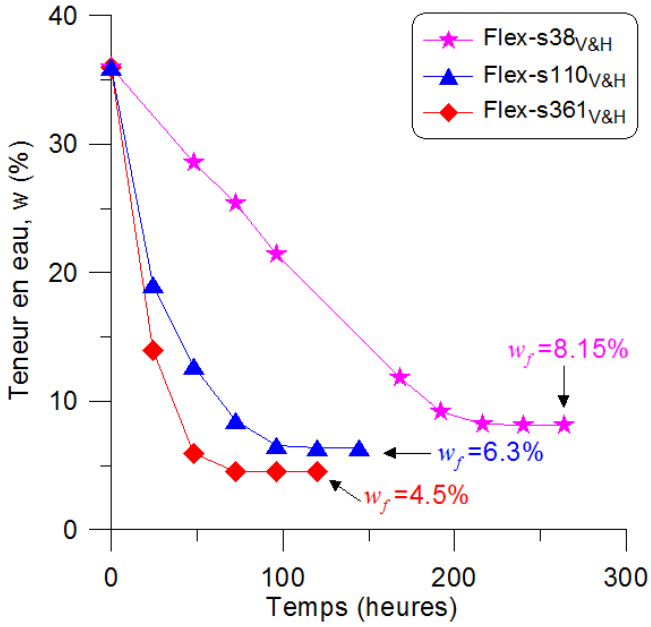


Figure V.33 : Variations de la teneur en eau des poutrelles en fonction du temps sous succion.

Les résultats montrent que la vitesse de séchage des poutrelles dépend de la succion initiale. Elle est élevée à forte succion avec 0.61 %/h. D'autre part, les courbes apparaissent stabilisées à l'équilibre où la teneur en eau finale atteinte, notée w_f, est influencée par la succion initiale. La valeur de w_f correspond à celle des poutrelles au moment de réaliser les essais de flexion.

V.2.1.2 Résultats du comportement global

La contrainte de traction σ_t est calculée selon la méthode de la "flexion élastique", proposée dans Ajaz and Parry (1975b) (chapitre I, partie I.3.4.3), basée sur les hypothèses suivantes :

- les sections planes restent planes après la flexion,

- le module de Young du matériau de la poutrelle a la même valeur en traction et en compression. Ainsi, les contraintes en traction σ_t et en compression σ_c sont identiques,

- la contrainte est linéairement proportionnelle à la déformation,

- il n'y a pas de fluage pendant la flexion.

A partir de ces hypothèses, nous pouvons écrire l'équation de la contrainte de traction :

$$\sigma_t = \sigma_c = \frac{M_f . v}{I_x} \qquad [V.4]$$

Avec :

→ $M_f = \frac{F.l}{4}$, le moment fléchissant calculé en fonction de la force appliquée F et la longueur l de la poutrelle entre-appuis.

→ $I_x = \frac{b.h^3}{12}$, le moment d'inertie par rapport à l'axe neutre de la poutrelle calculé à partir de la largeur b et la hauteur h de cette dernière.

→ ν est la distance de la fibre tendue de l'axe neutre de la poutrelle.

En supposant que l'axe neutre de la poutrelle est médian (ν = h/2) et en remplaçant le moment d'inertie dans l'équation V.4, la contrainte de traction s'écrit :

$$\sigma_t = \frac{6M_f}{b.h^2} \qquad [V.5]$$

D'autre part, nous avons calculé la contrainte de traction à partir du rapport de la force appliquée F sur la surface chargée S (3×10 mm^2) au niveau du contact plateau/poutrelle illustrée sur la figure V.34 (a).

$$\sigma_t = \frac{F}{S} \qquad [V.6]$$

La figure V.34 (b) présente les évolutions de la contrainte de traction σ_t calculée par les deux équations V.5 et V.6 (bis) en fonction du déplacement Δl imposé au plateau supérieur du mécanisme d'essai (Fig. V.34 a). Les trois essais sont réalisés à différents niveaux de succion initiale (Flex1-s361, Flex1-s110 et Flex1-s38).

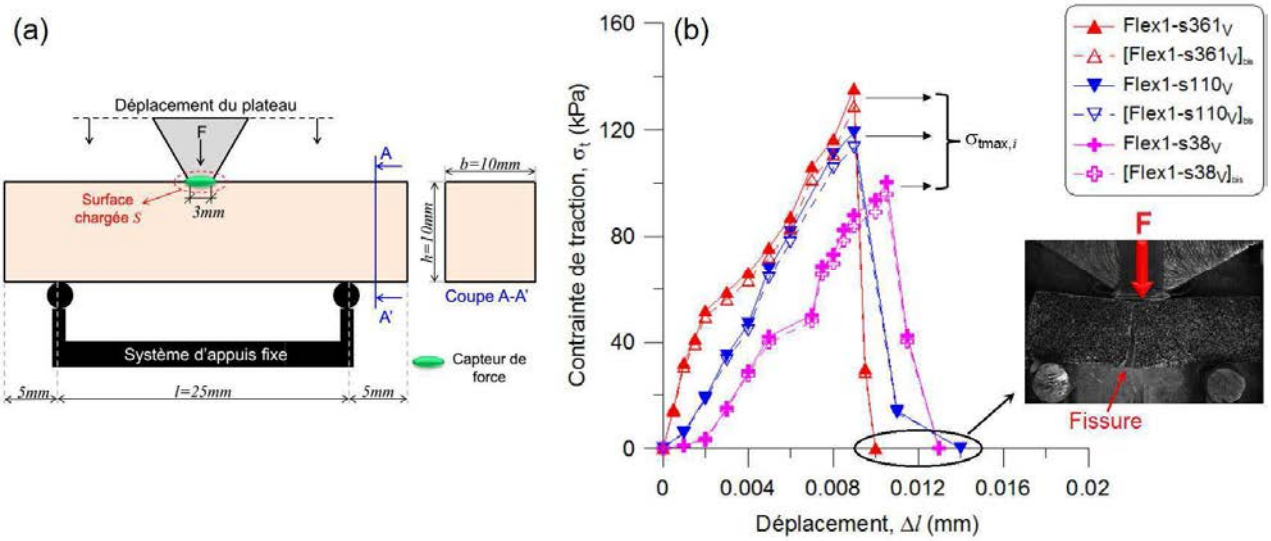


Figure V.34 : Comportement global : (a) représentation schématique de la poutrelle sous flexion (b) évolution de la contrainte de traction en fonction du déplacement pour les essais : Flex1-s361, Flex1-s110 et Flex1-s38.

Pour l'ensemble des essais, la vitesse du déplacement est de 10^{-3} mm/min. Les résultats montrent que σ_t, calculée par les deux équations V.5 et V.6 (bis), présente des évolutions très proches (écart moyen de 5 kPa à $\sigma_t = \sigma_{tmax}$) à différents niveaux de succion. Pour cela, nous allons considérer l'équation V.5 pour l'estimation de σ_t dans la suite de cette partie.

D'autre part, σ_t atteint une valeur maximale, notée σ_{tmax}, qui correspond à la résistance maximale à la traction de la poutrelle. Nous pouvons constater que la valeur de σ_{tmax} dépend de la succion initiale qui augmente à mesure que celle-ci est élevée. Au-delà de cette valeur ($\sigma_t > \sigma_{tmax}$), la contrainte de traction chute brutalement jusqu'à s'annuler.

Nous avons reporté sur la figure V.35 les courbes [σ_t - Δl] et [F - Δl] séparément pour chaque niveau de succion initiale. Les résultats montrent des tendances d'évolution similaires entre les courbes contrainte/déplacement et de force/déplacement.

Remarque : au début du chargement, certaines courbes démarrent avec des valeurs de σ_t nulles probablement dues au non-contact entre le capteur et la poutrelle (Fig. V.31).

Le tableau V.13 présente les valeurs de σ_{tmax} de tous les essais pour chaque niveau de succion initiale.

Tableau V.13 : Valeurs de la contrainte de traction maximale σ_{tmax} pour tous les essais.

Niveaux imposés	**Faible succion (38 MPa)**		**Moyenne succion (110 MPa)**		**Forte succion (361 MPa)**	
Plan vertical	Flex1-s38$_V$	Flex2-s38$_V$	Flex1-s110$_V$	Flex2-s110$_V$	Flex1-s361$_V$	Flex2-s361$_V$
σ_{tmax} (kPa)	100.4	105.4	119	120.5	135.4	128.5
Plan horizontal	Flex3-s38$_H$	Flex4-s38$_H$	Flex3-s110$_H$	Flex4-s110$_H$	Flex3-s361$_H$	Flex4-s361$_H$
σ_{tmax} (kPa)	97.1	83	109	110.5	91	90.4

- A faible succion initiale, la figure V.35 (a1) montre des évolutions progressives de la contrainte de traction à mesure que le déplacement imposé augmente. L'augmentation de σ_t s'effectue d'une manière plus au moins linéaire jusqu'à atteindre σ_{tmax} dans chaque plan (V et H) excepté l'essai Flex4-s38$_H$. Dans ce cas, l'évolution de σ_t se fait en trois stades. Le premier est marqué par une variation linéaire. Puis, la courbe change de direction et atteint un palier. Ensuite, l'augmentation repart avec une pente plus importante dans la troisième partie jusqu'à σ_{tmax}. Il est possible que ce résultat soit dû à des difficultés expérimentales. L'écart moyen des valeurs de σ_{tmax} entre les plans vertical et horizontal ($\sigma_{tmax,\ V\text{-}moy}$ - $\sigma_{tmax,\ H\text{-}moy}$) est généralement très faible et égale à 5.8 kPa.

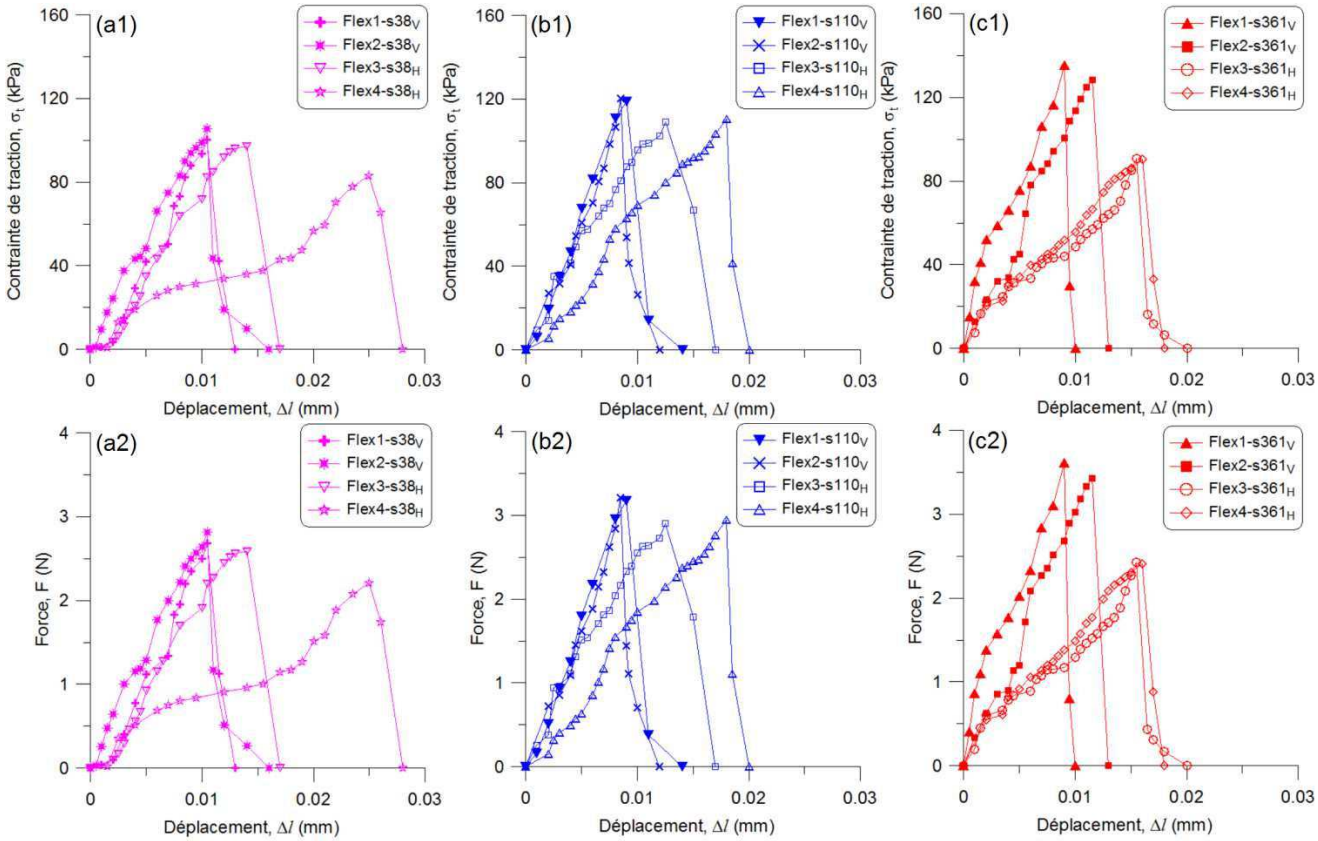


Figure V.35 : Evolution de la contrainte de traction en fonction du déplacement : (a) faible succion, (b) moyenne succion, (c) forte succion, (d) tous les essais.

- A moyenne succion initiale, les courbes de la figure V.35 (b1) évoluent suivant une variation linéaire de σ_t jusqu'à σ_{tmax} pour les 4 essais. Dans le plan vertical, les pentes des deux courbes Flex1-s110$_V$ et Flex2-s110$_V$ sont similaires. En revanche, dans le plan horizontal, les pentes des deux courbes Flex3-s110$_H$ et Flex4-s110$_H$ sont légèrement différentes mais atteignent des valeurs très proches de σ_{tmax} (tableau V.13). Ainsi, l'écart moyen entre les plans vertical et horizontal en termes de σ_{tmax} est de 10 kPa.

- A forte succion initiale (Fig. V.35 c1), on peut observer un comportement global similaire à celui identifié dans le cas précédent. σ_t augmente avec le déplacement jusqu'à σ_{tmax}. Les pentes des courbes sont très proches dans les plans verticaux, et également dans les plans horizontaux. Cependant, l'écart moyen de σ_{tmax} entre ces deux plans V et H s'élève à 41.2 kPa.

Les valeurs du tableau V.13 montrent que la répétabilité entre les essais 1 et 2 dans le plan vertical et entre 3 et 4 dans le plan horizontal, pour chaque niveau de succion initiale, est globalement satisfaisante. L'écart le plus élevé (14.1 kPa) est obtenu entre les essais flex3-s38$_H$ et flex4-s38$_H$.

- Sur les figures V.35 (a2, b2 et c2), les courbes sont reportées dans le plan [F - Δl] présentent des tendances d'évolutions similaires à celles obtenues dans le plan [σ_t - Δl] à différents niveaux de succion initiale.

→ Comparaison des valeurs de σ_{tmax} entre les plans vertical et horizontal :

Les résultats exposés ci-dessus montrent des valeurs de σ_{tmax} supérieures dans les poutrelles verticales comparées aux poutrelles horizontales à chaque niveau de succion imposée. Nous pouvons constater cela dans le tableau V.13 où sont reportées les valeurs de σ_{tmax} de tous les essais.

En effet, l'écart moyen entre les valeurs de σ_{tmax} dans les deux plans vertical et horizontal tend à augmenter à mesure que la succion initiale est élevée. Il passe de 5.8 kPa à faible succion à 10 kPa à moyenne succion puis s'élève à 41.2 kPa à forte succion.

L'argile a subie une préconsolidation initiale à σ'_v =120kPa, de compression unidimensionnelle. Ceci peut provoquer une orientation des particules vers le plan horizontal, perpendiculaire à la direction de la contrainte verticale appliquée. Puis, soumettre les poutrelles découpées, à partir de cette carotte d'argile préconsolidée (Fig. V.32), aux différents niveaux de succion induit le rapprochement des particules. Ainsi, plus la succion est élevée, plus les particules s'attirent ce qui augmente la résistance à la traction suivant le plan vertical et la réduit suivant le plan horizontal.

V.2.2. Identification du comportement local par la CIN (Vic2D)

Dans cette partie, nous allons analyser les déformations locales, obtenues par la CIN, principalement à la rupture de la poutrelle afin de mettre en évidence le comportement local à cet instant. Pour cela, un essai est choisi à chaque niveau de succion imposée et dans chaque plan (V et H) pour le traitement. Les cartographies Vic2D des déformations locales non illustrées dans cette partie sont présentées en annexe 4.1.

V.2.2.1 Faible succion (38 MPa)

A faible succion imposée, nous avons choisi deux essais suivant les plans vertical (flex1-$s38_V$) et horizontal (flex3-$s38_H$) dont les courbes [σ_t - Δl] sont reportées sur la figure V.36.

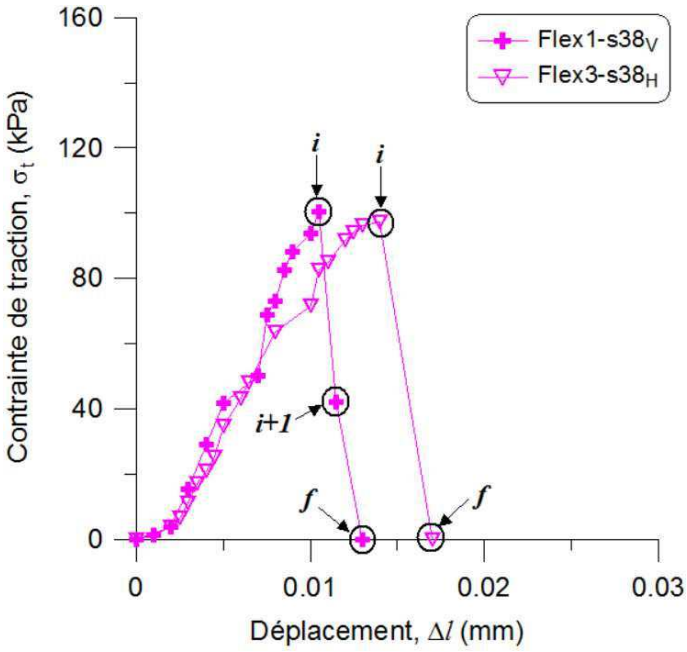


Figure V.36 : Contrainte de traction en fonction du déplacement dans les deux essais flex1-s38$_V$ et flex3-s38$_H$.

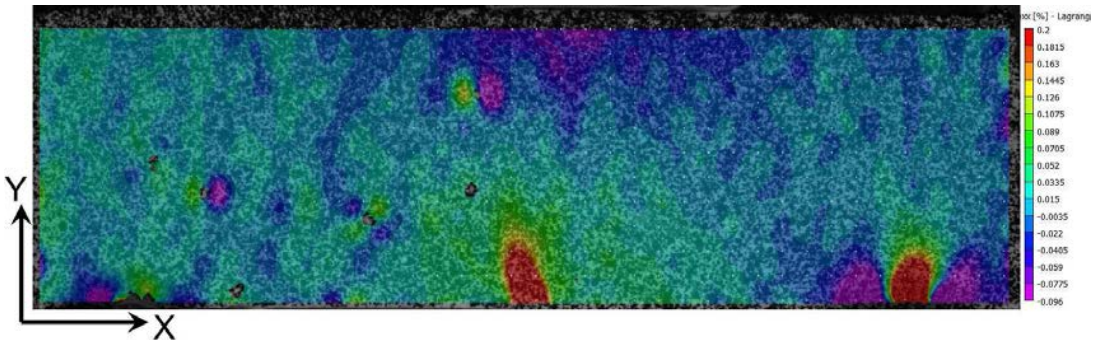
Les positions sur lesquelles le traitement sera effectué sont indiquées sur la figure V.36 par les notations i ($\sigma_t = \sigma_{tmax}$), $i+1$ et f (fin de l'essai).

a- Résultats suivant le plan vertical :

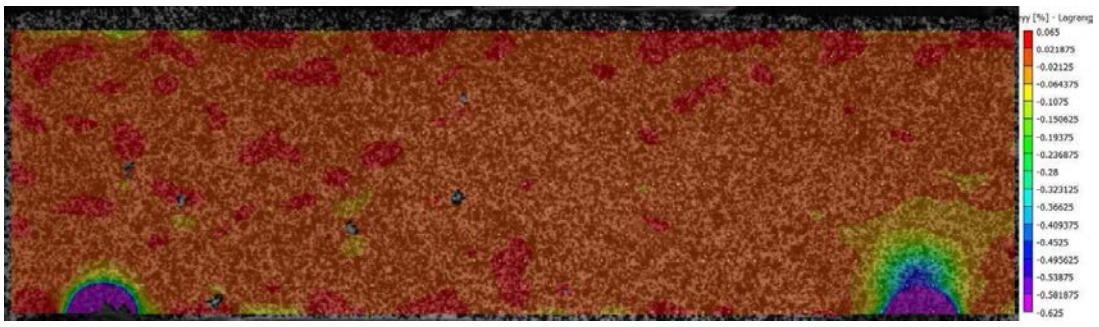
La figure V.37 présente les cartographies Vic2D des déformations locales ε_{xx}, ε_{yy} et ε_{xy} obtenues à la position i (σ_{tmax} = 100.4 kPa) dans l'essai flex1-s38$_V$.

Les valeurs de ε_{xx} (Fig. V.37 a) sont comprises en une maximale positive ε_{xx}= +0.2% et une minimale négative ε_{xx}= -0.096%. Ces valeurs extrêmes sont enregistrées respectivement dans la zone tendue (inférieure) et la zone comprimée (supérieure) de la poutrelle. Au niveau de la fibre tendue, le bulbe de la déformation en extension, favorable à l'amorçage de la fissure, apparait clairement à ce stade de chargement.

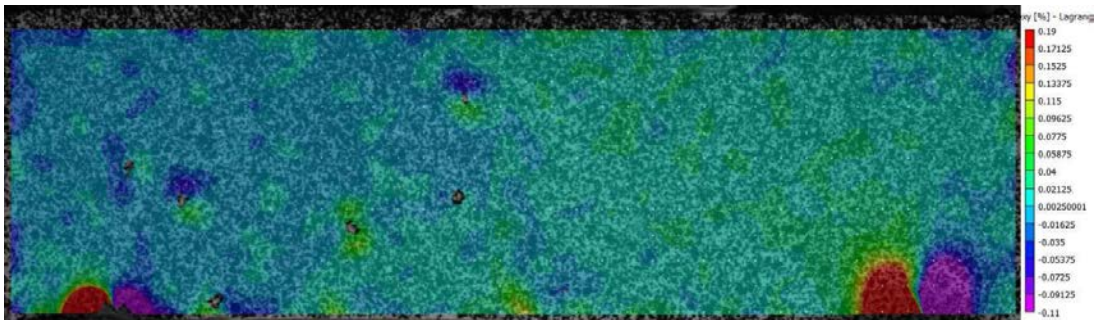
Sur la figure V.37 (b), la valeur maximum positive de ε_{yy} est +0.065% et la valeur minimum négative vaut -0.625% concentrée autour des positions d'appuis. Pour la déformation de cisaillement ε_{xy} (Fig. V.37 c), les valeurs extrêmes positive et négative, respectivement ε_{xy}= +0.19% et ε_{xy}= -0.11%, sont localisées au niveau des appuis. La poutrelle en kaolin k13 est très friable à ces niveaux de teneur en eau ce qui induit la compression des zones au contact des appuis et ainsi accentue la déformation de cisaillement.



(a) - Déformation longitudinale ε_{xx}



(b) - Déformation transversale ε_{yy}



(c) - Déformation de cisaillement ε_{xy}

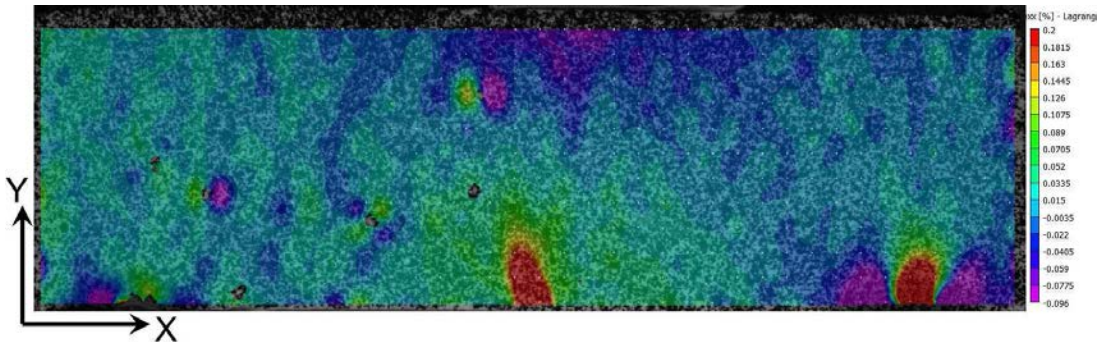
Figure V.37 : Cartographies Vic2D des déformations locales dans la poutrelle flex1-s38V à la position *i* du chargement.

A partir de ces résultats, nous pouvons constater que l'apparition de la fissure est favorable suivant ε_{xx} dans la zone tendue de la poutrelle. En absence de déformation ε_{yy} importante dans cette zone, cela signifie qu'il s'agit du mécanisme d'ouverture par extension (mode 1). Ainsi, nous allons focaliser notre analyse locale suivant ε_{xx}.

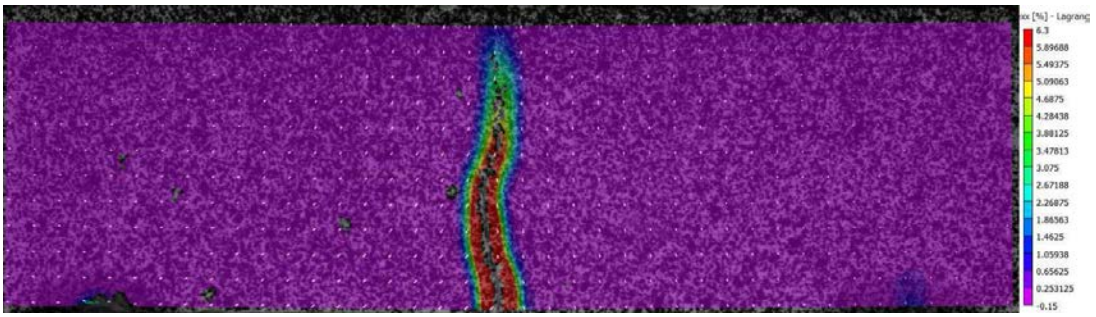
La figure V.37 présente l'état de déformation ε_{xx} à l'amorçage et la propagation de la fissure dans la zone tendue aux différentes positions *i*, *i+1* et *f* de la courbe [σ_t - Δl] (Fig. V.36).

A $\sigma_t = \sigma_{tmax}$ correspondant à la position *i* (Fig. V.38 a), le bulbe s'est formé où l'extension est maximale à ε_{xx}= +0.2%. Puis, sur la position suivante *i+1* (Fig. V.38 b), la fissure s'amorce en mode I dans la zone du bulbe suivant la largeur de la poutrelle où l'extension augmente à ε_{xx}= +6.3%.

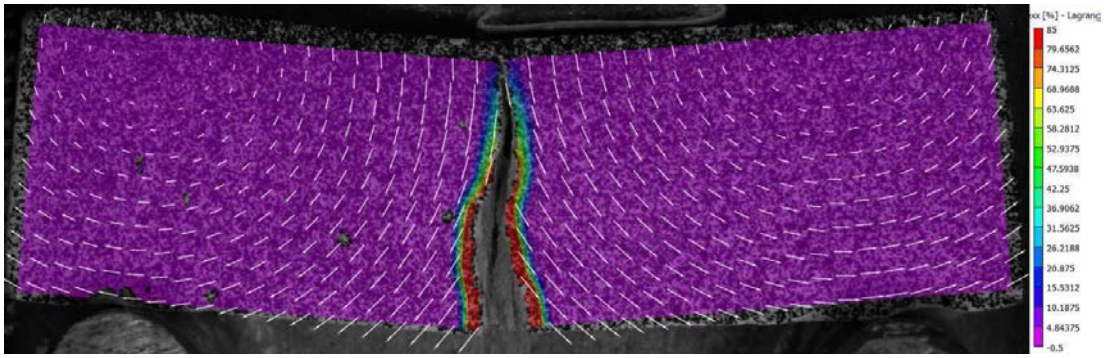
A la fin du chargement marqué à la position f (Fig. V.38 c), la fissure se propage et s'élargie en brisant la poutrelle en deux parties.



(a) ε_{xx} - position i



(b) ε_{xx} - position $i+1$

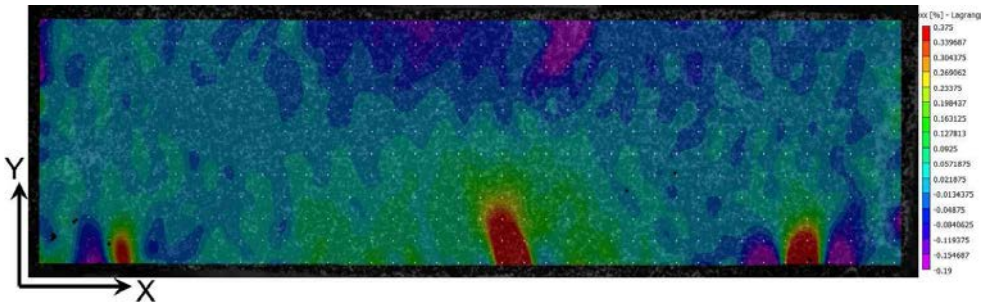


(c) ε_{xx} - position f

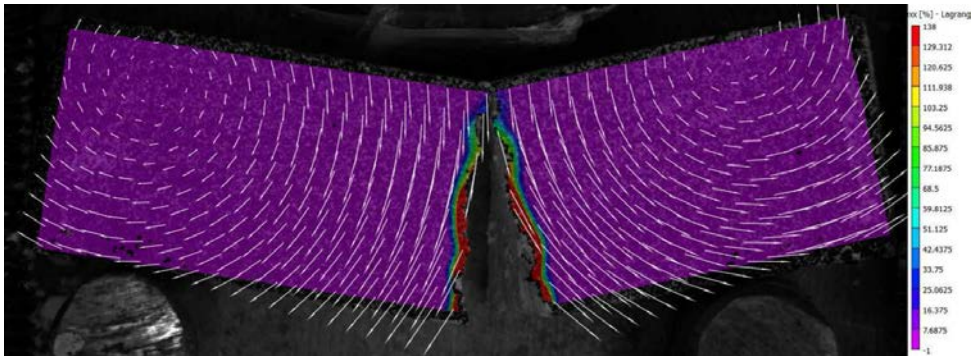
Figure V.38 : Evolution de la fissure après la rupture suivant la déformation ε_{xx} (flex1-s38$_V$).

b- Résultats suivant le plan horizontal :

Nous avons effectué la même analyse, présentée ci-dessus, sur une poutrelle horizontale (flex3-s38H). Les cartographies Vic2D de ε_{xx} aux positions i (σ_{tmax} = 97.1 kPa) et f sont illustrées sur la figure V.39. A la position i (Fig. V.39 a), le bulbe s'est formé dans la zone tendue où l'extension est maximale à ε_{xx}= +0.375%. La position suivante $i+1$ correspond à la fin du chargement f (Fig. V.39 b), puisque la poutrelle s'est brutalement brisée provoquant l'écartement de la fissure initiée en mode I (ouverture par extension).



(a) ε_{xx} - position i



(b) ε_{xx} - position f

Figure V.39 : Initiation et propagation de la fissure suivant la déformation ε_{xx} (flex3-s38$_H$).

V.2.2.2 Moyenne succion (110 MPa)

Les courbes [σ_t - Δl] reportées sur la figure V.40 correspondent aux deux essais choisis à moyenne succion dans les deux plans vertical (flex2-s110$_V$) et horizontal (flex3-s110$_H$).

Nous avons suivi la même procédure d'analyse du comportement local décrite dans la partie à faible succion. Les points d'analyse sont localisés au niveau de trois positions associées à $\sigma_t = \sigma_{tmax}$ (notée i), puis la suivante (notée $i+1$) et à la fin du chargement (notée f).

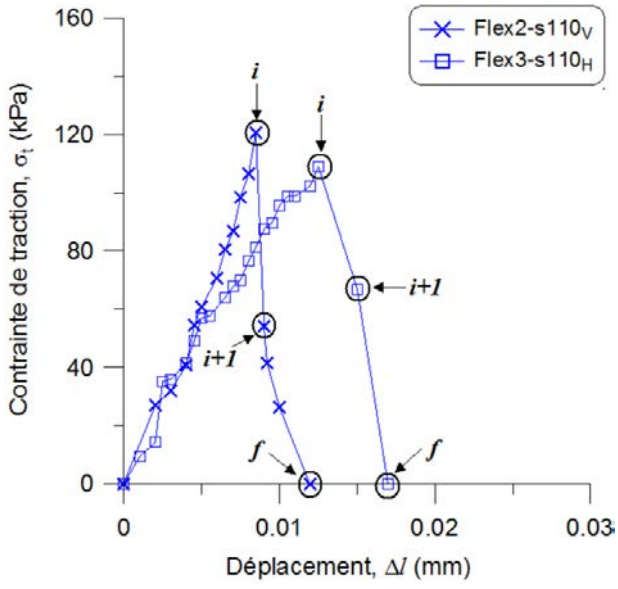


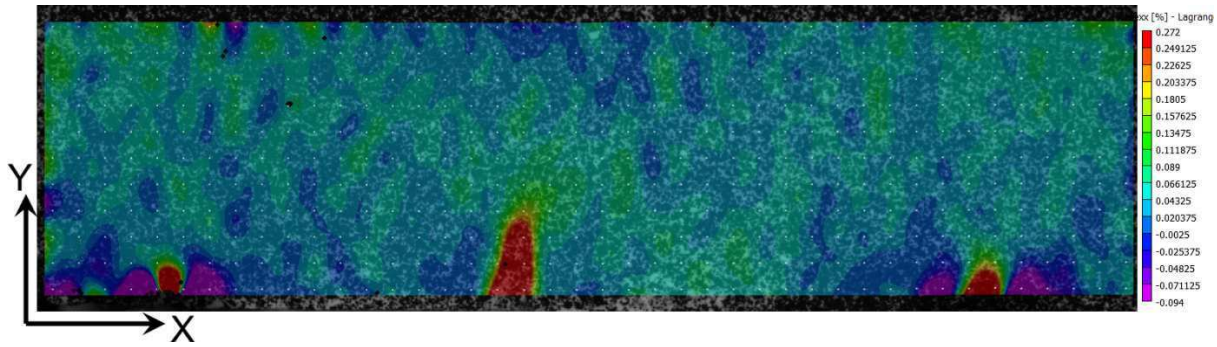
Figure V.40 : Contrainte de traction en fonction du déplacement dans les deux essais flex2-s110$_V$ et flex3-s110$_H$.

a- Résultats suivant le plan vertical :

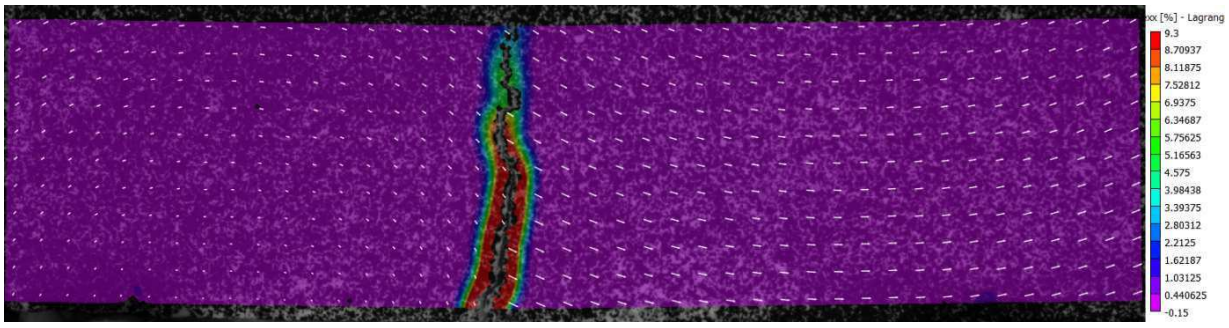
Les cartographies Vic2D de ε_{xx} obtenues aux différentes positions reportées sur la courbe [σ_t - Δl] de l'essai flex2-s110$_V$ sont illustrées sur la figure V.41.

A la position *i* où σ_{tmax} = 120.5 kPa (Fig. V.41 a), le même comportement local est observé avec une zone supérieure comprimée (-0.094%) et une zone inférieure tendue caractérisée par la formation d'un bulbe en extension à +0.272%.

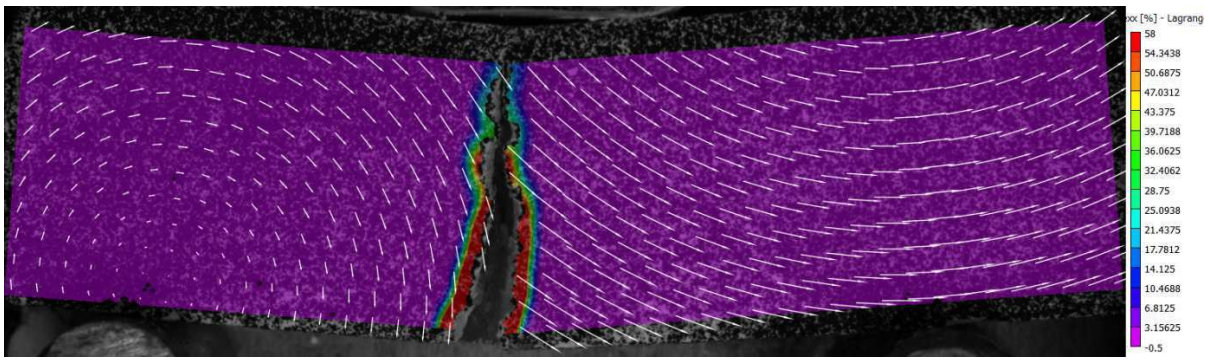
La position suivante *i+1* (Fig. V.41 b) montre la formation de la fissure dans le bulbe avec une extension s'élevant à ε_{xx}= +9.3% localisée à ses limites. Le mécanisme de fissuration observé en ouverture par extension est similaire à celui identifié à faible succion. A la fin du chargement, marquée par la position *f* (Fig. V.41 c), σ_t s'annule lorsque la fissure s'écarte et casse la poutrelle en deux parties.



(a) ε_{xx} - position *i*



(b) ε_{xx} - position *i+1*

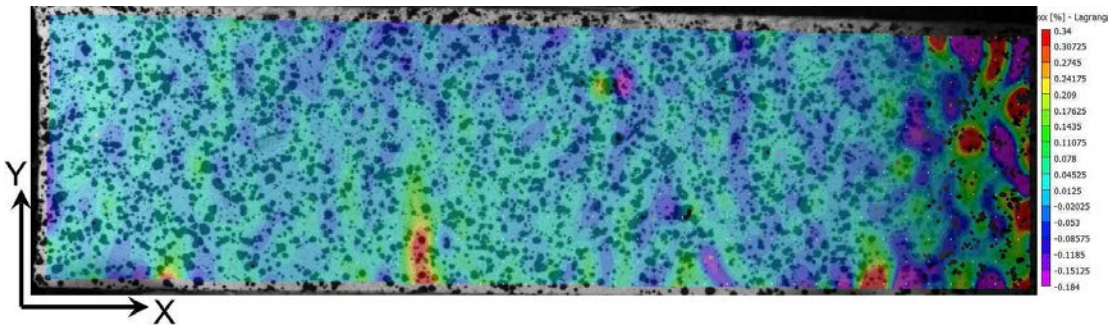


(c) ε_{xx} - position *f*

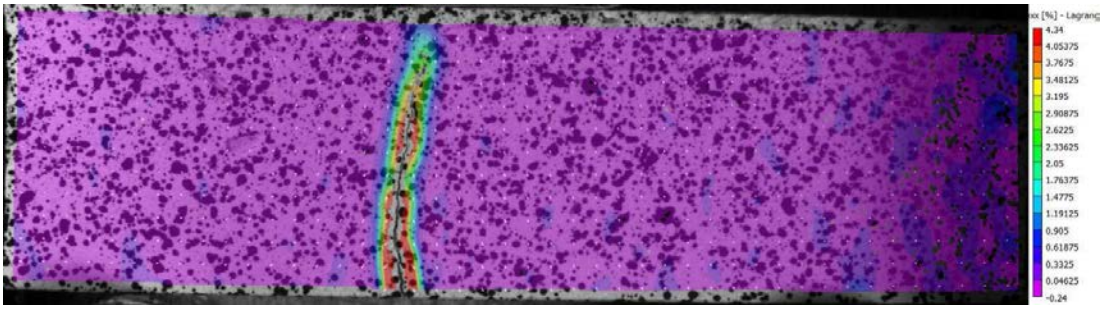
Figure V.41 : Initiation et propagation de la fissure suivant la déformation ε_{xx} (flex2-s110$_V$).

b- Résultats suivant le plan horizontal :

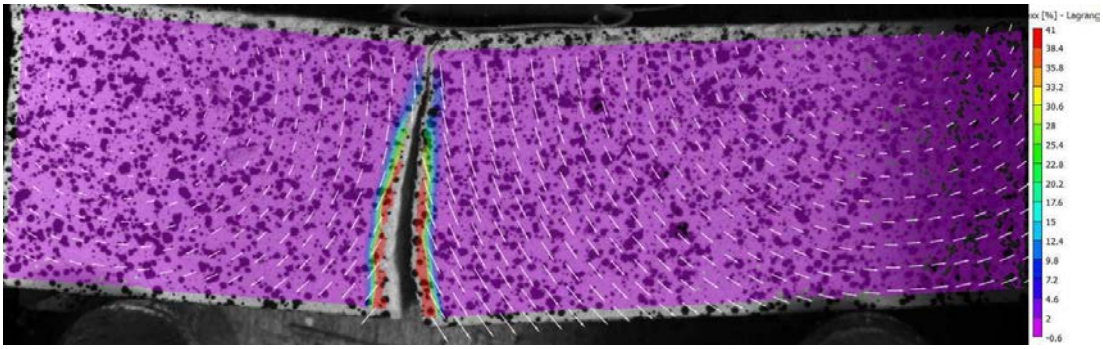
Dans le plan horizontal (flex3-s110$_H$), le bulbe se forme dans la zone tendue à la position *i* (σ_{tmax} = 109 kPa) sous une extension égale à ε_{xx}= +0.34% (Fig. V.42 a), qui augmente à ε_{xx}= +4.34% après le développement de la fissure à la position *i+1* (Fig. V.42 b).



(a) ε_{xx} - position *i*



(b) ε_{xx} - position *i+1*



(c) ε_{xx} - position *f*

Figure V.42 : Initiation et propagation de la fissure suivant la déformation ε_{xx} (flex3-s110$_H$).

V.2.2.3 Forte succion (361 MPa)

Parmi les essais réalisés à forte succion, nous en avons choisi deux, suivant le plan vertical (flex1-s361$_V$) et le plan horizontal (flex4-s361$_H$). Les courbes sont présentées sur la figure V.43. Les différentes positions *i*, *i+1* et *f* sur lesquelles s'effectuera l'analyse du comportement local, sont localisées sur chaque courbe.

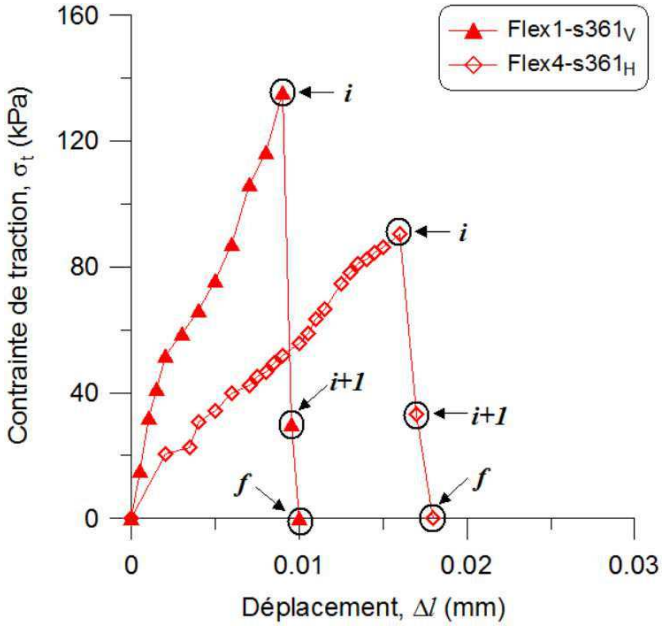
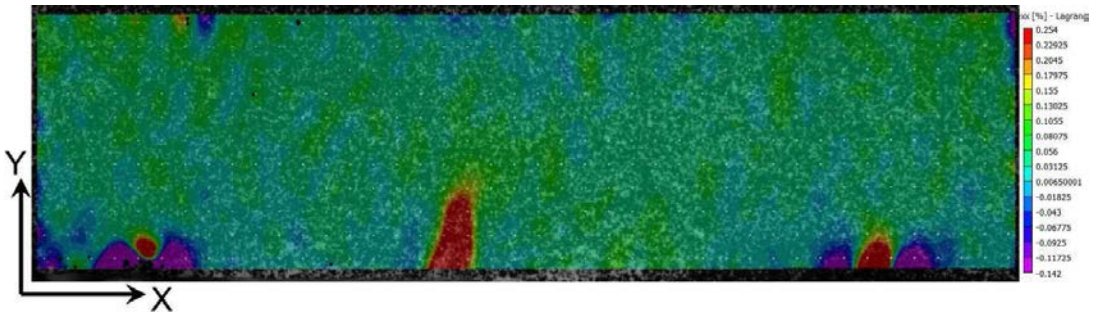


Figure V.43 : Contrainte de traction en fonction du déplacement dans les deux essais flex1-s361$_V$ et flex4-s361$_H$.

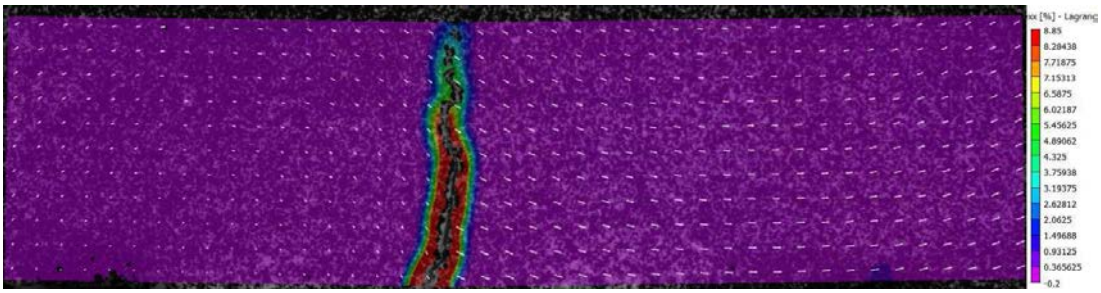
a- Résultats suivant le plan vertical :

La figure V.44 présente les cartographies Vic2D de ε_{xx} calculées aux différentes positions dans l'essai flex1-s361$_V$.

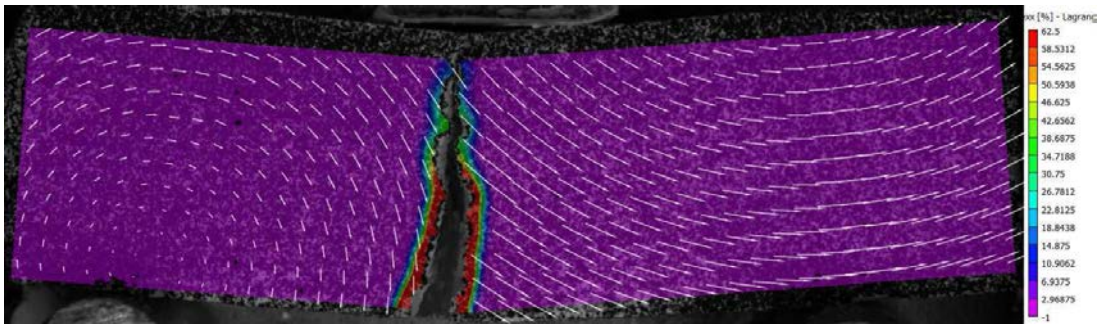
Nous pouvons observer un comportement local comparable à ceux identifiés à faible et moyenne succion. La figure V.44 (a) obtenue à la position i (σ_{tmax} = 135.4 kPa) montre la formation du bulbe dans la zone tendue sous une extension égale à ε_{xx}= +0.254%. Puis, à la position $i+1$, la fissure s'amorce en mode I dans la partie du bulbe où l'extension est maximale et atteint ε_{xx}= +8.85% (Fig. V.44 b). A la fin du chargement (position f), la poutrelle est cassée en deux (Fig. V.44 c).



(a) ε_{xx} - position i



(b) ε_{xx} - position $i+1$

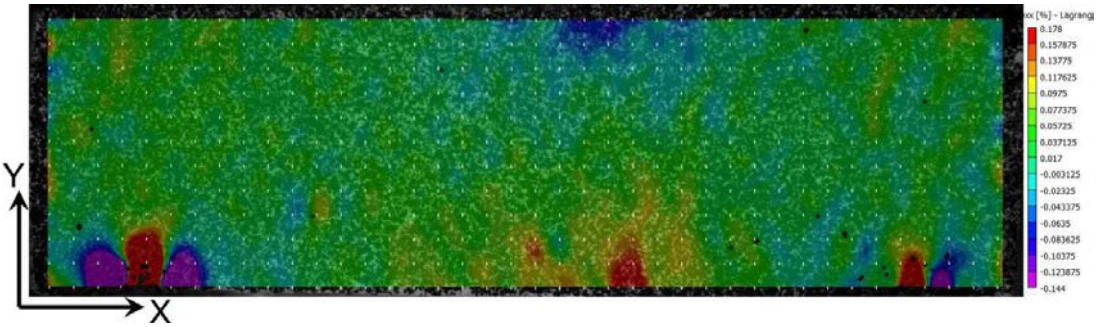


(c) ε_{xx} - position f

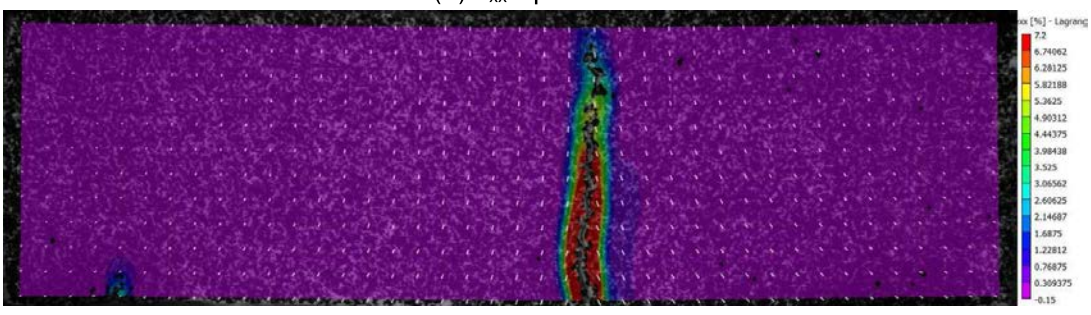
Figure V.44 : Initiation et propagation de la fissure suivant la déformation ε_{xx} (flex1-s361$_V$).

b- Résultats suivant le plan horizontal :

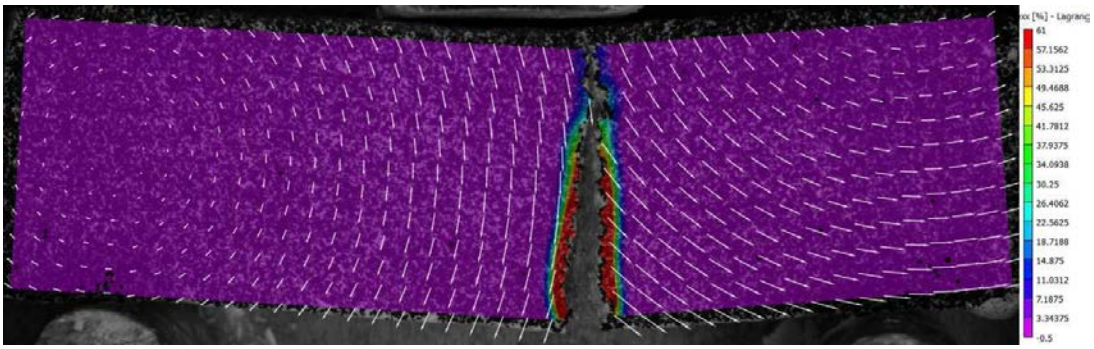
Le traitement du comportement local de l'essai flex4-s361$_H$ suivant exx est illustré sur la figure V.45 dans les différentes positions localisées. A la position i (σ_{tmax} = 90.4 kPa), le bulbe apparait dans la zone inférieure tendue en extension à ε_{xx}= +0.178% (Fig. V.45 a). Puis, l'extension croit et atteint ε_{xx}= +7.2% aux abords de la fissure qui s'est formée dans le bulbe à la position $i+1$ (Fig. V.45 b). La fissure s'ouvre et brise la poutrelle à la position f (Fig. V.45 c).



(a) ε_{xx} - position i



(b) ε_{xx} - position $i+1$



(c) ε_{xx} - position f

Figure V.45 : Initiation et propagation de la fissure suivant la déformation ε_{xx} (flex4-s361$_H$).

V.2.3. Comparaison des résultats - Discussion

V.2.3.1 Mode de fissuration

Dans l'analyse locale via Vic2D présentée ci-dessus, nous avons identifié le mécanisme de fissuration d'ouverture par extension (mode I) quelque soit le niveau de succion initiale. Afin de mettre en évidence ce mécanisme, nous avons effectué un calcul des déformations principales locales. Un exemple d'essai a été choisi pour cette étude. L'essai est à forte succion initiale (Flex1-s361$_V$), la courbe [σ_t - Δl] est représentée sur la figure V.46. Le calcul a été effectué au niveau des positions i ($\sigma_t = \sigma_{tmax}$) et $i+1$.

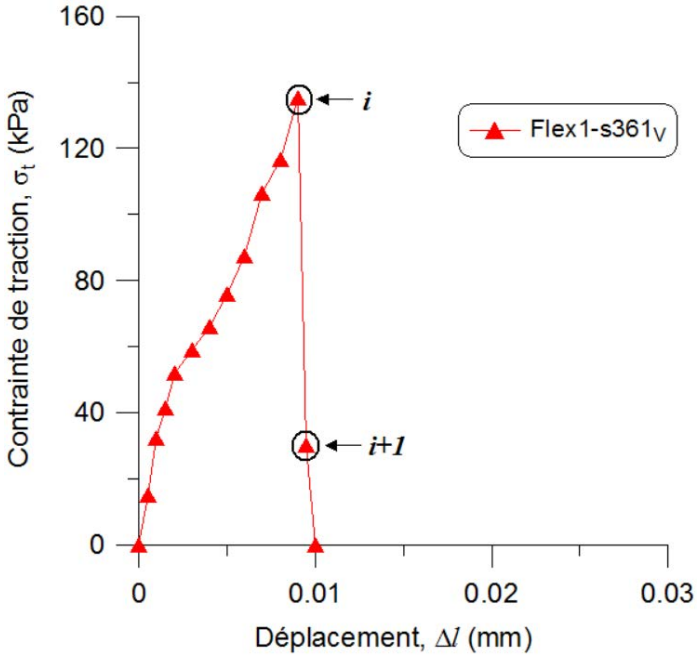


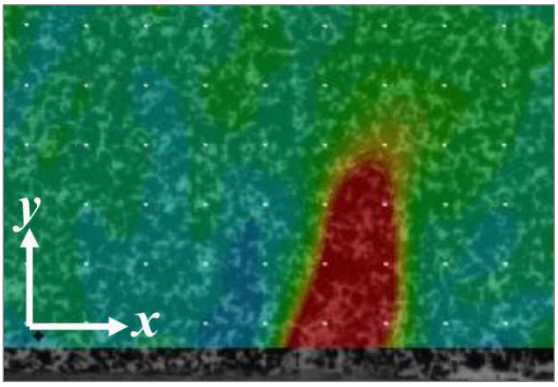
Figure V.46 : Contrainte de traction en fonction du déplacement dans l'essai Flex1-s361$_V$.

a- Position i :

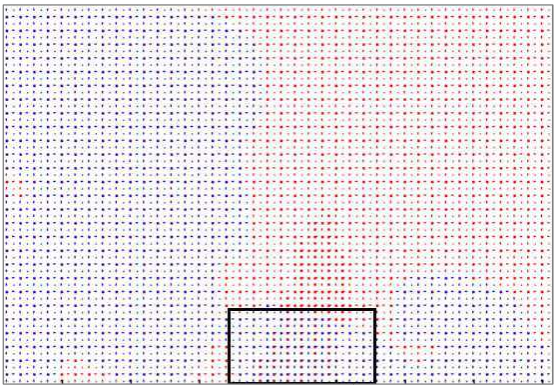
La figure V.47 (a) représente la cartographie Vic2D de la déformation longitudinale locale ε_{xx} au niveau de la zone tendue de la poutrelle (zone rouge). A ce stade de chargement (σ_{tmax} = 135.4kPa), l'extension atteint alors une valeur maximale de ε_{xx}= +0.254%.

Les déformations principales locales calculées dans la zone tendue de la poutrelle sont représentées sur la figure V.47 (b). La partie contenant le départ de la fissure est encadrée et ainsi agrandie sur la figure V.47 (c) pour une meilleure visibilité du mécanisme de fissuration.

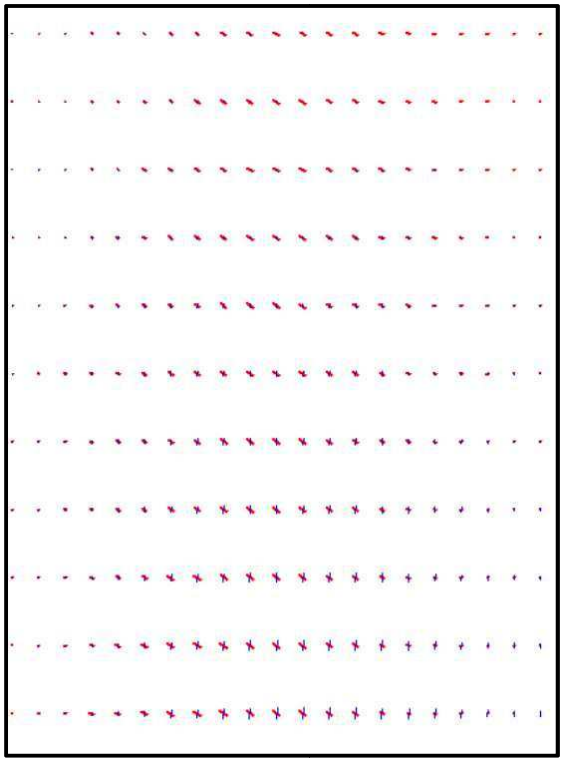
Les résultats montrent l'apparition d'une extension dans le sens plutôt horizontal (Fig. V.47 c), matérialisée par les vecteurs rouges. Ceci met en évidence une possibilité d'amorçage du mécanisme de fissuration en mode I.



(a) Rappel de ε_{xx}



(b) Image *i*



(c) Partie encadrée agrandie de l'image *i*

Figure V.47 : Déformations principales locales calculées à la position *i* dans l'essai Flex1-s361$_V$.

b- Position *i+1* :

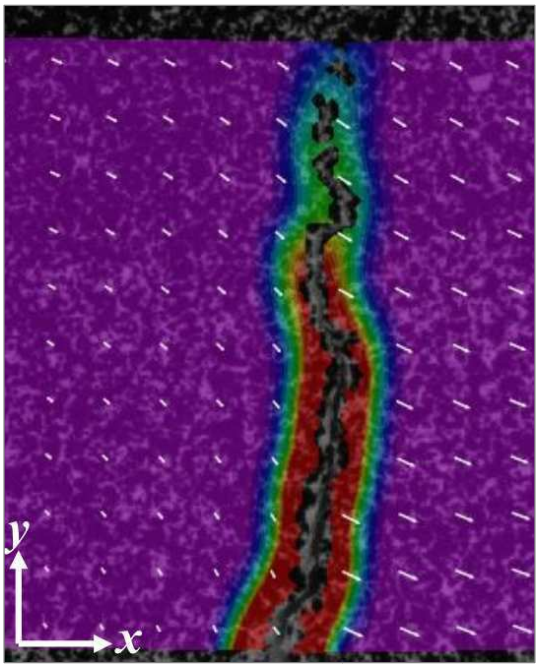
Le calcul via la CIN nous a permis d'observer les déformations locales notamment ε_{xx} illustrée sur la figure V.48 (a). Dans cette dernière, nous pouvons constater que le maximum de l'extension est localisé aux abords de la fissure et égale à ε_{xx}= +8.85%.

La figure V.48 (b) présente le calcul des déformations principales locales au niveau de la zone de fissure établie sur toute la largeur de la poutrelle et identique à celle de la figure V.48 (a). Afin de mieux analyser les résultats obtenus, nous avons agrandi trois parties encadrées séparément en noir, vert et bleu sur la figure V.48 (c) :

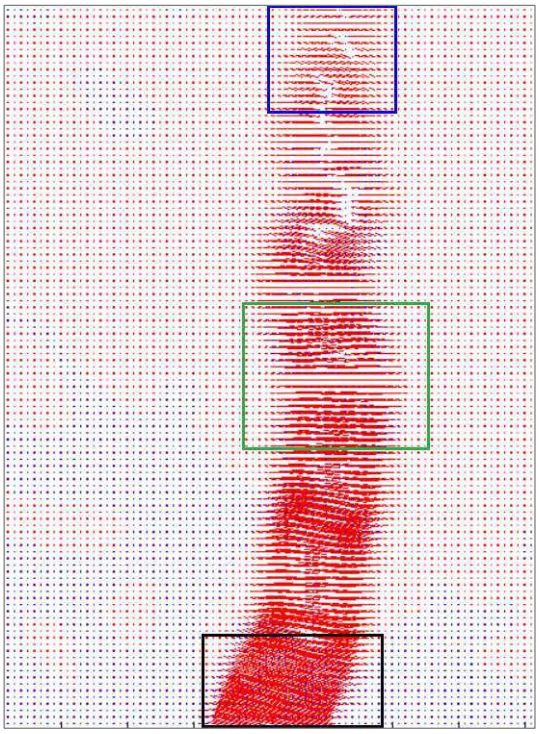
- Fibre tendue (encadrée en noir) : elle représente la zone tendue à partir de laquelle s'initie la fissure. L'extension apparait très dense, caractérisée par des vecteurs rouges très longs (déformation intense), nombreux et tous perpendiculaires à la direction de la fissure.

-Fibre médiane (encadrée en vert) : l'extension est toujours visible par la présence des vecteurs rouges, en revanche moins longs et moins nombreux que précédemment mais toujours perpendiculaires au sens de la fissure.

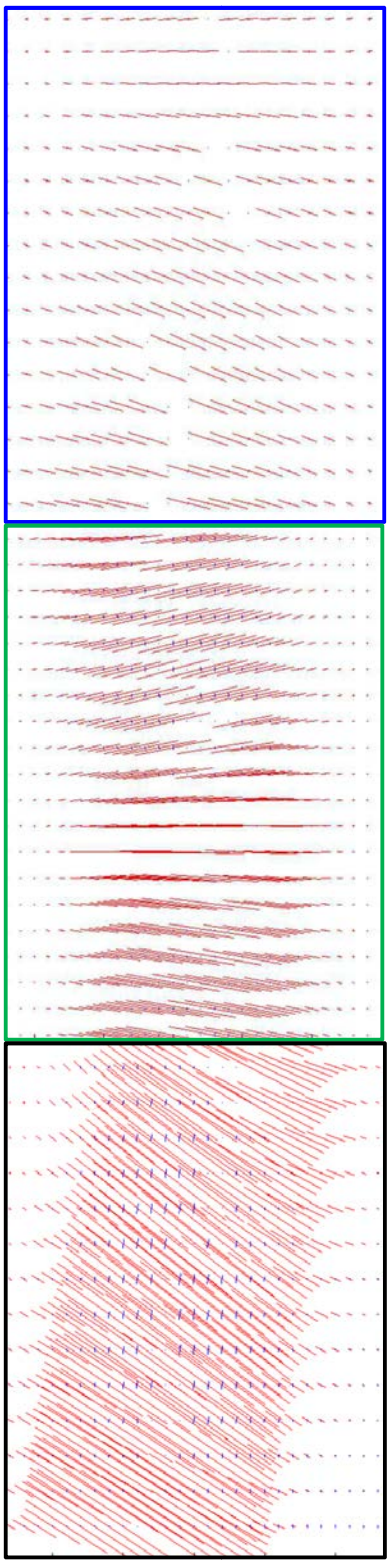
- Fibre comprimée (encadrée en bleu) : elle montre la pointe de la fissure avec une extension moins importante que dans la fibre tendue ou médiane.



(a) Rappel de ε_{xx}



(b) Image *i+1*



(c) Parties encadrées agrandies

Figure V.48 : Déformations principales locales calculées à la position *i+1* dans l'essai Flex1-s361$_V$.

V.2.3.2 Relation entre la résistance à la traction et la teneur en eau

La figure V.49 montre la relation entre la résistance à la traction et la teneur en eau des poutrelles à différents niveaux de succion initiale. Ceci concerne uniquement les essais où des poutrelles verticales ont été utilisées. Sur le même plan, les résultats de Wei (2014) via la traction directe sur la même argile ont été introduits. L'objectif dans cette démarche est de définir une tendance de l'évolution de la résistance à la traction et non une comparaison directe des résultats obtenus par les deux méthodes de mesure (directe et indirecte).

Les résultats montrent que la décroissance de la teneur en eau semble induire une augmentation exponentielle de la résistance à la traction.

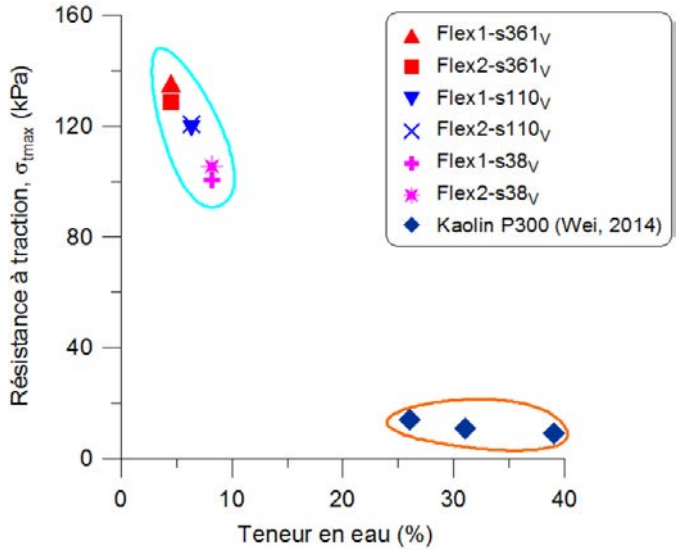


Figure V.49 : Résistance à la traction en fonction de la teneur en eau.

V.2.3.3 Effet de la succion initiale sur la résistance à la traction

La relation entre la résistance à la traction et la succion initiale est présentée sur la figure V.50 à la fois en fonction du logarithme de la succion (Fig. V.50 a) et la succion (Fig. V.50 b).

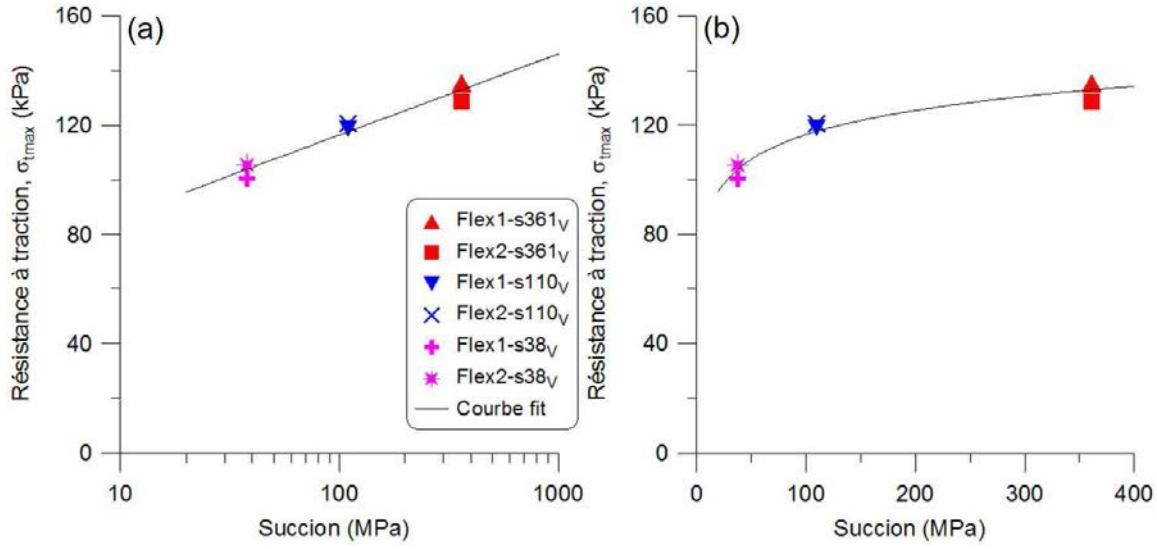


Figure V.50 : Résistance à la traction en fonction de la succion initiale.

Globalement, les résultats montrent que la résistance à la traction augmente à mesure que la succion initiale est élevée. En revanche, la relation telle que définie sur la figure V.50 (b) est non-linéaire. Des tendances similaires ont été obtenues dans Tang and Graham (2000) sur des mélanges de sable et de bentonite ainsi que dans Wei et al. (2016b) sur les argilites.

La non-linéarité observée entre la succion et la résistance à la traction est expliquée par certains auteurs (par exemple Taibi et al. 2008) comme étant le résultat des mécanismes locaux qui concernent principalement la fonction non-linéaire entre la contrainte de capillarité locale et la succion.

Lorsque la relation résistance à la traction / succion est tracée en fonction du logarithme de la succion (Fig. V.50 a), celle-ci semble être linéaire.

V.3. Discussion

V.3.1. Notion de la déformation critique

La déformation critique, notée ε_{cr}, est définie comme étant la valeur caractéristique de la déformation locale, longitudinale ε^{cr}_{xx} ou transversale ε^{cr}_{yy}, au-delà de laquelle la fissuration s'amorce et se développe.

Pour cela, nous avons effectué un calcul d'estimation de ε_{cr} sous différentes sollicitations hydrique (chemin de séchage) et mécanique (traction indirecte par flexion) via la CIN.

V.3.1.1 Chemins de séchage

La figure V.51 illustre les schémas de fissuration obtenus sur les différents chemins de séchage libre et contrôlé présentés et analysés dans la partie V.1 de ce chapitre. Excepté le cas du séchage contrôlé à faible succion imposée (38 MPa) marqué par une absence de fissures (Fig. V.51 a).

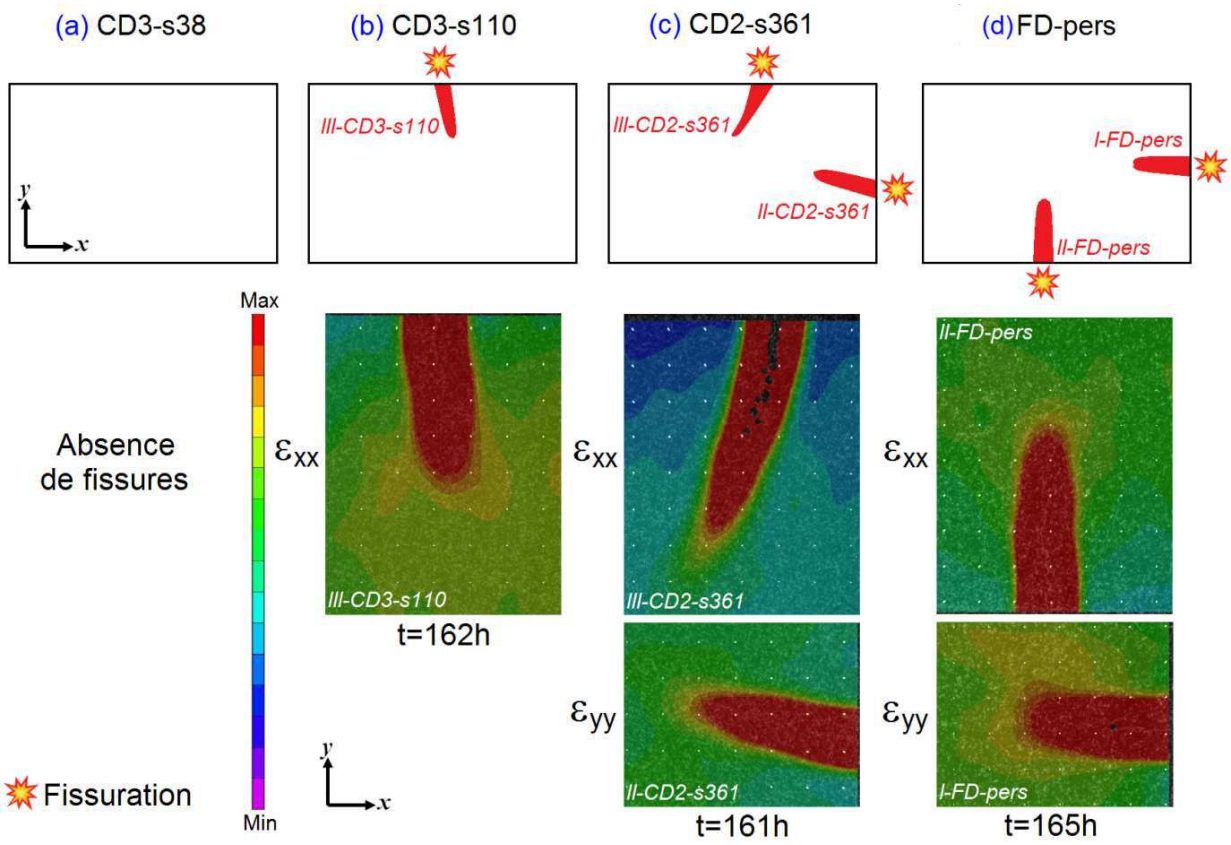


Figure V.51 : Schémas de fissuration obtenus à la fin des différents chemins de séchage libre et contrôlé.

Les valeurs de la déformation critique estimées dans chaque fissure sur les différents chemins de séchage sont reportées dans le tableau V.14.

Tableau V.14 : Valeurs de la déformation critique ε_{cr} dans les zones de fissuration.

Chemins	**Séchage contrôlé**			**Séchage libre**	
	CD3-s110	**CD2-s361**		**FD-pers**	
Zone de fissure	*III-CD3-s110*	*II-CD2-s361*	*III-CD2-s361*	*I-FD-pers*	*II-FD-pers*
Temps (h)	71	40	42	52.5	54
w (%)	1.85	3.74	2.9	2.11	1.8
ε^{cr}_{xx} (%)	+0.710	-	+0.724	-	+0.698
ε^{cr}_{yy} (%)	-	+0.612	-	+0.816	-

La figure V.52 présente à la fois la représentation des déformations critiques calculées dans les différentes zones de fissuration en fonction du temps (Fig. V.52 a), ainsi que leurs positions dans les courbes de vitesse de séchage associées (Fig. V.52 b).

Les résultats de la figure V.52 (a) montrent que les valeurs des déformations critiques obtenues dans toutes les zones de fissuration sont comprises dans une bande en extension de +0.2% entre ε_{cr}= +0.612% et ε_{cr}= +0.816%. Cette dernière représente la zone critique où la déformation locale en extension provoque l'initiation de la fissure suivant X ou Y.

La différence entre les trois chemins est la cinétique du séchage associée, qui dépend du niveau de succion globale imposée pour les chemins de séchage contrôlé, et des conditions hydriques ambiantes de l'environnement où le séchage libre est conduit. La figure V.52 (b) permet de constater que :

- dans un premier temps, les fissures se développent dans la partie où la vitesse de séchage chute (t_2 à t_3),

- ensuite, à mesure que la vitesse de séchage est faible, la phase de stabilisation t_1-t_2 devient lente et retarde et minimise l'apparition des fissures. Par ailleurs, nous avons pu constater qu'à faible succion il n'y avait pas de formation de fissures avec une vitesse de séchage égale à 0.19 %/h.

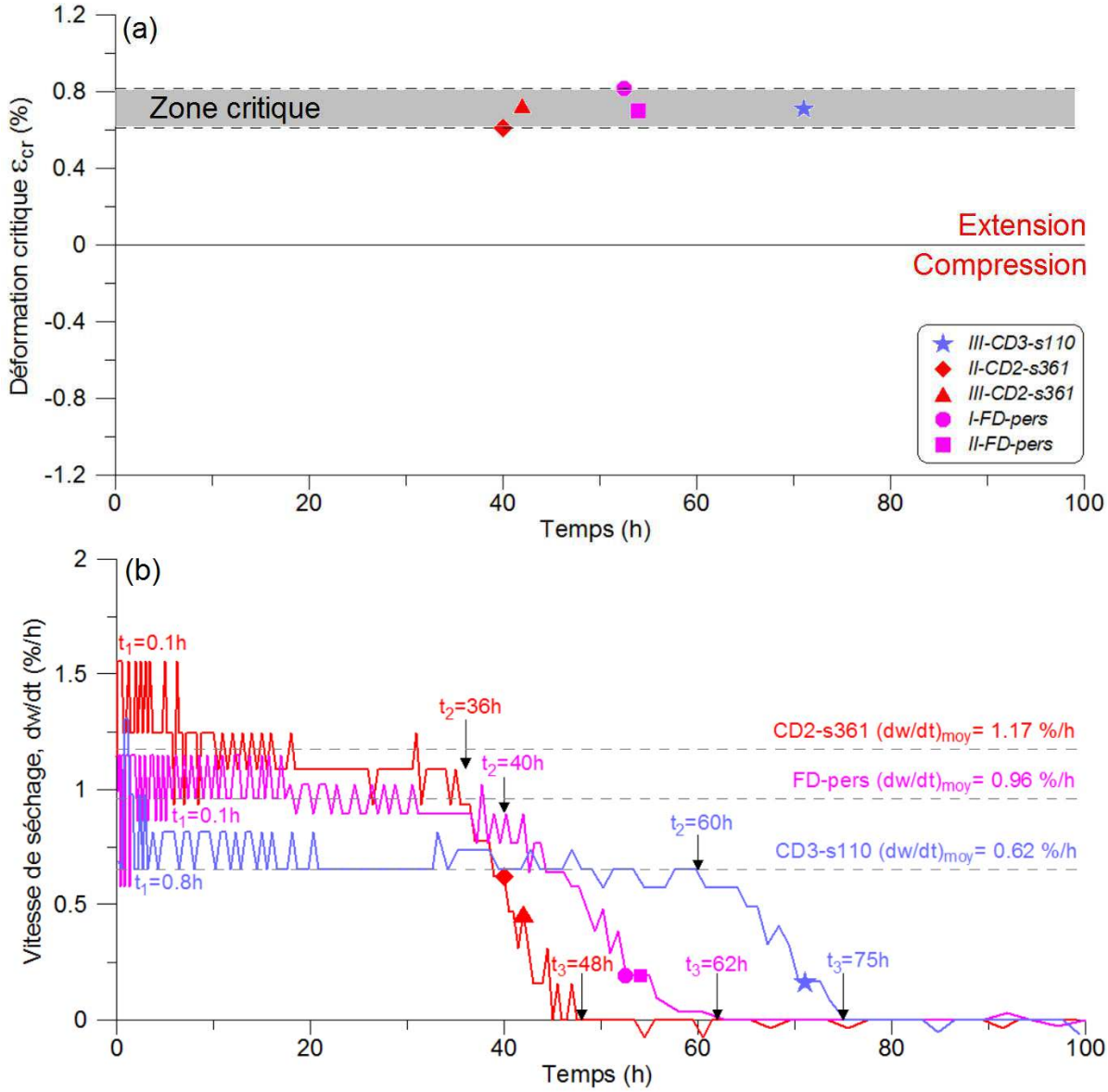


Figure V.52 : Résultats sur chemins de séchage libre et contrôlé : (a) déformation critique estimée en fonction du temps, (b) courbes de vitesse de séchage en fonction du temps.

V.3.1.2 Poutrelles sous traction par flexion

Dans les essais de traction indirecte par flexion, la zone de fissuration est la zone tendue de la poutrelle testée. Les cartographies Vic2D de la déformation longitudinale ε_{xx} obtenues dans cette zone sont rappelées sur la figure V.53 à différents niveaux de succion.

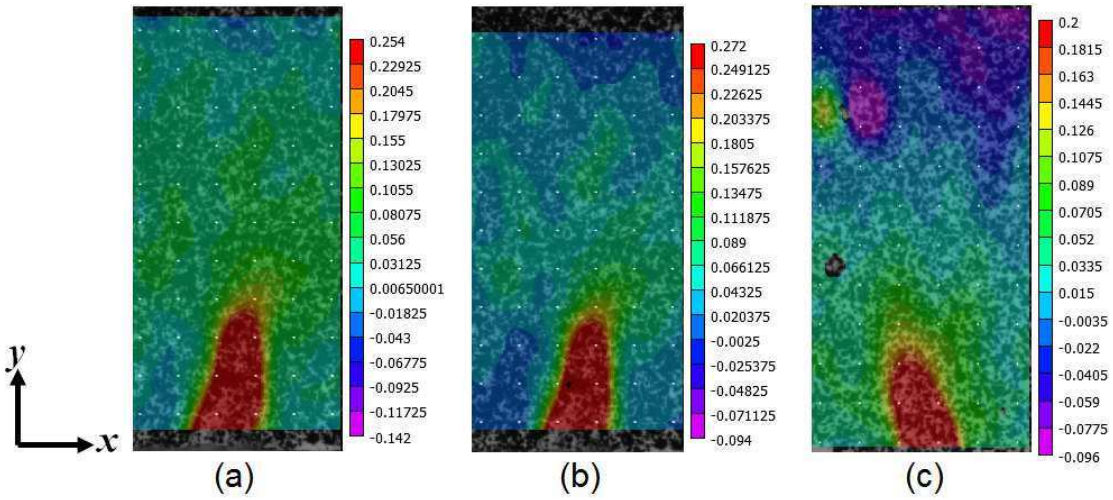


Figure V.53 : Cartographies Vic2D de la déformation longitudinale ε_{xx} dans la position *i* à différentes succions : (a) Flex1-s361, (b) Flex2-s110 et (c) Flex1-s38.

La zone de fissuration est caractérisée par le bulbe en extension (en rouge) représenté sur les cartographies de la figure V.52, prises dans la position *i* qui correspond à la résistance maximale σ_{tmax} de la poutrelle d'argile. Les valeurs de la déformation critique calculée dans chaque zone sont reportées dans le tableau V.15.

Tableau V.15 : Valeurs de la déformation critique ε_{cr} dans les zones de fissuration (position *i*).

	Flex1-s361$_V$	**Flex2-s110$_V$**	**Flex1-s38$_V$**
w (%)	4.5	6.3	8.15
σ_{tmax} (kPa)	135.4	120.5	100.4
ε^{cr}_{xx} (%)	+0.254	+0.272	+0.2

Pour représenter ces valeurs, nous avons choisi de tracer les déformations critiques en fonction du déplacement appliqué (Fig. V.54 a) accompagnées des courbes de contrainte de traction où sont indiquées les positions *i* par un rond noir (Fig. V.54 b).

Les résultats de la figure V.54 (a) montrent que les valeurs de la déformation critique atteintes en extension dans chaque essai sont proches et valent en moyenne ε_{cr}= +0.242%.

D'autre part, on peut constater sur la figure V.54 (b) que la déformation critique est atteinte, dans les trois cas, lorsque la contrainte σ_t atteint la résistance maximale en traction de la poutrelle qui dépend de la succion initiale. En effet, plus la succion initiale imposée à la poutrelle est élevée, plus sa résistance à la traction augmente.

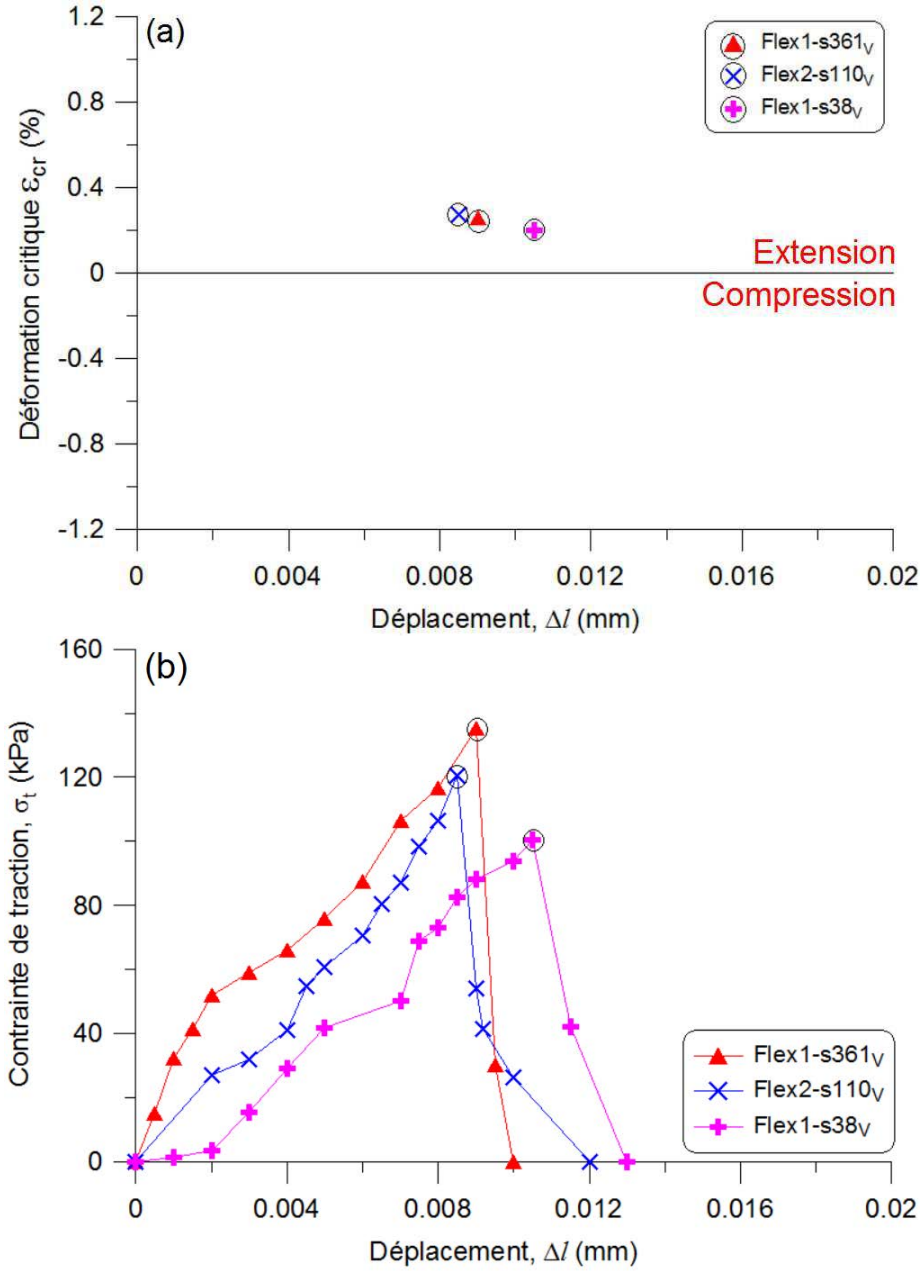


Figure V.54 : Résultats sous flexion : (a) déformation critique estimée en fonction du déplacement imposé, (b) courbes de contraintes - déplacement.

V.3.1.3 Comparaison des résultats

Dans cette section, nous présentons une comparaison entre les résultats présentés ci-dessus en termes de déformations critiques :

- la déformation mécanique critique sur chemin de séchage,

- la déformation de flexion critique dans le cas des poutrelles soumises à la traction indirecte par flexion.

Nous avons reporté sur la figure V.55 les variations de la déformation critique, obtenues pour les essais de dessiccation et de flexion, en fonction de la teneur en eau.

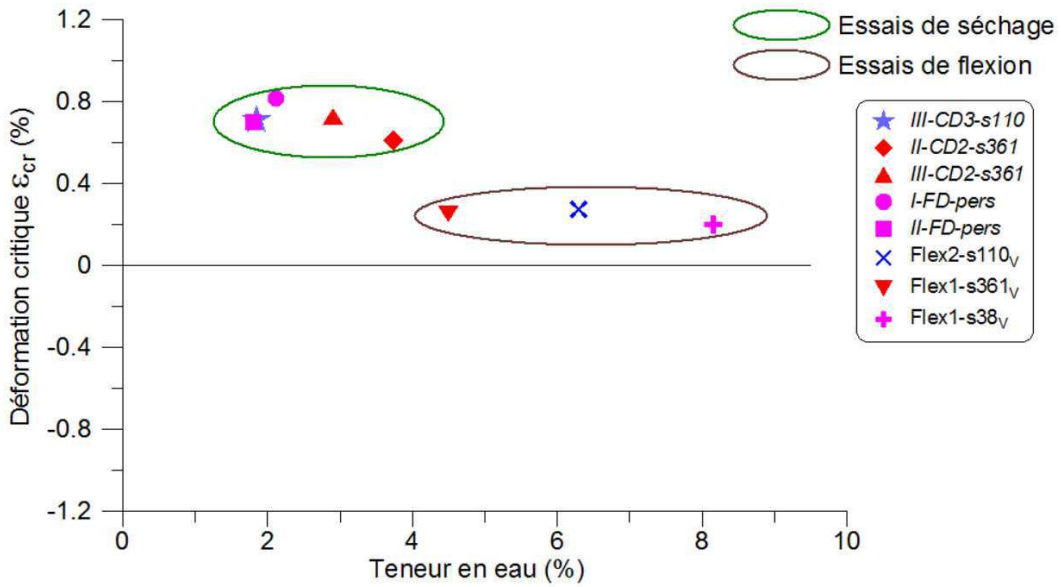


Figure V.55 : Variations de la déformation critique en fonction de la teneur en eau dans les essais de dessiccation et de flexion.

Dans les deux cas de sollicitation, la fissuration apparait à partir d'une déformation critique. Cette déformation de nature extensive ($\varepsilon_{cr} > 0$) est de l'ordre de ε_{cr}= +0.242% dans le cas des poutrelles sous flexion et mécanique critique sur chemin de séchage à ε_{cr}= +0.71%.

En revanche, la façon dont on atteint cette valeur de la déformation critique dépendra de la succion initiale imposée.

Les observations montrent que nous pouvons établir un lien entre les sollicitations en traction dans la fissuration par dessiccation et la fissuration par flexion. En effet, le développement des fissures dans l'échantillon sous dessiccation intervient lorsque la déformation locale dépasse la déformation critique. Au même moment, cela correspond en termes de contraintes au dépassement de la résistance maximale à la traction de l'argile. Par ailleurs, ceci est sensible aux conditions hydriques initiales imposées au chemin de séchage.

V.3.2. Propagation du réseau de fissures - Influence de la succion locale

Le but dans cette section est d'analyser l'influence de la succion locale avec la loi de distribution établie dans le chapitre IV (section IV.3.3) pour un cas particulier, sur l'amorçage et la propagation des fissures sous dessiccation libre et contrôlée.

La figure V.56 montre la cartographie de la loi de distribution de la succion locale obtenue sur le chemin CD2-s361. Les zones de fissuration *II-CD2-s361* suivant Y et *III-CD2-s361* suivant X sont encadrées sur la même figure.

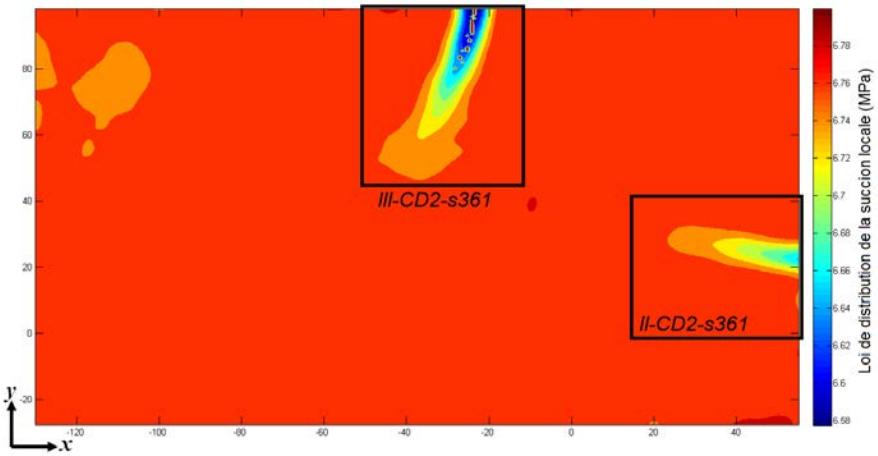


Figure V.56 : Cartographie de la loi de distribution de la succion locale s_{loc} à t=161h sur le chemin CD2-s361.

La figure V.57 présente les distributions de la succion locale dans les deux zones de fissurations pendant l'amorçage et la propagation des fissures.

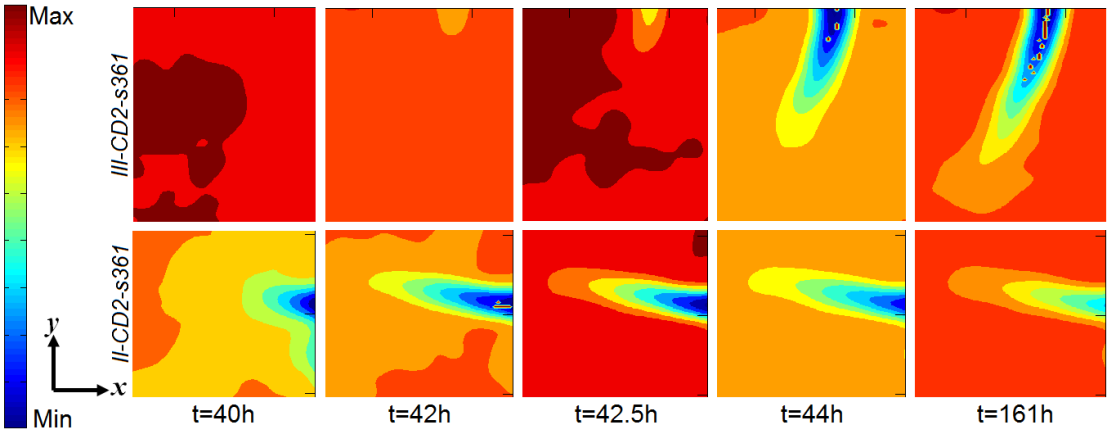


Figure V.57 : Distributions de la succion locale dans les zones de fissuration *II-CD2-s361* et *III-CD2-s361* en fonction du temps.

Les caractéristiques des différentes cartographies de la figure V.57 sont reportées dans le tableau V.16.

Tableau V.16 : Teneur en eau *w*, maximum et minimum de s_{loc} dans les deux zones *III-CD2-s361* et *II-CD2-s361* à différents temps de séchage.

Temps	t=40h	t=42h	t=42.5h	t=44h	t=161h
w (%)	3.74	2.9	2.73	2.5	2.65
Max. s_{loc} (MPa)	5.78	6.08	6.4	6.6	6.8
Min. s_{loc} (MPa)	5.69	5.88	6.24	6.4	6.58

Les cartographies de la figure V.57 montrent que la propagation des fissures s'effectue à mesure que la succion locale augmente. Par ailleurs, on peut constater une légère nuance de succion locale dans le bulbe qui caractérise la fissure. La concentration de la succion

locale est identifiée à la pointe de la fissure tandis qu'elle est légèrement moindre en allant vers le centre de la fissure.

Afin d'analyser l'évolution et l'influence de la succion locale durant la propagation des fissures à partir de leur amorçage, nous avons représenté sur la figure V.58 cette tranche de valeurs en fonction du temps sur différents chemins de séchage libre et contrôlé.

A forte succion initiale (CD2-s361), les résultats montrent que la succion locale augmente très rapidement pendant la propagation des fissures *II-CD2-s361* et *III-CD2-s361*. En revanche, on constate une augmentation très lente de la succion locale durant la propagation de la fissure *III-CD3-s110* à moyenne succion initiale (CD3-s110). Ceci est dû à la vitesse de séchage qui est élevée à forte succion initiale, ce qui augmente la succion locale avec la perte de masse.

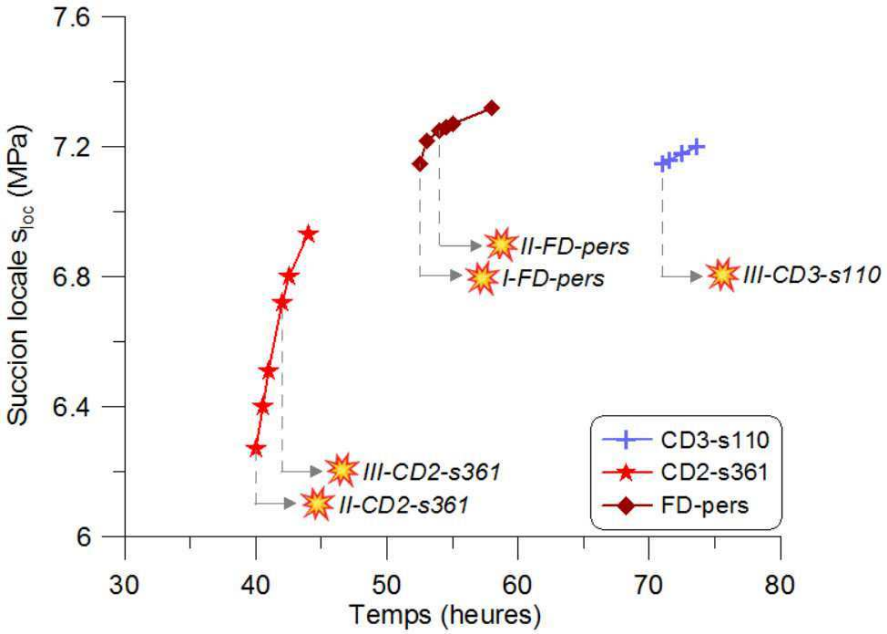


Figure V.58 : Evolution de la succion locale durant la propagation des fissures sur différents chemin de séchage libre et contrôlé.

Sur chemin de séchage libre, l'évolution de la succion locale est comprise entre les deux cas (à moyenne et à forte succion) à l'image de sa courbe de vitesse de séchage aussi située entre les deux. Ceci montre que les conditions initiales des chemins conditionnent l'évolution de la succion locale de l'échantillon ainsi la propagation des fissures.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité deux volets principaux permettant l'identification des mécanismes de fissuration sous différentes sollicitations.

Nous avons traité, dans le ***premier volet*** de ce chapitre, la fissuration identifiée sur différentes chemins de séchage libre et contrôlé. Les résultats ont montré que :

- La préparation initiale de l'échantillon peut provoquer des zones en extension, généralement au centre, dues à d'éventuelles bulles d'air ou des défauts de surface. Cette extension augmente dans un premier temps puis change de signe et passe en compression au cours du séchage. Lorsque cela ne crée pas de fissure, il s'agit du phénomène de relaxation obtenu à moyenne (110 MPa) et à faible (38 MPa) succion imposée. En revanche, à forte succion imposée (361 MPa), nous avons observé la formation d'une fissure dans cette zone.

- Le mécanisme de fissuration identifié dans toutes les fissures est l'ouverture par extension (mode I). L'analyse de ce mode de fissuration par les directions des déformations principales a montré des vecteurs rouges (extension) longs et denses orientés perpendiculairement à la direction de la fissure.

- Enfin, la comparaison des différents résultats obtenus a permis de constater que la fissuration sur chemin de séchage est sensible aux paramètres hydriques (l'humidité relative ainsi la succion initiale) qui conditionnent la vitesse du séchage.

Dans le ***second volet***, nous avons effectué une série d'essai de traction indirecte par la flexion sur des poutrelles d'argile, initialement soumises à différentes succions.

- L'analyse du comportement global a montré que la résistance maximale à la traction des poutrelles verticales augmente avec la succion initiale imposée.

- L'identification du comportement local via la CIN a permis de constater que la déformation longitudinale locale atteint sa valeur maximale en extension lorsque la contrainte égale la résistance maximale à la traction des poutrelles. Au-delà de cette valeur, la fissure se développe suivant le mode I.

- Des relations ont été établies entre la résistance à la traction avec la teneur en eau d'une part et la succion initiale d'autre part. Les résultats ont montré qu'à mesure que la teneur en eau diminue, la résistance à la traction augmentait de façon sensible. D'autre part, plus la succion initiale est élevée, plus la pente de la courbe de variations de la résistance à la traction est élevée.

Enfin, dans une troisième partie nous avons établi un lien entre les résultats obtenus dans les deux premiers volets de ce chapitre.

- Nous avons d'abord défini la notion de la déformation critique. L'analyse, portée sur l'estimation de cette dernière, a montré que les paramètres hydriques initiaux dans les essais

de dessiccation ont un impact sur comment atteindre la déformation critique et sur l'amorçage des fissures. D'autre part, dans les essais de flexion, la déformation de la zone tendue de la poutrelle atteint sa valeur critique lorsque la contrainte atteint la résistance maximale en traction de l'argile.

- Par ailleurs, nous avons constaté que la fissuration se propage avec l'augmentation de la succion locale estimée, très marquée au niveau de la pointe des fissures.

Conclusions et perspectives

Conclusions et perspectives

→ Conclusions

A travers une série d'analyses expérimentales, réalisées au moyen de dispositifs pour certains conçus et développés au laboratoire, nous avons dans ce travail de thèse, tenter d'approcher le phénomène d'endommagement et de fissuration des matériaux argileux. Nous avons pour cela suivi une méthode d'investigation qu'on pourra décliner en 3 axes :

> ***Axe 1 :*** *caractériser les propriétés élastiques et leur évolution sur des chemins triaxiaux complexes.*

Sur l'axe 1, on peut avancer les conclusions suivantes :

- La mesure ultrasonore post-mortem, basée sur la méthode d'insertion-substitution, a permis de déterminer les propriétés élastiques d'un matériau argileux sous chargement triaxial.

- Partant d'une même contrainte de consolidation, les vitesses d'onde mesurées à p'=constante semblent légèrement inférieures à celles obtenues à σ'_3=constante.

- A un même niveau de contrainte fixé (point P2), et à différents chemins de chargement, les résultats montrent que le chemin n'a pas d'influence sur la vitesse d'onde lorsque, pris séparément, le chemin est normalement consolidé ou surconsolidé. Ce sont les conditions de consolidation (normalement consolidé, ou en surconsolidé) qui affectent d'une manière plus sensible la vitesse d'onde.

- Une analyse qualitative a été menée, qui tente à comprendre l'influence de l'endommagement sur les propriétés élastiques de l'échantillon le long du chemin de contrainte. L'étude a mis en évidence cet aspect en surconsolidé sur différents chemins.

> ***Axe 2 :*** *contribuer à la compréhension des mécanismes d'initiation et de propagation de la fissuration de l'argile initialement saturée, sous dessiccation libre et contrôlée, par l'utilisation de la technique de corrélation d'images numériques (CIN).*

Dans ce deuxième axe, il a été question, dans un premier temps, de caractériser la courbe de rétention et des variations des paramètres hydriques de l'argile sur chemin de séchage. Les conclusions de cette étude peuvent être présentées comme suit :

- Une méthodologie de calcul du phénomène de retrait a été exposée. A l'échelle globale de l'échantillon, nous avons en premier lieu estimé les déformations dans les trois directions (X, Y et Z) en considérant des hypothèses fortes. Ce qui nous a permis de caractériser le retrait. Sous dessiccation contrôlée, un effet de la succion globale sur la cinétique du retrait a été mis en évidence. Plus la succion est élevée, plus le retrait est rapide. Sous dessiccation libre, les résultats ont montré que les conditions d'essai (type de support et mouchetis appliqué) n'affectent pas d'une manière sensible l'évolution des déformations. A l'échelle locale, l'estimation de la déformation de retrait locale a permis de

calculer les deux composantes des déformations locales (la composante mécanique et la composante du retrait), dans les trois directions (X, Y et Z).

- Cette méthode, à l'échelle locale, a également permis d'effectuer un calcul de la succion locale, et de proposer une distribution possible de la succion locale en dehors des zones très proches des bords et des localisations (fissuration).

- Les cartographies Vic2D établies pour les déformations locales ont permis d'une part, de suivre leur évolution au cours du séchage, et d'autre part, d'identifier les zones critiques en extension, favorables à l'amorçage des fissures. Un calcul de distributions a été effectué sur ces cartographies permettant d'étudier, en fonction du temps, les variations des déformations locales sur une ligne longitudinale, puis une ligne transversale de l'échantillon. Par ailleurs, une méthode de calcul local a été présentée. Cette méthode, basée sur le calcul des directions principales permet l'identification des modes de fissuration.

- Le mécanisme de fissuration identifié dans toutes les fissures est l'ouverture par extension (mode I). L'analyse de ce mode de fissuration par les directions des déformations principales a montré des vecteurs rouges (extension) longs et denses orientés perpendiculairement à la direction de la fissure. Enfin, la comparaison des différents résultats obtenus a permis de constater que la fissuration sur chemin de séchage est sensible aux paramètres hydriques (l'humidité relative ainsi la succion initiale) qui conditionnent la vitesse du séchage.

> ***Axe 3 :*** *tenter d'identifier une corrélation possible entre la rupture induite par une sollicitation mécanique et celle due à une sollicitation de séchage.*

Afin de répondre à l'objectif fixé dans ce troisième axe, nous avons d'abord effectué une série d'essai de traction indirecte par la flexion sur des poutrelles d'argile, initialement soumises à différentes succions. L'analyse du comportement global a montré que la résistance maximale à la traction des poutrelles verticales augmente avec la succion initiale imposée. Les conclusions de cette analyse sont les suivantes :

- L'identification du comportement local via la CIN a permis de constater que la déformation longitudinale locale atteint sa valeur maximale en extension lorsque la contrainte égale la résistance maximale à la traction des poutrelles. Au-delà de cette valeur, la fissure se développe suivant le mode I.

- Des relations ont été établies entre la résistance à la traction avec la teneur en eau d'une part et la succion initiale d'autre part. Les résultats ont montré qu'à mesure que la teneur en eau diminue, la résistance à la traction augmentait de façon sensible. Par conséquent, plus la succion initiale est élevée, plus la pente de la courbe de variations de la résistance à la traction est élevée.

Enfin, nous avons tenté de faire la parallèle entre la rupture induite par une sollicitation mécanique et celle due au séchage.

- Nous avons utilisé la notion de la déformation critique pour l'analyse. L'étude a montré que les paramètres hydriques initiaux dans les essais de dessiccation ont un impact

sur comment atteindre la déformation critique et sur l'amorçage des fissures. Dans les essais de flexion, la déformation de la zone tendue de la poutrelle atteint sa valeur critique lorsque la contrainte atteint la résistance maximale en traction de l'argile.

- Les résultats ont mis en évidence que la fissuration se propage avec une augmentation de la succion locale (estimée) qui devient très marquée au niveau de la pointe des fissures.

→ Perspectives

Les conclusions avancées dans ce travail de thèse nous amènent à proposer les perspectives suivantes :

Perspectives Axe 1 :

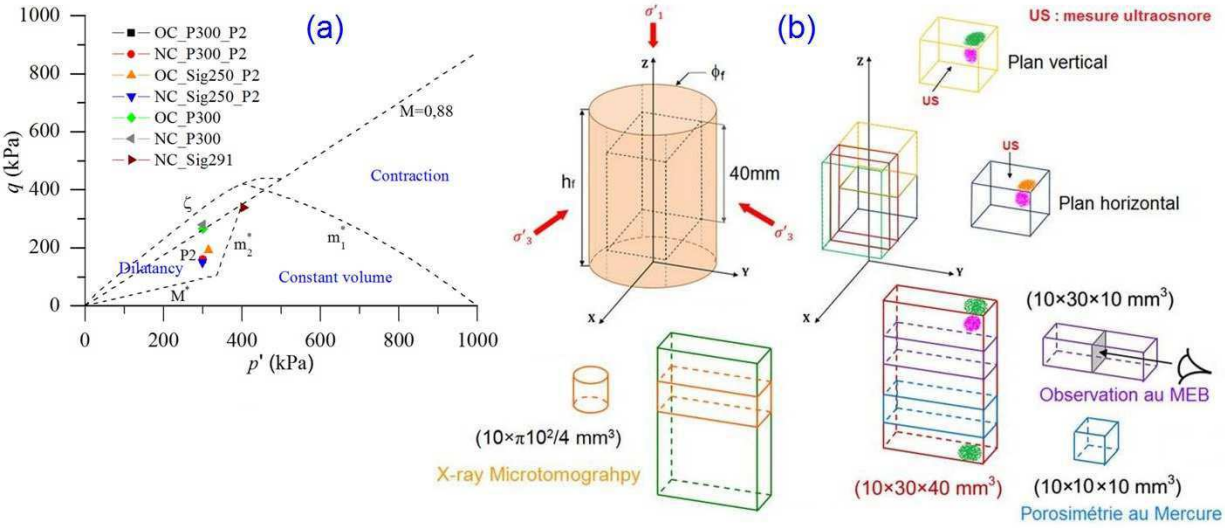
- Poursuivre l'étude initiée dans l'**axe 1** avec une amélioration du dispositif expérimental de mesures acoustiques. D'abord, en introduisant le dispositif à l'intérieur de la cellule triaxiale pour permettre des mesures ultrasons instantanées durant le chargement. Ensuite, adapter le dispositif de telle sorte à placer les transducteurs émetteur/récepteur en contact avec l'échantillon pour mesurer en plus de la vitesse d'onde longitudinale V_p, la vitesse d'onde transversale V_s afin de caractériser le coefficient de Poisson et plus précisément caractériser le module élastique et dynamique.

Entamer une investigation à l'échelle microscopique sur les mêmes échantillons d'argile que ceux utilisés pour les mesures ultrasons. Cette investigation a d'ors et déjà été abordée dans le cadre d'une thèse (2015-2018) menée par Qianfeng GAO. Les observations microscopiques sont effectuées en utilisant les techniques suivantes :

- la porosimétrie au Mercure (MIP),

- le microscope électronique à balayage (SEM),

- la micro-tomographie aux rayons-X (XMT).



(a) Essais triaxiaux choisis dans le plan [q - p'], (b) Découpe des échantillons pour les différentes techniques d'observations microscopiques.

Perspectives Axe 2 :

- Pour poursuivre l'étude menée dans l'**axe 2**, nous proposons d'étendre à 3D la mesure par la CIN. Ceci est possible en mettant en place une deuxième caméra HD permettant, d'une part, de mesurer le déplacement vertical. Ainsi pouvoir également calculer

la déformation volumique globale et locale plus précisément. Il sera alors possible de calculer l'indice des vides de l'échantillon au cours du séchage.

D'autre part, l'avantage d'avoir deux caméras HD dans les dispositifs de dessiccation libre et contrôlée est de pouvoir utiliser le logiciel Vic3D permettant une analyse en 3 dimensions (X, Y et Z) du réseau de fissures par la corrélation d'images numériques 3D.

Nous proposons également de développer un programme sur Matlab, en utilisant les images capturées au cours du séchage libre et contrôlé dans les essais réalisés, pour permettre une analyse morphologique des fissures (longueur, largeur et densité de fissures …etc). Ce travail avait déjà commencé dans le cadre de cette thèse, mais le programme a besoin d'être complété et amélioré.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

A :

Ajaz A. and Parry R. H. G. (1975) "*Stress-strain behaviour of two compacted clays in tension and compression*". Geotechnique, 25(3), 495–512.

Ajaz A. and Parry R. H. G. (1975b) "*Analysis of bending stresses in soil beams*". Geotechnique, 25(3), 586–591.

AL-Hussaini M. (1981) "*Tensile Properties of Compacted Soils*". Laboratory Shear Strength of Soil,R.N.Young and F. C. Townsend, Eds., ASTM International, pp. 207–225.

Allais L., Bornert M., Bretheau T., Caldemaison D. (1994) "*Experimental characterization of the local strain field in a heterogeneous elastoplastic materials*", Acta Metallurgica et Materialia, 42, p3865–80.

Atkinson J. H. (2000) "*Non-linear soil stiffness in routine design*". Geotechnique, 50(5), 457-50.

Aublivé N., Djéran-Maigre I., Chiarelli A. S., Cabrillac R. & Su K. (2001), "*Modélisation rhéologique des Argilites de l'Est*", XVème Congrès français de mécanique.

Auvray R., Rosin-Paumier S., Abdallah A. & Masrouri F. (2014) "*Quantification of soft soil cracking during suction cycles by image processing*". Eur. J. Environ. Civ. Engng 18, No. 1, 11–32.

Avila G. (2004) "*Study of shrinkage and cracking of clays – Application to clay in Bogota*", Doctoral dissertation, Polytechnic University of Catalunya, Spain.

B :

Bard E. (1993) "*Méthode d'analyse des lois de comportement des sols*", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale Paris, France.

Bazant Z. P., Cedolin L. (1991) "*Stability of Structures – Elastic, Inelastic, Fracture, and Damage Theories*", Oxford University Press.

Benchabane A. (2006) "*Etude du comportement rhéologique de mélanges argiles - polymères. Effets de l'ajout de polymères*", Thèse de Doctorat, Université Louis Paster - Strasbourg I, France.

Ben Rhaiem H., Tessier D. and Pons C. H. (1986) "*Comportement hydrique et evolution structurale et texturale des montmorillonites au cours d'un cycle de dessiccation-humectation; I, Cas des montmorillonites calciques*" Clay Minerals 21, 9-29.

Bergaya F., and Lagaly G. (2006) "*General introduction: clays, clay minerals, and clay science*". Handbook of Clay Science, Developments in Clay Science, Vol. 1, pp 1-18.

Bernier F., Volckaert G., Alonso E. and Villar M. (1997) "*Suction-controlled experiments on Boom clay*". Engineering Geology, 47: 325–338.

Bésuelle P., Desrues J., Raynauld S. (2000) "*Experimental characterisation of the localisation phenomenon inside a Vosges sandstone in a triaxial cell*". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 37: 1223-1237.

Bhuiyan M. H., Kolstø M. I., Holt R. M. (2010) "*Mechanical and acoustical properties of sand-clay mixtures under stress*", The 44th US Rock Mechanics Symposium and 5th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium, held in Salt Lake City, UT June 27-30.

Bhuiyan M. H., Holt R. M., Larsen I., Stenebraten J. F. (2013) "*Static and dynamic behaviour of compacted sand and clay: Comparison between measurements in triaxial and oedometric test systems*", Geophysical Prospecting, vol. 61, p. 329-340.

Biarez J. (1962) "*Contribution à l'étude des propriétés mécaniques des sols et des milieux pulvérulents*", Thèse de Doctorat d'État, Université de Grenoble, France.

Biarez J., Hicher P. Y. (1994) "*Elementary Mechanics of soils behavior, Saturated remoulded soils*", Balkema, Rotterdam-Brookfield.

Birch F. (1960) "*The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars*", J. geophys. Res., 65, 1083-1102.

Bishop A. W. (1959) "*The principle of effective stress*". Tek. Ukeblad 39, 859–863.

Bishop A. W. and Donald I. B. (1961) "*The experimental study of partly saturated soils in the triaxial apparatus*", Proc. 5th. Int. ConJ: Soil Mech. Fdn Engng 1, 13-21.

Bornert, M. (1996) "*Morphologie microstructurale et comportement mécaniques, caractérisations expérimentales, approches par bornes et estimations autocohérentes généralisées*", Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Bouziri S. (2007) "*Etude des mécaniques de déformation dans les argiles surconsolidées*", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale Paris, France.

Brace W. F. (1960) "*An Extension of the Griffith Theory of Fracture to Rocks*", J. Geophysical Res., Vol. 65, No. 10, p 3477-3480.

Brémand F., Cottron M., Doumalin P., Dupré J-C., Germaneau A., Valle V. (2012) "*Mesures en mécaniques par méthodes optiques*". Dossier Techniques de l'ingénieur, R1850, v2., p1-22.

Brignoli E. G. M., Gotti M. and Stokoe K. H. (1996) "*Measurement of shear waves in laboratory specimens by means of piezoelectric transducers*", Geotechnical Testing Journal, 19(4), 384–397.

C :

Camp Devernay S. (2008) "*Comportement sous flexion d'une argile : application a la couverture d'une ISD TFA*". Thèse de doctorat, Université de Joseph Fourrier, Grenoble I, France.

Cascante G. and Santamarina C. (1997) "*Low Strain Measurements Using Random Noise Excitation*", Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 20, No. I, pp. 29-39.

Chapman D. L. (1913) "*A contribution to the theory of electrocapillarity*" Philos. Mag. 6, 475-481.

Chertkov V. Y. (2002) "*Modelling cracking stages of saturated soils as they dry and shrink*". European Journal of Soil Science 53, 105–118.

Chiarelli A. S. (2000) "*Etude expérimentale et modélisation du comportement mécanique de l'Argilite de l'Est*", thèse de doctorat de l'Université de Lille, France.

Coop M. R., Jovicic V., Atkinson J. H. (1997) "*Comparison between soil stiffnesses in laboratory tests using dynamic and continuous loading*". Proc. 14th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Hambourg, 1, 267-270.

Corte A. and Higashi A. (1960) "*Experimental research on desiccation cracks in soils*". U.S. Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment, Research Report No. 66, Corps of Engineers, Wilmette, Illinois, U.S.A.

Costet J., Sanglerat G. (1983) "*Cours pratiques de mécanique des sols 2 - Calcul des ouvrages*", Bordas, Paris.

Croney D., Coleman J. D. and Black W. P. M. (1958) "*The movement and distribution of water in soil in relation to highway design and performance*". Highway Res. Board Special Report, Washington DC, n°40, pp 226-252.

Cui Y.J., Yahia-Aissa M. and Delage P. (2002) "*A model for the volume change behaviour of heavily compacted swelling clays*". Engineering Geology, 64: 233–250.

D :

Dano C. and Hicher P-Y. (2002) "*Measurement of the shear modulus of various materials using bender elements*", Paramètres de calcul géotechnique. Magnan (ed.), Presses de l'ENPC/LCPC, Paris.

Dano C., Hareb H. and Hicher P-Y. (2003) "*Characterization of loire river sand in the small strain domain using new bender-extender elements*", 16th ASCE Engineering Mechanics Conference, July 16-18, University of Washington, Seattle.

Degarmo E. P., Black J. T. and Kohser R. A. (2003) "*Materials and processes in manufacturing*", 9th edn. Chichester, UK: Wiley.

Delage P. and Lefebvre G. (1984) "*Study of the structure of a sensitive Champlain clay and of its evolution during consolidation*". Can Geotech J 21(1): 21–35.

Delage P., Howat M. D., Cui Y. J. (1998) "*The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay*". Engineering Geology 50, 31–48.

Delage P. et Cui Y-J. (2000). "*L'eau dans les sols non saturés*". Techniques de l'Ingénieur. C301.

Delle Piane C., Dewhurst D. N., Siggins A. F., Raven M. D. (2011) "*Stress-induced anisotropy in brine saturated shale*", Geophys. J. Int., 184(2), 897-906.

Di Benedetto H., Cazacliu B., Geoffroy H., Sauzéat C. (1999) "*Sand behavior in very small to medium strain domains*". Proc. of the 2nd Int. Symp. on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Turin (Italie), 28-30 sept. 1999, Balkema, Rotterdam, 89-96.

Dizier A. (2011) "*Caractérisation des effets de température dans la zone endommagée autour de tunnels de stockage de déchets nucléaires dans des roches argileuses*", Thèse de Doctorat, Université de Liège, Belgique.

Dufour-Laridan E. (2001) "*Propriétés mécaniques des sols en petites déformations ; étude expérimentale d'un sable silteux*", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale Paris, France.

E :

El Hosri M. S. (1984) "*Contribution à l'étude des propriétés mécaniques des matériaux*" Thèse d'Etat, Univ. Paris 6, Paris, France.

Eslinger E. and Peaver D. (1988) "*Clay minerals for petroleum geologists and engineers*". SEPM Short course 22. Soc. Economic paleontologists and mineralogists, Tulsa, USA.

F :

Fang H. Y. and Chen W. F. (1971) "*New Method for Determination of Tensile Strength of Soils*", Highway Res. Record, No. 345, p 62-68.

Fang H. Y. and Chen W. F. (1972) "*Further Study of DoublePunch Test for Tensile Strength of Soils*", Proc. 3rd Southeast Asian Conf. on Soil Mech. Found. Eng. (Hong Kong), p 211-215.

Fauchille A-L. (2015) "*Déterminismes microstructuraux et minéralogiques de la fissuration hydrique dans les argilites de Tournemire : apports couplés de la pétrographie quantitative et de la corrélation d'images numériques*", Thèse de doctorat, Université de Poitiers, France.

Fisher R. A. (1926) "*On the capillary forces in an ideal soil; correction of formulas by W.B. Haines*". J. Agric. Sci. 16, 492–505.

Fjaer E., Holt R.M., Horsrud P., Raeen A.M., Risnes R. (2008) "*Petroleum Related Rock Mechanics*", 2nd Edition, Elsevier.

Fleureau J-M., Kheirbek-Saoud S., Taibi S., Soemitro R. (1993) "*Behaviour of clayey soils on drying- wetting paths*". Can Geotech J 30(2): 287-296.

Fortineau J. (2006) "*Méthodes ultrasonores linéaires et non linéaires appliquées à l'étude de la reprise hydrique dans les polymères et composites*", Thèse de doctorat, Université de Tours, France.

Fredlund D. G. and Morgenstern N. R. (1977) "*Stress State Variables for Unsaturated Soils*", ASCE J. Geotech. Eng., Vol. 103, GT5, p 447-466.

Fredlund D. G. (1979) "*Appropriate concepts and technology for unsaturated soils*". Can. Geotech. J. 16, 121-139.

Fredlund D. G. and Rahardjo H. (1993) "*Soil mechanics for unsaturated soils*". John Willey, New York.

Frost J.D. and Yang C. (2003) "*Effect of end platens on microstructure evolution in dilatant specimens*". Soil and Foundations, Vol. 43, No. 4. PP 1-11.

Frydman S. (1964) "*The Applicability of the Brazilian (Indirect Tension) Test to Soils*". Australian Journal of Applied Science, Vol. 15, pp. 335–343.

G :

Gaombalet J. (2004) "*Modélisation du gonflement des argiles et de ses effets sur les ouvrages de stockage souterrain*", Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, France.

Gasc-Barbier M. (2002) "*Etude des mécanismes de déformation de roches argileuses profondes : apport de la microstructure et des analyses pétrophysiques*", Thèse de doctorat, Université Paris VI, France.

Gorjainov N.N., Ljachowickij F.M. (1979) "*Seismic Methods in Engineering Geology*", Moscow: Nedra.

Gouy M. G. (1910) "*Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte*" J. Phys. Radium (Paris) 9, 457-468.

Güven N. and Pollastro R. M. (1992) "*Clay-water interface and its rheological implications*", vol. 4. CMS Workshop Lectures. The Clay Minerals Society. Boulder, Colorado, USA.

Grunberger D., Djeran-Maigre I., Velde B. and Tessier D.(1994) "*Measurement through direct observation of kaolinite particle reorientation during compaction*" C.R. Acad. Sci. Paris 318 (11), 627-633.

H :

Hall S. A., Viggiani G., Charalampidou E., Bésuelle P., Rousseau C. (2007) "Caractérisation de l'endommagement localisé dans les géomatériaux à l'aide des ondes ultrasonores en conditions de laboratoire". *18ème Congrès français de mécanique, 27-31 août, Grenoble, France.*

Hamaker H. C. (1937) "*The London-van der Waals attraction between spherical particles*", Physica IV (10) 1058–1072.

Hammad T. (2010) "*Comportement des sédiments marins de grande profondeur: approche multiéchelle*", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale Paris, France.

Hardin B. O. and Richart E. E. (1963) "*Elastic wave velocities in granular soils*" J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 89(1), 33-65.

Hardin B. O. and Drnevich V. P. (1972) "*Shear modulus and damping in soils; measurement and parameter effects*" J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 98(6), 603-624.

Hardin B. O. (1978) "*The nature of stress-strain behavior for soils*". State-of-the-art report. Proceedings of specialty conference on earthquake engineering and soil dynamics, pp. 3-90. New York: American Society of Civil Engineers.

Hattab M. (1994) "*Etude expérimentale du comportement dilatant des argiles surconsolidées*". Thèse de Doctorat, Ecole Centrale Paris, France.

Hattab M. and Hicher P-Y. (2004) "*Dilating behaviour of overconsolidated clay*", Soils and Foundations 44(4), 27-40.

Hattab M., Fleureau J.-M. (2010) "*Experimental study of kaolin particle orientation mechanism*". Géotechnique 60(5): 323-331.

He P. (1999) "*Direct measurement of ultrasonic dispersion using a broadband transmission technique*". Ultrasonics, 37, 67-70.

Hicher P-Y. (1985) "*Comportement des argiles saturées sur divers chemins de sollicitations monotones et cycliques. Application à une modélisation élastoplastique et viscoplastique*", Thèse d'Etat. Univ. Paris 6, France.

Hicher P-Y. (1996) "*Elastic properties of soils*", Journal of Geotechnical Engineering, v. 122, p. 641–648.

Hicher P-Y., Wahyudi H. and Tessier D. (2000) "*Microstructural analysis of inherent and induced anisotropy in clay*". Mech. Cohesive-frictional Mater 5(5): 341–371.

Homand F., Shao J-F., Giraud A., Auvray C., Hoxha D. (2006) "*Pétrofabrique et propriétés mécaniques des argilites*". C. R. Geoscience 338, pp 882–891.

Homsi M. (1986) "*Contribution à l'étude des propriétés mécaniques des sols en petites déformations à l'essai triaxial*", PhD thesis, Ecole Centrale de Paris, France.

I :

Indarto (1991) "*Comportement mécanique et compactage des matériaux de barrages*", Thèse de Doctorat, École Centrale de Paris, France.

Irwin G. R. (1958) "*Fracture. In Handbuch der physik*". Edited by S. Flugge. Vol. 6. Springer-Verlag, Berlin, Germany.

J :

Jovicic V., Coop M.R. and Simic M. (1996) "*Objective criteria for determining G_{max} from bender element tests*", Géotechnique, 46(2), 357-362.

Jovicic V. and Coop M. R. (1997) "*Interpretation of bender element tests*", *Geotechnique*, 47(3), 875.

K :

Kassif G. and Ben Shalom A. (1971) "Experimental relationship between swell pressure and suction". Géotechnique 21 (3), 245–255.

Katti A. (2012) "*Etude expérimentale des fissurations dans les argilites de Bure et les argiles de synthèses soumises à des chargements statiques en flexion*". Rapport de stage Master 2 MMSP, Université de Lorraine, Metz, France.

Kodikara J. K., Barbour S. L., Fredlund D. G. (1999) "*Changes in clay structure and behavior due to wetting and drying*", proceedings of the 8th Australian-New Zealand Conference on Geomechanics, Hobart, p 179- 186.

Kodikara J. K., Barbour S. L., Fredlund D. G. (2002) "*Structure development in surficial heavy clay soils: a synthesis of mechanisms*", Australian Geomechanics, 37(3), 25–40.

Konrad J. M. and Ayad R. (1997a) "*Desiccation of a sensitive clay: field experimental observations*". Canadian Geotechnical Journal, 34 (6): 929–942. doi:10.1139/cgj-34-6-929.

Konrad J. M. and Ayad R. (1997b) "*An idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation*". Canadian Geotechnical Journal, 34 (4): 477–488. doi:10.1139/cgj-34-4-477.

Krishnayya A. V., Eisenstein Z. and Morgenstern N. R. (1974) "*Behavior of Compacted Soil in Tension*", Proc. ASeE, J. Geotech. Eng. Div., Vol. 100, Sept., GT9, p 1051-1061.

Kuwano R., Connolly T. M., Kuwano J. (1999) "*Shear stiffness anisotropy measured by multi directional bender elements transducers*". Proc. of the 2nd Int. Symp. on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Turin (Italie), 28-30 sept., Balkema, Rotterdam, 205-212.

L :

Lagerwerff J. V., Ogata G., Eagle H. E. (1961) "*Control of osmotic pressure of culture solutions with polyethylene glycol*". Science 133, 1486–1487.

Lakshmikantha M. R., Prat P. C. and Ledesma A. (2012) "*Experimental evidences of size-effect in soil cracking*". Can. Geotech. J., 49(3), 264–284.

Lau J. (1987) "*Desiccation cracking of soils*", Master thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Canada.

Lee I. K., and Ingles O. G. (1968) "*Strength and Deformation of Soils and Rocks*", Chapter 4 of Soil Mechanics Selected Topics, edited by I. K. Lee, Butterworths, London, p 195-295.

Lemaître J. et Chaboche J. L. (1985) "*Mécanique des matériaux solides*", Ed. Dunod, ISBN 2-10 001397-1.

Lenoir N., Marello S., Viggiani G., Bésuelle P., Desrues J. and Di Michiel M. (2004) "*X-ray micro tomography characterization of strain localization upon deviatoric loading of saturated fine-grained stiff soils*", in: J. Otani, Y. Obara (Eds.), X-ray CT for Geomaterials (GeoX2003), Balkema, pp. 147–155.

Leonards G. A., and Narain J. (1963) "*Flexibility of Clay and Cracking of Earth Dams*", Proc. ASCE, J. Soil Mech. Found. Div., Vol. 89, SM2, p 47-98.

Li H., Wei S., Qing C. and Yang J. (2003) "*Discussion on the position of the shear plane*" J. Colloid and Interface Science 258, 40-44.

Lloret A., Ledesma A., Rodriguez R., Sanchez M. J., Olivella S. and Suriol J. (1998) "*Crack initiation in drying soils*". In Proceedings of the Second International Conference on Unsaturated Soils, Beijing, China, 27-30 August. International Academic Publishers Beijing, China. pp 497–502.

Lloret A., Villar M. V., Sanchez M., Gens A., Pintado X. and Alonso E. E. (2003) "*Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes*". Géotechnique, 53(1): 27–40.

Lo Presti D. C. F., Jamiolkwski M., Pallara O., Pisciotta V. and Ture S. (1995) "*Stress dependence of sand stiffness*", Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, vol. 1, 71-76.

Lo Presti D. C. F., Pallara O., Jamiolkowski M. and Cavallaro A. (1999) "*Anisotropy of small strain stiffness of undisturbed and reconstituted clays*", Proceedings of the

International Symposium on Pre-failure deformation characteristics of geomaterials, Torino, Balkema, 3-9.

Luckham P. F. and Rossi S. (1999) "*Colloidal and rheological properties of bentonite suspensions*" Adv.Colloid Interface Sci. 82, 43-92.

Luo D., MacLeod J. E. S., Leng X., Smart P. (1992) "*Automatic orientation analysis of particles of soil microstructures*". Geotechnique 42, 97–107.

Lushnikov V. V., Vulis P. D. and Litvinov B. M. (1973) "*Relationship of the moduli of deformation in soil compression and tension*". Soil Mech. and Fdn Engng 10, No 6,403 5. (Translation by Consultants' Bureau, New York).

M :

Marcial D., Delage P. and Cui Y. J. (2002) "*On the high stress compression of bentonites*". Canadian Geotechnical Journal, 39: 812–820.

Marcial D. (2003) "*Comportement hydromécanique et microstructural des matériaux de barrière ouvragée*". Ph.D. thesis, École nationale des ponts et chaussées, Paris, France.

Marcuson W. E. and Wahls H. E. (1972) "*Time effects on dynamic shear modulus of clays*" J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 98(12), 1359-1373.

Marion D., Nur A., Yin H., Han D. (1992) "*Compressional velocity and porosity in sand-clay mixtures*". Geophysics, 57, 554-563.

Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. (2009) "*Rock Physics Handbook*", 2nd Edition, Cambridge.

Mitchell J. K. (1976) "*Fundamentals of Soil Behavior*", John Wiley & Sons, Inc., New York, p.183, p 237.

Mitchell J. K. (1993) "*Fundamentals of soil behavior*". 2nd ed. New York: Wiley.

Mondol N. H., Bjørlykke K., Jahren J., Høeg K. (2007) "*Experimental mechanical compaction of clay mineral aggregates-Changes in physical properties of mudstones during burial*", Marine and Petroleum Geology, vol. 24, p. 289-311.

Morgenstern N. R. and Tchalenko J. S. (1967) "*Microscopic structures in Kaolin subjected in direct shear*". Géotechnique 17(4): 309–328 DOI 10.1680/geot.1967.17.4.309.

Morris P. H., Graham J. and Williams D. J. (1992) "*Cracking in drying soils*". *Canadian Geotechnical Journal* 29: 263 – 277.

N :

Nahlawi H. (2004) "*Behaviour of a reactive soil during desiccation*". M.Sc. thesis, Department of Civil Engineering, Monash University, Victoria, Australia.

Nahlawi H., Chakrabarti S. and Kodikara J. (2004) "*A direct tensile strength testing method for unsaturated geomaterials*". Geotech. Testing J., 27(4), 356–361.

O :

Olphen V. (1977) "*An introduction to clay colloid chemistry*", 2nd Ed. John Wiley and Sons, Inc, New York.

P :

Péron H., Hueckel T., Laloui L. and Hu L.B. (2009a) "*Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils: experimental characterisation and mechanisms identification*". Canadian Geotechnical Journal 46: 1177-1201.

Philip L. K., Shimell H., Hewitt P. J. and Ellard H. T. (2002) "*A field-based test cell examining clay desiccation in landfill liners*", Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 35, 345–354.

Pons C.H. (1980) "*Mise en évidence des relations entre la texture et la structure dans les systèmes eau smectites par diffusion aux petits angles du rayonnement synchrotron*". Thèse de l'Université d'Orléans, France.

R :

Raynaud S., Naga-tillard D., Desrues J., Mazerolle F. (2007) "*Brittle-to-ductile transition in Beaucaire marl from triaxial tests under the CT-scanner*". Int J Rock Mech Min Sci 45: 653–671.

Reuss A. (1929) "*Berechnung der Fliessgrenzen von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle*", Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, vol. 9, 1929, p. 49-58.

Richards B. G. (1966) "*The significance of moisture flow and equilibria in unsaturated soils in relation to the design of engineering structures built on shallow foundations in Australia*". Symposium on Permeability and Capillarity, American Society for Testing and Materials, Atlantic City, NJ.

Richards L. A. (1941) "*A pressure membrane extraction apparatus for soil solution*". Soil science, vol. 51, pp 377-386.

Rivera R. C. (1988) "*Détermination des propriétés mécaniques des sables et des argiles en régime dynamique et cycliques en faibles déformations*" PhD thesis, Ecole Centrale de Paris, France.

S :

Sarout J., Molez L., Guéguen Y., Hoteit N. (2007) "*Shale dynamic properties and anisotropy under triaxial loading: experimental and theoretical investigations*". Phys Chem Earth 32(8–14): 896–906.

Scholey G. K., Frost J. D., Lo Presti D. C. F. and Jamiolkowski M. (1995) "*A review of instrumentation for measuring small strains during triaxial testing of soil specimens*", Geotechnical Testing Journal, 18(2), 137–156.

Seed H. B. and Idriss I. M. (1970) "*Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis*" Rep. No. EERC 70-10, Earthquake Engrg. Res. Ctr., Univ. of California, Berkeley, Calif.

Shao J. F. et Lydzba D. (1999) "*Un modèle d'endommagement poroélastique pour milieux poreux saturés*", C. R. Acad. Sci. Paris, t. 327, Série II b, pp. 1305-1310.

Shirley D. J. & Hampton L. D. (1978) "*Shear-wave measurements in laboratory sediments*", Journal of Acoustics Soc. Am., 63(2), 607-613.

Sivakomar V., Doran I. G., Graham J. (2002) "*Particle orientation and its influence on the mechanical behaviour of isotropically consolidated reconstituted clay*", Engineering Geology 66 (3-4), pp 197-209.

Souli H., Fleureau J. M., Soemitro R. (2007) "*Apport de la physico-chimie à l'étude du retrait gonflement d'une argile plastique compactée*", Revue Française de Géotechnique N° 120-121, 4ème trimestre, pp 131-142.

Stirk G. B. (1954) "*Some aspects of soil shrinkage and the effects of cracking upon water entry into the soil*", Aust. J. Agric. Res. 5, pp 279-290.

Suklje L., Vogrincic G., Tratnikova G. and Jenko M. (1967) "*Testing of the flexibility of clays using photographic registration of displacements*". ACTA Geotechnica 15-18, Ljubljana.

Sutton M. A., Cheng M., Peters, W. H., Chao Y. J., McNeill S. R. (1986) "*Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis*", Image and Vision Computing, 4, (1986), p143-150.

T :

Taïbi 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.

Taïbi S., Fleureau J.-M., Hadiwardoyo S., Kheirbek-Saoud S. (2008) "*Small and large strain behaviour of an unsaturated compacted silt*", European Journal of Environmental and Civil Engineering, 12, N°3, p 203-228.

Tamrakar S. B., Toytosawa Y., Mitachi T. and Itoh K. (2005) "*Tensile strength of compacted and saturated soils using newly developed tensile strength measuring apparatus*". Soils Foundations, 45(6), 103–110.

Tang A.M. and Cui Y.J. (2005) "*Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay*". Can. Geotech. J. 42, 1–10.

Tang C. S., Cui Y. Y., Shi B., Tang A. M. and Liu C. (2011) "*Desiccation and cracking behavior of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles*". Geoderma 166: 111-118.

Tang C. S., Pei X. J., Wang D. Y., Shi B., Li J. (2014) "*Tensile strength of compacted clayey soil*". J. Geotech. Geoenviron. Eng., 04014122 http://dx.doi.org/10.1061/ (ASCE)GT. 1943- 5606.0001267.

Tang G. X. and Graham J. (2000) "*A method for testing tensile strength in unsaturated soils*". Geotech. Testing J., 23(3), 377–381.

Tempany H. A. (1917) "*The shrinkage of soils*", Journal of Agricultural Science 8, 312-333.

Tessier D. (1984) "*Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structure au cours de la dessiccation et de la réhumectation*" Thèse de doctorat de l'Université de Paris VII.

Thomsen L. (1986) "Weak elastic anisotropy", *Geophysics,* **51,** 1954–1966.

Touret O. (1988) "*Structure des argiles hydratées. Thermodynamique de la déshydratation et de la compaction des smectites*". Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, France.

Touret O., Pons C. H., Tessier D., Tardy Y. (1990) "*Etude de la répartition de l'eau dans des argiles saturées Mg2+ aux fortes teneurs en eau*", Clay Minerals, 25, pp 217-233.

Truche C. (2010) "*Caractérisation et quantification des minéraux argileux dans les sols expansifs par spectroscopie infrarouge aux échelles du laboratoire et du terrain*". Thèse de doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, France.

Turki F. (1987) "*Hydratation des matériaux argileux gonflants*". Thèse de doctorat Sci., Université de Strasbourg, France.

V :

Valencia F. (2008) "*Caractérisation des particules fines d'un matériau granulaire de fondation par l'essai au bleu de méthylène*", Maîtrise en Génie Civil, Université Laval, Québec.

Vasseur G., Djeran M. I., Grunberger D., Rousset G., Tessier D., Velde B. (1995) "*Evolution of structural and physical parameters of clays during experimental compaction*". Marine and Petroleum Geology 12 (8), 941–954.

Velde B. (1995) "*Origin and mineralogy of clays: clays and the environment*". Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-08195-8.

Viggiani G. and Atkinson J. H. (1995) "*Interpretation of bender element tests*", Geotechnique, 45(1), 149–154.

W :

Wahyudi H. (1991) "*Etude des propriétés mécaniques des matériaux argileux en relation avec leur organisation à différentes échelles*". Thèse de Doctorat, Ecole Centrale Paris, France.

Wei X., Hattab M., Fleureau J. M. & Hu R. L. (2013) "*Micro-macro-experimental study of two clayey materials on drying paths*". Bull. Engng Geol. Environ. 72, No. 3, 495–508.

Wei X. (2014) "*Etude micro-macro de la fissuration des argiles soumises à la dessiccation*". Doctoral dissertation, Ecole Centrale Paris, France.

Wei X., Hattab M., Bompard P. and Fleureau J. M. (2016) "*Highlighting some mechanisms of crack formation and propagation in clays on drying path*". Geotechnique, 66(4), 287–300.

Wei X., Duc M., Hattab M., Reuschlé T., Taibi S., Fleureau J. M. (2016b) "*Effect of decompression and suction on macroscopic and microscopic behavior of a clay rock*". Acta Geotech., 1–19, doi:10.1007/s11440-016-0454-8.

Wheeler S. J., Sharma R. J. & Buisson M. S. R. (2003) "*Coupling of hydraulic hysteresis and stress–strain behaviour in unsaturated soils*", Géotechnique 53, No. 1, 41–54.

Wilson S. D. and Dietrich R. J. (1960) "*Effect of Consolidation Pressure on Elastic and Strength Properties of Clay*" Proceedings, ASCE Soil Mechanics and Foundations Division, Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, Boulder, CO, ASCE, New York.

Y :

Yimsiri S. and Soga K. (2000) "*Micromechanics-based stress–strain behaviour of soils at small strains*". Géotechnique 50, No. 5, 559–571.

Yukselen Y. and Kaya A. (2006) "*Comparison of Methodsfor Determinig Spécifie Surface Area of soils*". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 132(7): 931-936.

Z :

Zerhouni M. I. (1991) "*Rôle de la pression interstitielle négative dans le comportement des sols - Application aux routes*", Thèse de Doctorat, École Centrale de Paris, France.

Zervoyannis C. (1982) "*Étude synthétique des propriétés mécaniques des argiles saturées et des sables sur chemin oedométrique et triaxial de révolution*", Thèse de Doctorat, École Centrale de Paris, France.

Zienkiewicz O. C. (1977) "*The Finite Element Method*", 3rd Ed., McGraw-Hill Co., p 664-676.

Zur B. (1966) "*Osmotic control the matric soil water potential*". Soil Science 102, 394–398.

Annexes

Annexes

Annexe 1. 389

Annexe 1.1. Principe de la méthode de corrélation d'images numériques 389
Annexe 1.2. Vérification de la transparence de la chambre de dessiccation.....392
Annexe 1.3. Evolution de la teneur en eau des poutrelles sous succion.....396

Annexe 2. 399

Annexe 2.1. Vitesse d'écrasement sur chemin à p'=constante 399
Annexe 2.2. Détermination du module élastique dynamique 399

Annexe 3. 403

Annexe 3.1. Vitesses de séchage sous différentes succions.....403
Annexe 3.2. Déformations globales ε_x, ε_y et ε_z sous dessiccation contrôlée.....403
Annexe 3.3. Champ des déplacements locaux sous dessiccation contrôlée.....405
Annexe 3.4. Programme Matlab de calcul de la succion locale 407
Annexe 3.5. Distributions de la succion locale.....408
Annexe 3.6. Déformations locales sous dessiccation contrôlée.....410

Annexe 4. 419

Annexe 4.1. Déformations locales obtenues sous traction indirecte par flexion 419

Annexe 1

Annexe 1.

Nous présentons dans cette partie, les annexes mentionnées dans le chapitre II.

Annexe 1.1. Principe de la méthode de corrélation d'images numériques

La figure 1.1 présente le schéma de principe de la CIN (Brémand et al., 2012).

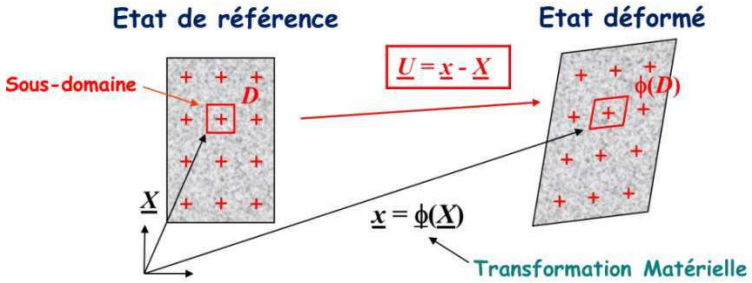


Figure 1.1 : Représentation schématique du principe de la corrélation d'images numériques (Brémand et al., 2012).

L'image prise par la caméra est divisée en sous-domaines (D), appelés aussi Subsets (en anglais), qui forment une grille virtuelle de points de mesure. Elle a pour but, pour chaque Subset (D) identifié par sa position $\underline{X}$(X,Y), de retrouver sa position sur l'image déformée définie par la position $\underline{x}$(x,y). Cette étape est réalisée en comparant la ressemblance des niveaux de gris de chaque sous-domaine.

La méthode CIN est destinée à calculer le champ de déformation d'un matériau ayant subit une transformation physique. Pour cela, elle autorise chaque sous-domaine aussi bien à se déplacer qu'à se déformer. Ceci se matérialise par l'attribution, pour chaque sous-domaine, un déplacement $\underline{U}$(u,v) de son centre entre les deux images de référence et déformée. Ce déplacement est modélisé par une transformation matérielle, notée ϕ, et décrite par l'équation 1.1 (Brémand et al., 2012).

$$\underline{x} = \varphi(\underline{X}) = \underline{X} + \underline{U}(\underline{X}) \qquad [1.1]$$

Les valeurs obtenues pour l'ensemble des sous-domaines forment le champ de déplacement de la surface de l'échantillon à partir duquel les déformations sont calculées par dérivation numérique.

Afin d'assurer des variations spatiales de niveaux de gris dans les images, l'application d'un mouchetis est indispensable. Cela peut se faire, par exemple, par la projection d'une peinture aérosol sur la surface de l'échantillon.

La correspondance entre les deux images de référence et déformée est conditionnée par l'hypothèse de la conservation de l'intensité des niveaux de gris au cours du chargement. Ceci est interprété par l'équation 1.2 où $f(\underline{X})$ et $g(\underline{X})$ représentent respectivement les niveaux de gris à l'état de référence et à l'état déformé (Brémand et al., 2012).

$$f(\underline{X}) = g(\varphi(\underline{X})) \qquad [1.2]$$

Cette égalité n'est pas entièrement satisfaite. Ceci peut être dû à des variations de lumière lors de l'acquisition ou des bruits du capteur. Pour cela, il faut avoir la valeur la plus faible possible du terme ($f(\underline{X})$ - $g(\varphi(\underline{X}))$) afin de déterminer le déplacement $\underline{U}$. Pour se faire, la transformation matérielle ϕ, inconnue, est approchée par son développement limité ϕ_0 décrit par l'équation 1.3.

$$\varphi_0(\underline{X}) = \underline{X} + \underline{U}(\underline{X_0}) + \frac{\partial \underline{U}}{\partial \underline{X}}(\underline{X_0}).(\underline{X} - \underline{X_0}) + \frac{1}{2}(\underline{X} - \underline{X_0}).\frac{\partial^2 \underline{U}}{\partial^2 \underline{X}}(\underline{X_0}).(\underline{X} - \underline{X_0}) + \ldots \qquad [1.3]$$

$\underline{X_0}$ est le centre du sous-domaine D sur lequel développement limité ϕ_0 est effectué. A l'ordre 0, ϕ_0 correspond à un déplacement d'un solide rigide $\underline{U}$(u,v) en considérant que les variations de déplacement sur le domaine de corrélation D sont nulles. A l'ordre 1, ϕ_0 correspond à une translation et un gradient local homogène sur le domaine de corrélation. Les variations du champ de déplacement sont supposées linéaires, l'expression de la transformation ϕ devient comme suit :

$$\varphi(\underline{X}) = \underline{X} + \underline{U}(\underline{X_0}) + \frac{\partial \underline{U}}{\partial \underline{X}}(\underline{X_0}).(\underline{X} - \underline{X_0}) \qquad [1.4]$$

Dans notre étude, nous avons considéré ce dernier cas pour la suite du calcul du champ de déformation.

La CIN permet de déterminer deux types de déformations :

a - Calcul des déformations locales

Il existe diverses méthodes de calcul du champ de déformation à partir du champ de déplacement mesuré (Allais, 1994; Bornert, 1996). La plus courante est celle basée sur les différences finies. Elle est développée par Fauchille (2015), dans le cas bidimensionnel 2D, où le calcul dépend de deux paramètres : le pas de la grille régulière noté "p" et le décalage entre chaque centre (x,y) de chaque domaine de corrélation noté "d_c". La surface totale prise en compte pour le calcul des déformations est appelée "zone de déformation". La taille de ces zones est conditionnée par les valeurs de "p" et "d_c" dont le choix influence la résolution spatiale et par conséquent la précision de la mesure.

Les expressions considérées des déformations $\varepsilon_{ij}(x,y)$ calculées dans le plan (z=0) sont les suivantes :

$$\varepsilon_{xx}(x,y) = \frac{1}{p(2p+1)} \sum_{n=1}^{p} \sum_{m=-p}^{p} \frac{U_x(x+n, y+m) - U_x(x-n, y+m)}{2nd_c} \qquad [1.5]$$

$$\varepsilon_{yy}(x,y)=\frac{1}{p(2p+1)}\sum_{n=-p}^{p}\sum_{m=1}^{p}\frac{U_y(x+n,y+m)-U_y(x+n,y-m)}{2md_c} \quad [1.6]$$

$$\varepsilon_{xy}(x,y)=\frac{1}{2p(2p+1)}\sum_{n=-p}^{p}\sum_{m=1}^{p}\frac{U_x(x+n,y+m)-U_x(x+n,y-m)}{2md_c}$$

$$+\frac{1}{2p(2p+1)}\sum_{n=1}^{p}\sum_{m=-p}^{p}\frac{U_y(x+n,y+m)-U_y(x+n,y-m)}{2nd_c} \quad [1.7]$$

Où $U_x(x,y)$ et $U_y(x,y)$ sont respectivement les déplacements suivant les directions x et y.

b - Calcul des déformations principales

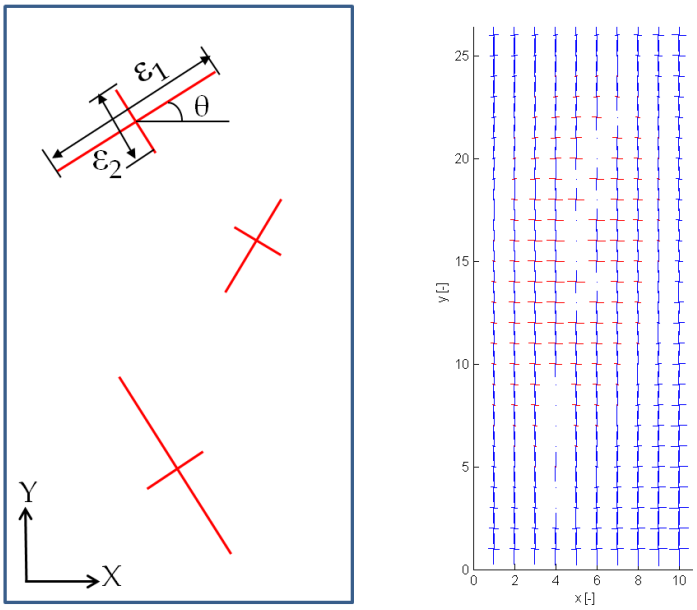
Les déformations et directions principales sont déterminées à partir des déformations locales en utilisant les expressions suivantes :

$$\varepsilon_1(x,y)=\frac{\varepsilon_{xx}(x,y)+\varepsilon_{yy}(x,y)}{2}+\sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{xx}(x,y)-\varepsilon_{yy}(x,y)}{2}\right)^2+\varepsilon_{xy}^2(x,y)} \quad [1.8]$$

$$\varepsilon_2(x,y)=\frac{\varepsilon_{xx}(x,y)+\varepsilon_{yy}(x,y)}{2}-\sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{xx}(x,y)-\varepsilon_{yy}(x,y)}{2}\right)^2+\varepsilon_{xy}^2(x,y)} \quad [1.9]$$

$$\theta=\frac{1}{2}arctg\left(\frac{2\varepsilon_{xy}(x,y)}{\varepsilon_{xx}(x,y)-\varepsilon_{yy}(x,y)}\right) \quad [1.10]$$

Wei (2014) a développé un programme sous Matlab permettant de calculer et tracer le tenseur de déformations principales à partir des déformations locales obtenues par la CIN. Ce programme permet d'identifier les mécanismes de fissuration lorsque l'échantillon est soumis à une sollicitation hydrique. La figure 1.2 présente le résultat du traitement des déformations principales effectué sous le programme Matlab.



(a) (b)

Figure 1.2 : Traitement des déformations et directions principales sous Matlab par Wei (2014) : (a) schéma de principe, (b) résultat de calcul.

Sur la figure 1.2 (b), la couleur rouge signifie que la valeur de la déformation principale est positive (extension) et la couleur bleue signifie qu'elle est négative (compression).

Annexe 1.2. Vérification de la transparence de la chambre de dessiccation

Les cartographies Vic2D des déformations locales, calculées pour la vérification de la transparence de la vitre dans la chambre de dessiccation contrôlée, sont reportées dans cette section.

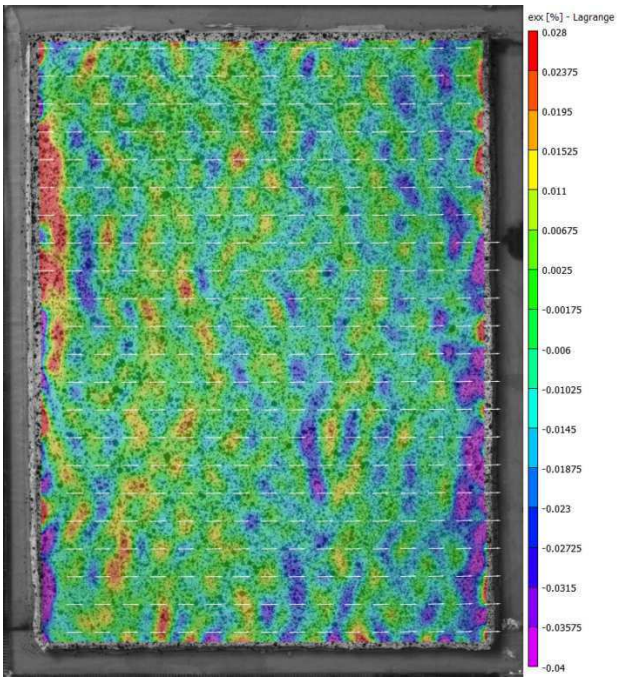
Rappelons les trois configurations appliquées lors de la vérification avec et sans vitre :

- configuration A : une translation U=2.2 mm dans le sens transversal (Fig. 1.3),

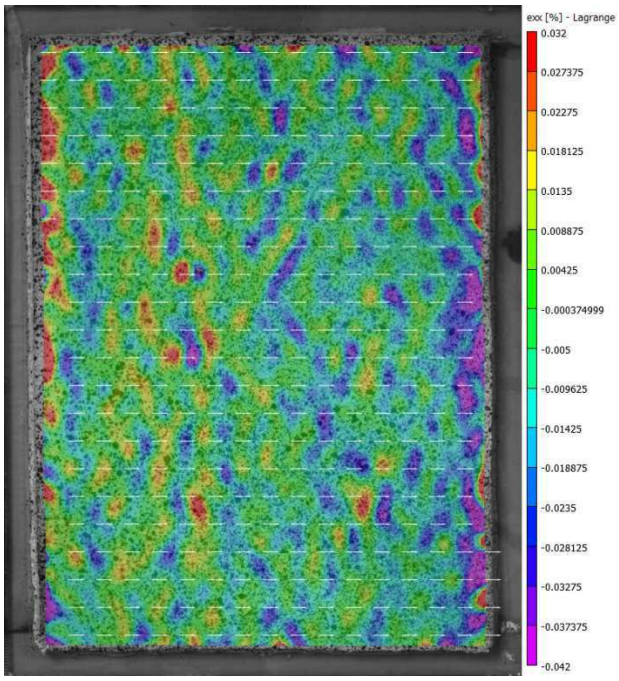
- configuration B : une translation V=2 mm dans le sens longitudinal (Fig. 1.4),

- configuration C : une rotation θ=2° par rapport à l'axe U (Fig. 1.5).

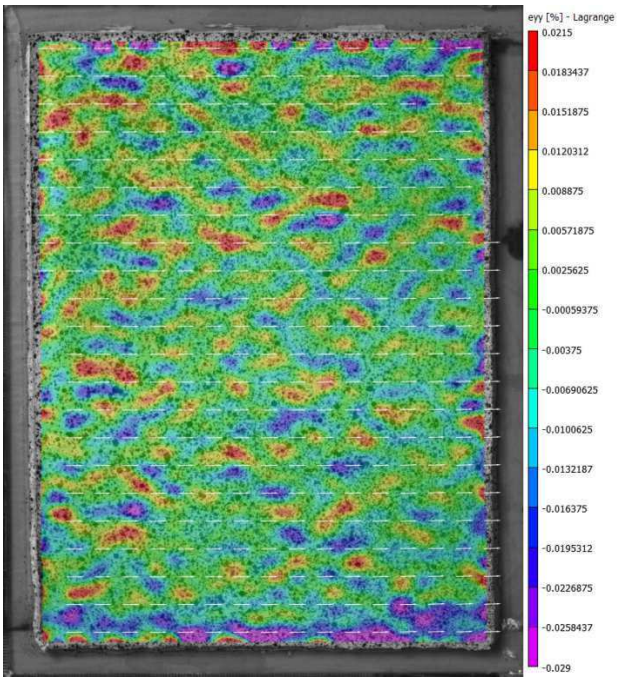
1- Configuration A :



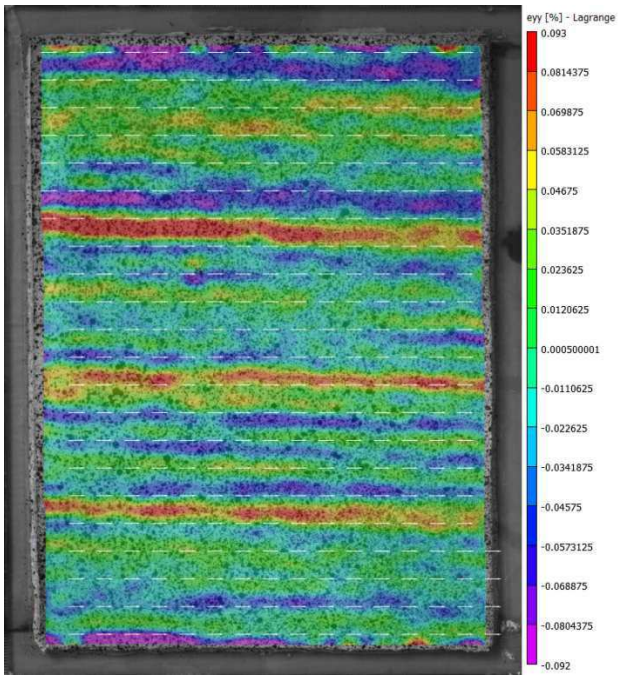
ε_{xx} (%) sans vitre



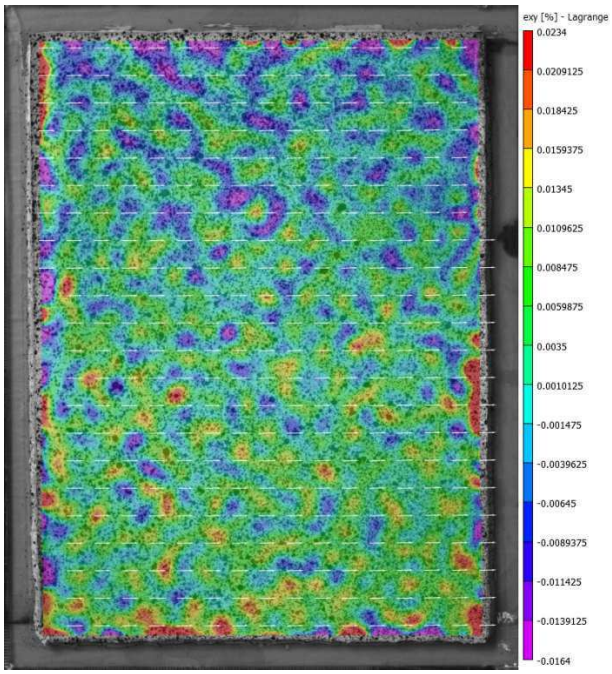
ε_{xx} (%) avec vitre

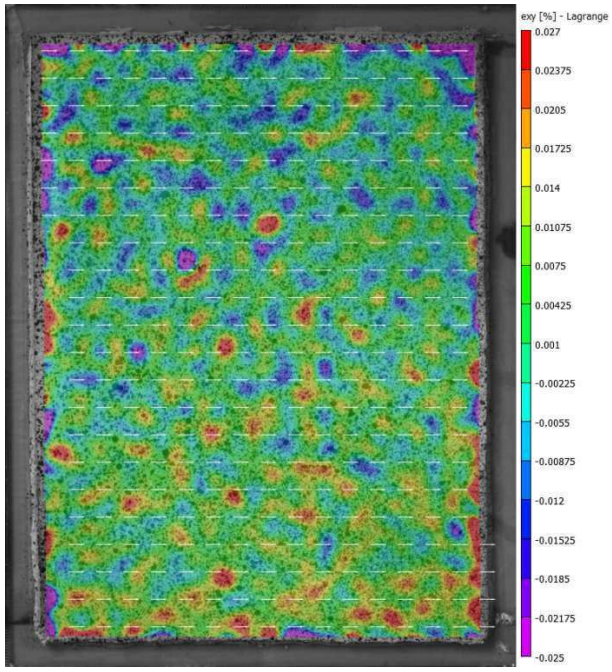


ε_{yy} (%) sans vitre



ε_{yy} (%) avec vitre



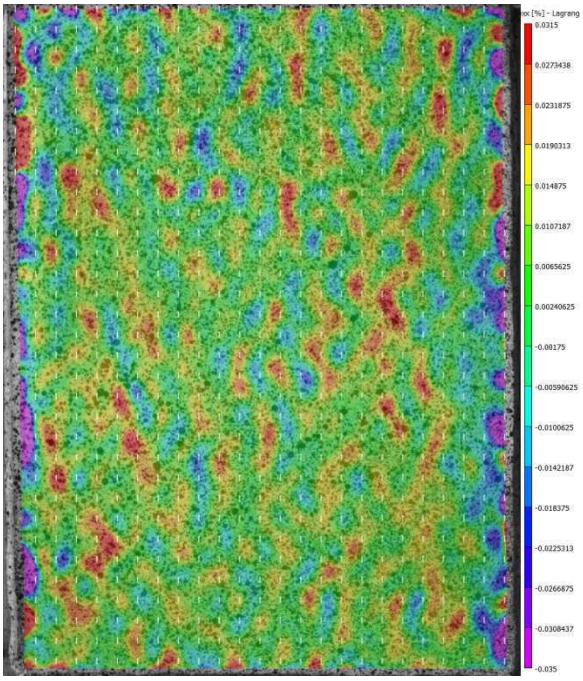


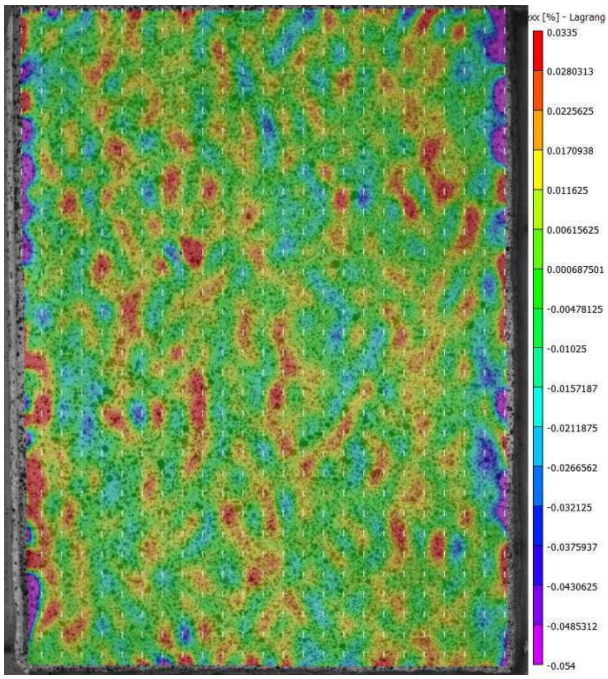
ε_{xy} (%) sans vitre

ε_{xy} (%) avec vitre

Figure 1.3 : Cartographies Vic2D des déformations locales obtenues dans la configuration A.

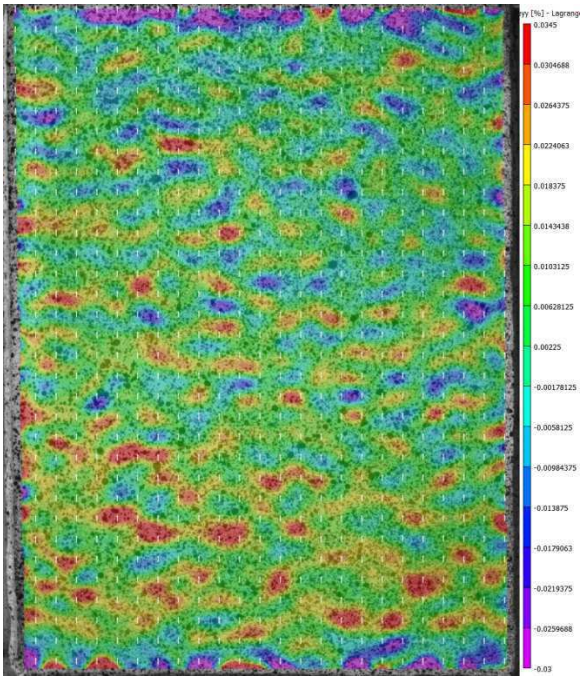
2- Configuration B :



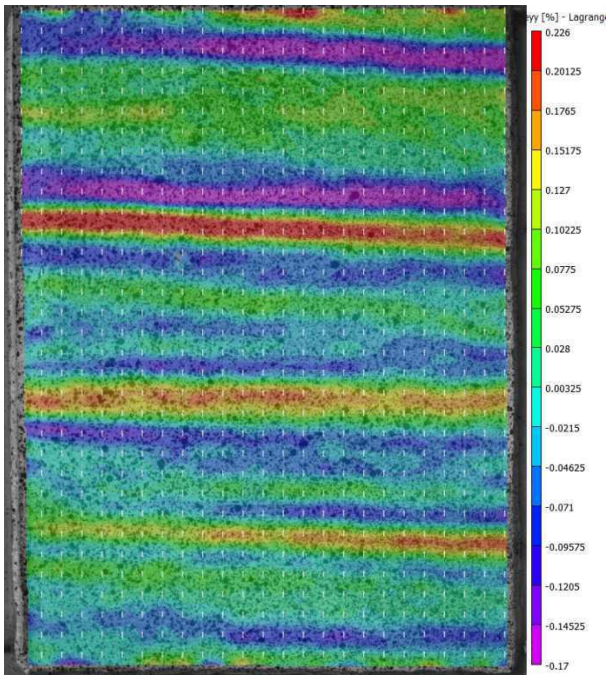


ε_{xx} (%) sans vitre

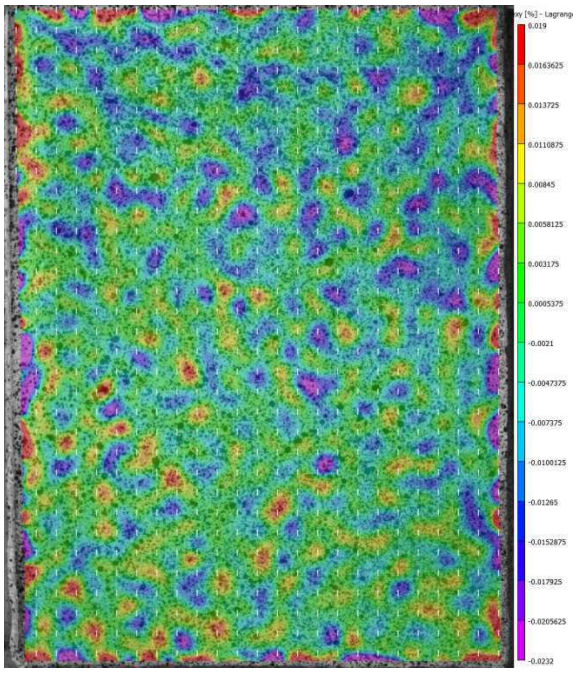
ε_{xx} (%) avec vitre



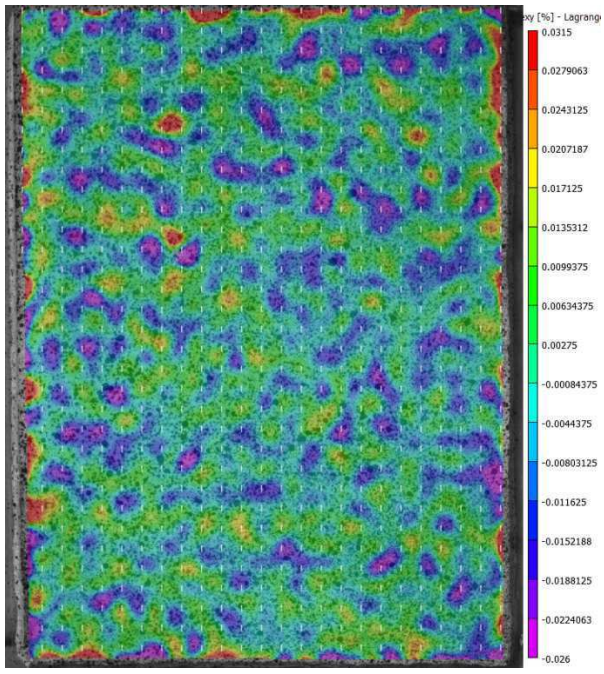
ε_{yy} (%) sans vitre



ε_{yy} (%) avec vitre



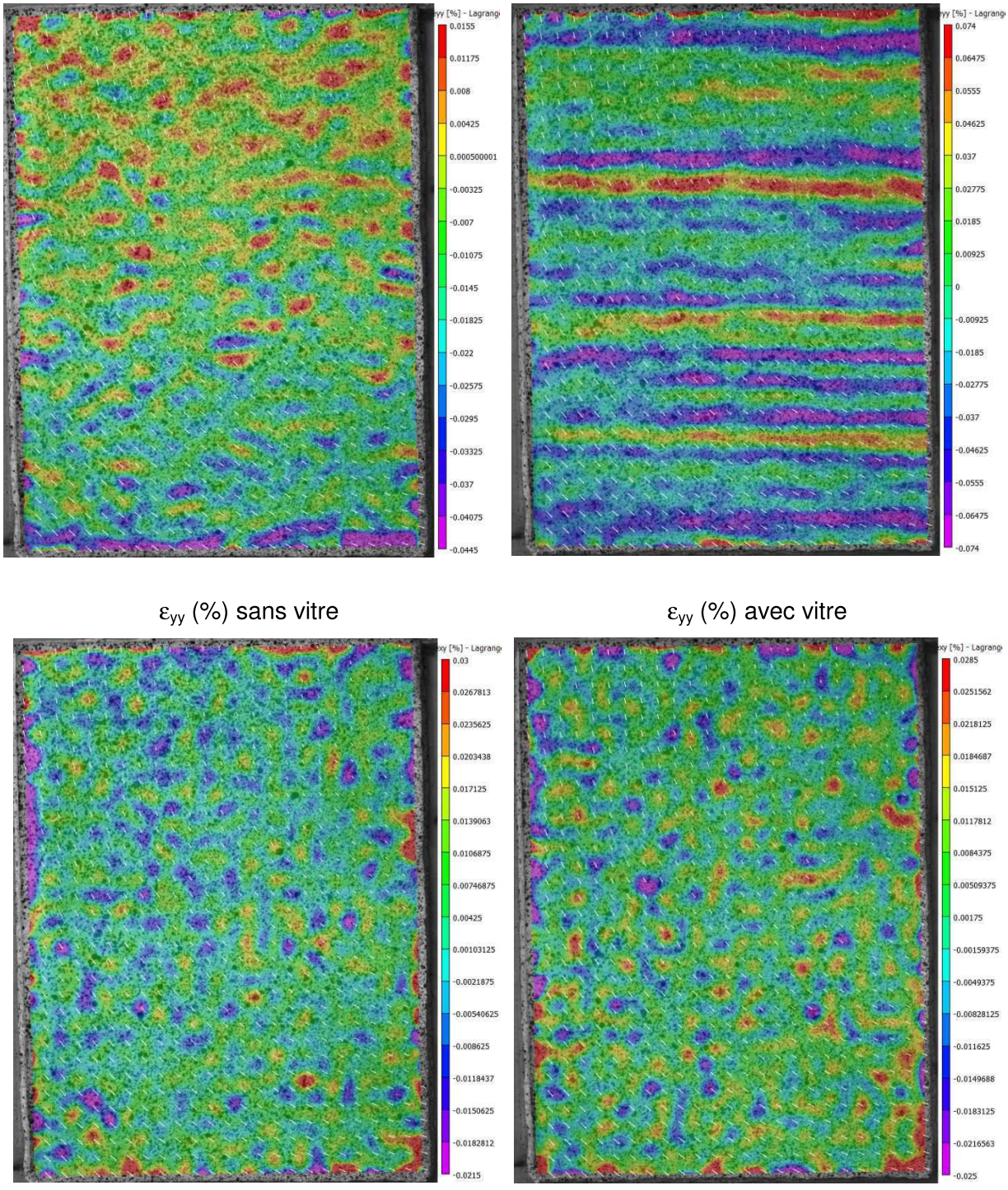
ε_{xy} (%) sans vitre



ε_{xy} (%) avec vitre

Figure 1.4 : Cartographies Vic2D des déformations locales obtenues dans la configuration B.

3- Configuration C :



ε_{yy} (%) sans vitre

ε_{yy} (%) avec vitre

ε_{xy} (%) sans vitre

ε_{xy} (%) avec vitre

Figure 1.5 : Cartographies Vic2D des déformations locales obtenues dans la configuration C.

Annexe 1.3. Evolution de la teneur en eau des poutrelles sous succion

Les variations de teneur en eau des poutrelles d'argile, préparées pour les essais de traction indirecte par flexion, sont présentées sur la figure 1.6 pour les deux succions 110 et 38 MPa.

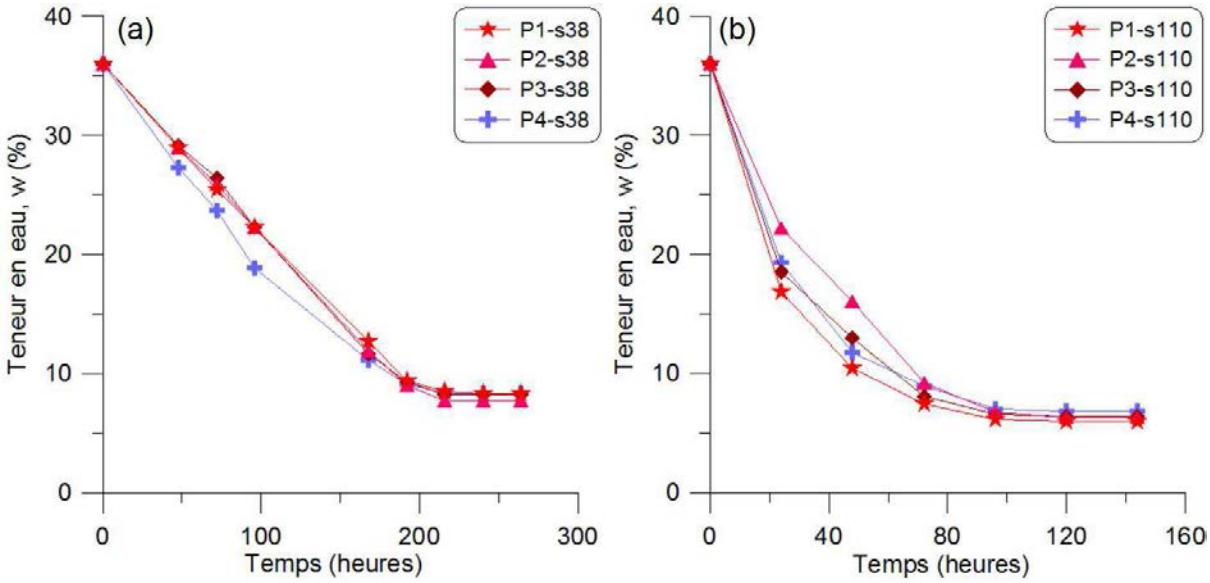


Figure 1.6 : Evolution de la teneur en eau des poutrelles en fonction du temps d'exposition à la succion imposée : (a) 38 MPa et (b) 110 MPa.

Annexe 2

Annexe 2.

Annexe 2.1. Vitesse d'écrasement sur chemin à p'=constante

Les vitesses d'écrasement moyennes V_{max} équivalentes en (mm/min) calculées sont reportées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Caractéristiques des essais p'=constante normalement consolidés.

Chemins normalement consolidés			Chemins surconsolidés		
Nom de l'essai	**p'_{ic} (kPa)**	**$V_{max} \times 10^{-4}$ (mm/min)**	**Nom de l'essai**	**p'_1 (kPa)**	**$V_{max} \times 10^{-4}$ (mm/min)**
NC-p200	200	6	OC-p250	250	3.5
NC-p250	250	9	OC-p290	290	11
NC-p290$_a$	290	12	OC- p300	300	3.5
NC-p290$_b$	290	12	OC-p300$_{P2}$	300	7.2
NC-p300	300	7.5	-	-	-
NC-p300$_{P2}$	300	7	-	-	-

Annexe 2.2. Détermination du module élastique dynamique

Pour effectuer ce calcul, nous avons évalué la déformation volumique ($\Delta\varepsilon_v = \Delta\varepsilon_1 + 2\Delta\varepsilon_3$) induite par le déchargement de l'éprouvette après sont extraction de la cellule triaxiale. D'autre part, nous avons estimé la déformation axiale correspondante à ce déchargement ($\Delta\varepsilon_1$). Ceci nous a permis de calculer le coefficient de Poisson :

$$\nu = \frac{\Delta\varepsilon_3}{\Delta\varepsilon_1} \qquad [2.1]$$

Les valeurs du coefficient de Poisson obtenues sur l'ensemble des chemins triaxiaux varient entre 0.243 et 0.410.

La figure 2.1 présente les variations du module élastique dynamique sur chemins à σ'_3=constante. Les résultats montrent une même tendance avec les variations de la vitesse d'onde. Les valeurs obtenues dans le comportement normalement consolidé sont supérieures (2700 - 4200 MPa) comparées à celles calculées dans le comportement surconsolidé (1800 - 2500 MPa).

Cependant, dans le cas de l'essai NC-sig290$_{V\&H}$ (ν = 0.383) les valeurs du module élastique dynamique sont réduites par rapport aux essais normalement consolidés malgré un niveau de vitesse d'onde plus important. Ceci permet de constater que le module élastique dynamique calculé est sensiblement dépendant de l'estimation du coefficient de Poisson.

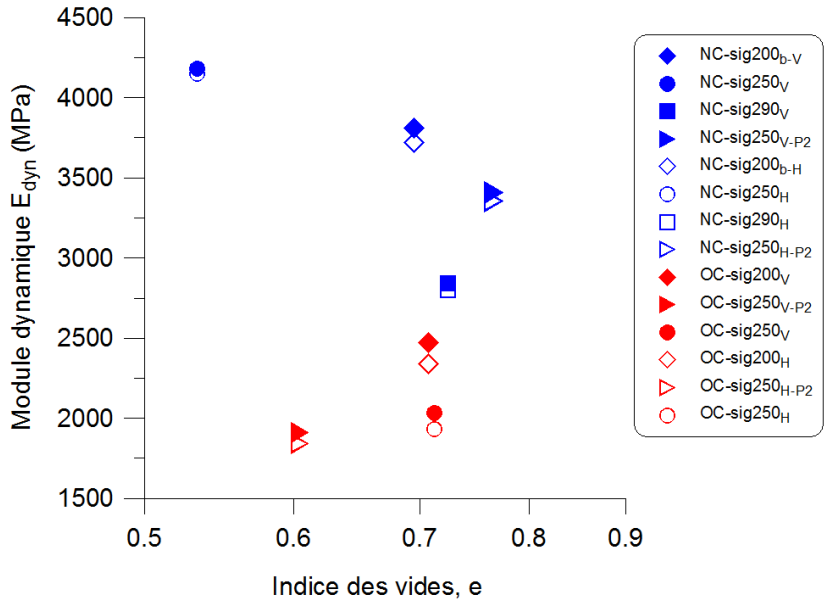


Figure 2.1 : Module élastique dynamique sur chemins triaxiaux à σ'_3=constante en fonction de l'indice des vides final.

Les variations du module élastique dynamique sur chemins purement déviatoriques sont reportées sur la figure 2.2. Les valeurs sont comprises entre 2400 et 4000 MPa et les plus élevées sont enregistrées dans le comportement surconsolidé. Nous obtenons une tendance aléatoire par rapport à l'évolution de la vitesse d'onde.

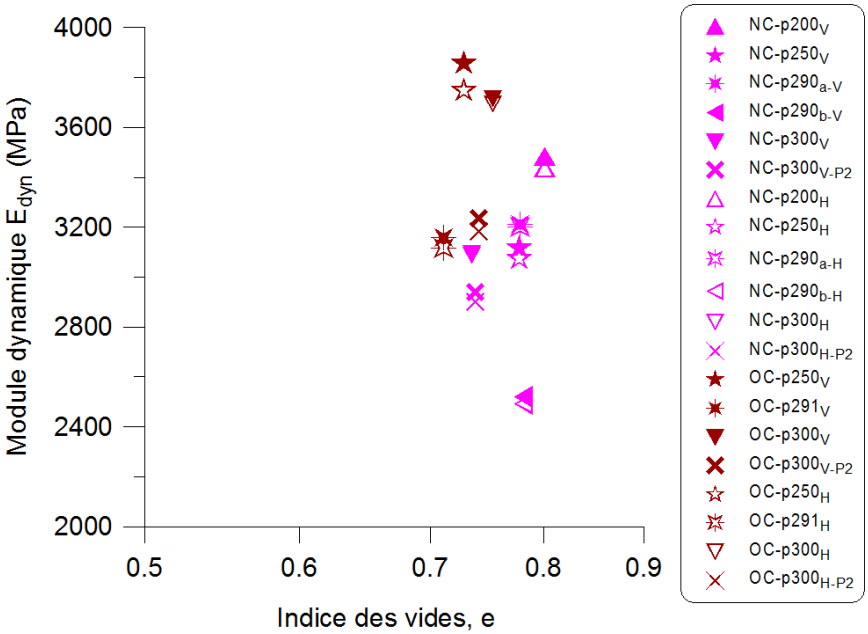


Figure 2.2 : Module élastique dynamique sur chemins triaxiaux à p'=constante en fonction de l'indice des vides final.

Ces résultats montrent que l'évolution du module élastique dynamique est très sensible aux fluctuations du coefficient de Poisson estimé à partir des essais triaxiaux.

→ ***Comparaison entre les modules statique et dynamique***

Pour réaliser cette comparaison, nous avons estimé le module statique E_{stat} à partir des essais triaxiaux après le déchargement final. Dans cette estimation, nous avons considéré le module statique mobilisé dans le domaine des petites déformations afin de la comparer avec le module dynamique élastique déduit de la mesure de vitesse d'onde.

La figure 2.3 présente les variations du module statique non drainé E_{stat-u}, déduit à partir du module statique drainé, en fonction du module élastique dynamique E_{dyn} sur différents chemins triaxiaux.

La dispersion des points obtenus ne permet pas d'identifier une relation directe entre les deux modules. Cependant, nous avons identifié une relation linéaire entre les modules statique et dynamique au niveau de contrainte fixé au point P2.

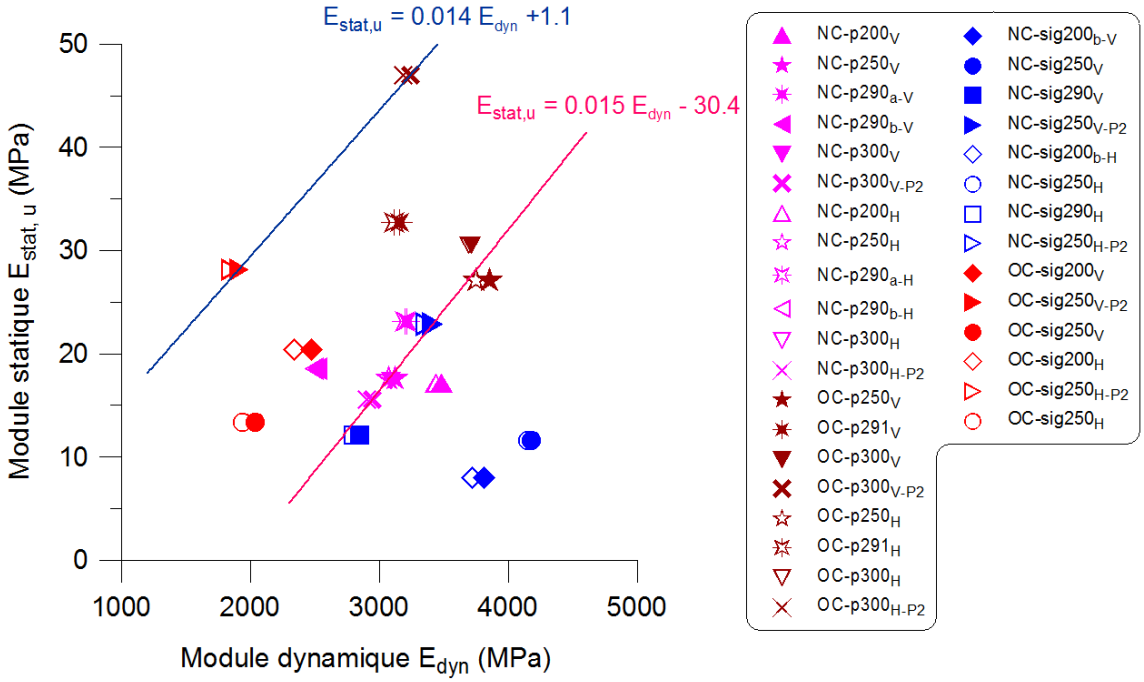


Figure 2.3 : Comparaison entre le module statique et le module dynamique sur chemins triaxiaux.

Les droites concernant les deux essais normalement consolidés NC-sig250$_{P2}$ et NC-p300$_{P2}$ et les deux essais surconsolidés OC-sig250$_{P2}$ et OC-p300$_{P2}$ sont données respectivement par les équations (Eq. 2.2) et (Eq. 2.3) en MPa :

$$E_{stat\text{-}u} = 0.015\,E_{dyn} - 30.4 \qquad [2.2]$$

$$E_{stat\text{-}u} = 0.014\,E_{dyn} + 1.1 \qquad [2.3]$$

Les deux relations possèdent la même pente, ce qui renforce l'indépendance des propriétés élastiques identifiées sur un même niveau de contrainte atteint par différents chemins triaxiaux.

Annexe 3

Annexe 3.

Annexe 3.1. Vitesses de séchage sous différentes succions

Les vitesses de séchage calculées pour tous les essais de dessiccation contrôlée sont présentées sur la figure 3.1 en fonction du temps.

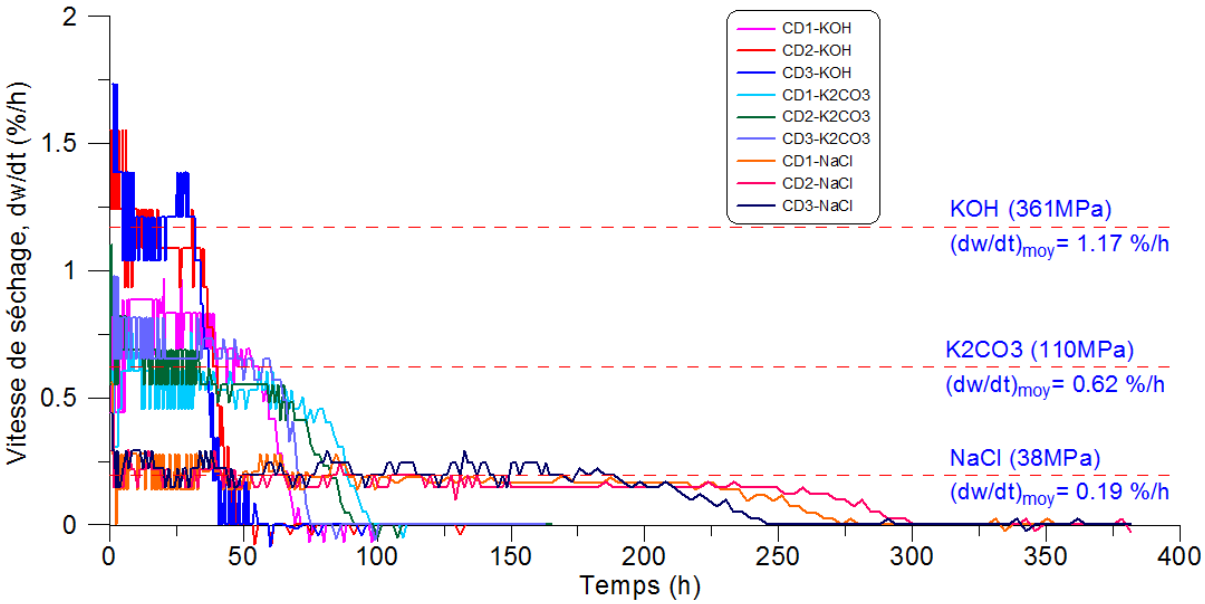


Figure 3.1 : Dessiccation contrôlée - vitesse de séchage en fonction du temps sous différents niveaux de succion imposée (moy = valeur moyenne).

Annexe 3.2. Déformations globales ε_x, ε_y et ε_z sous dessiccation contrôlée

L'évolution des déformations globales obtenus sous dessiccation contrôlée à différentes succions sont illustrées sur la figure 3.2.

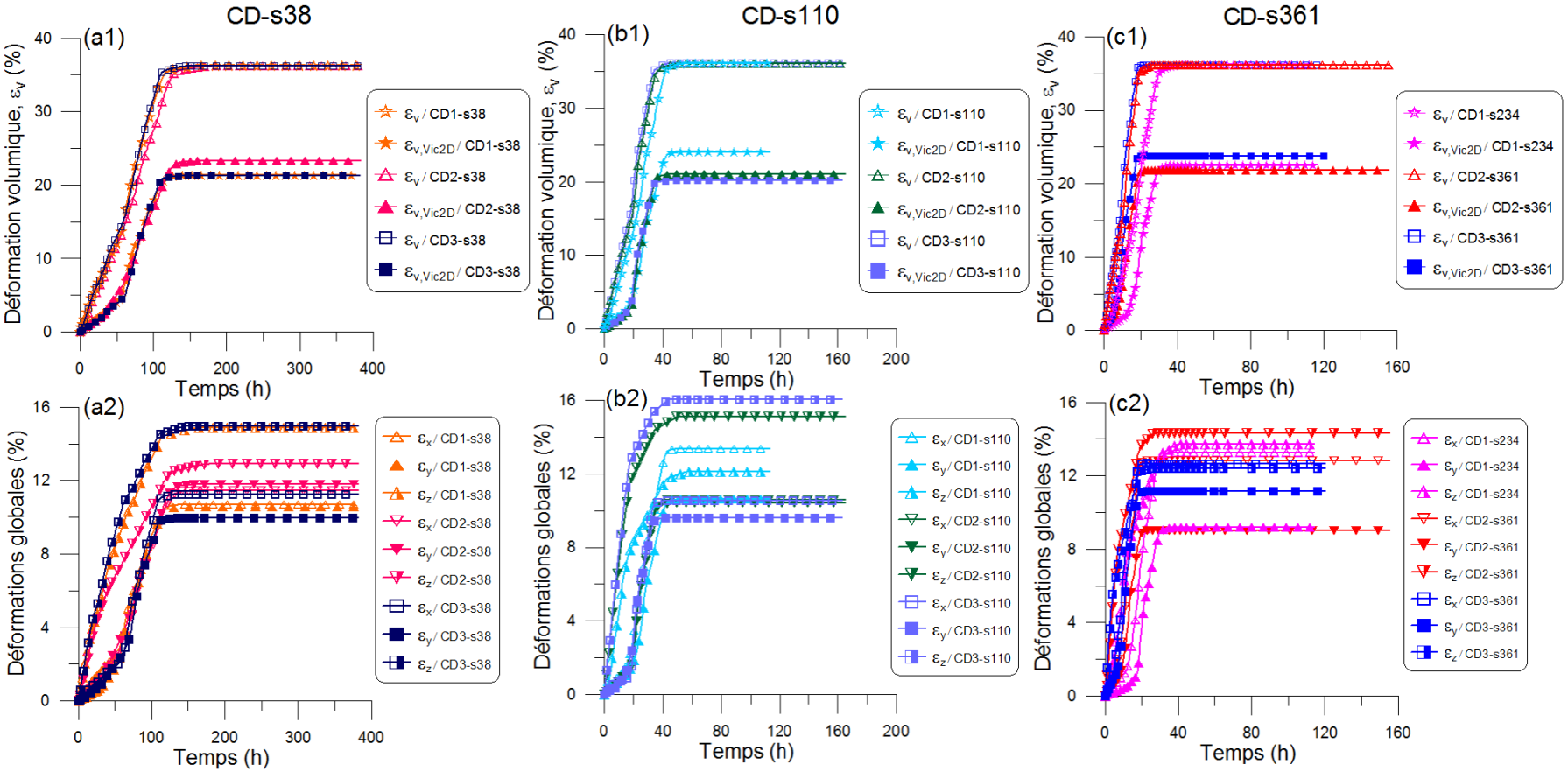
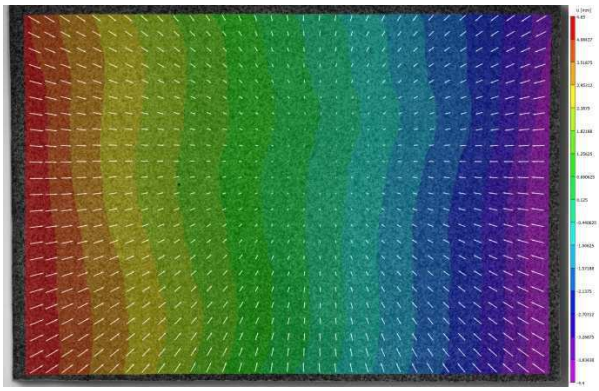
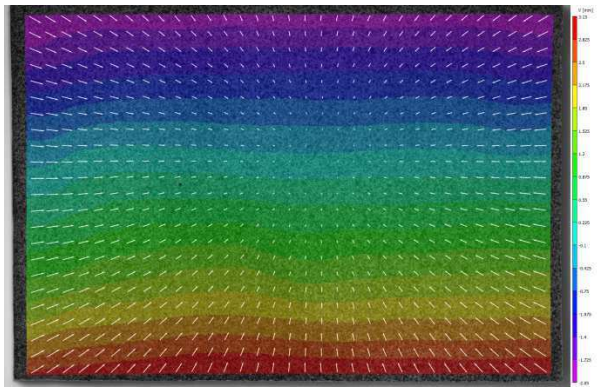


Figure 3.2 : Variations de la déformation volumique (1) et des déformations globales (2) en fonction du temps (a) CD-s38, (b) CD-s110, (c) CD-s361.

Annexe 3.3. Champ des déplacements locaux sous dessiccation contrôlée

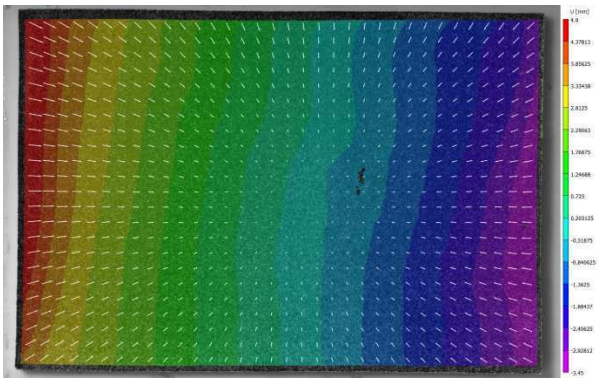


U : max= +4.65 mm / min= -4.4 mm

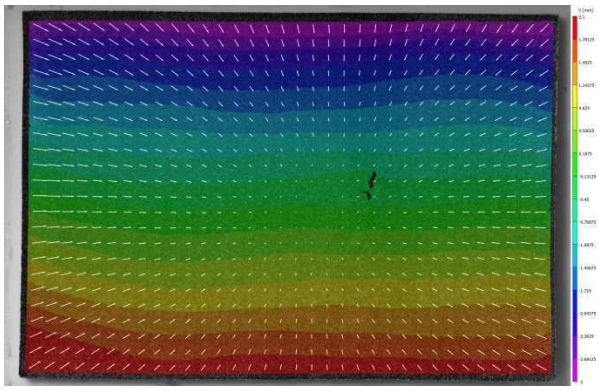


V : max= +3.15 mm / min= -2.05 mm

(a) Essai CD1-s234 à t_{SL} = 40h

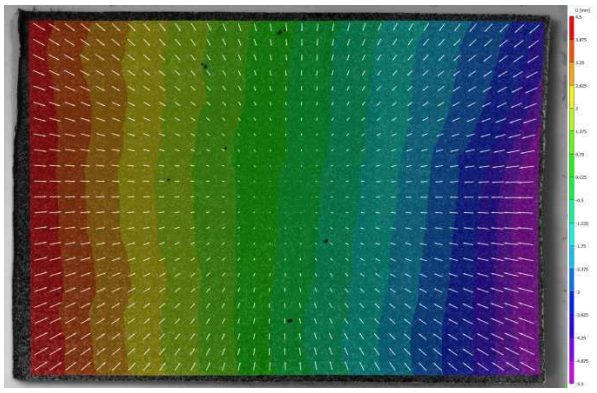


U : max= +4.9 mm / min= -3.45 mm

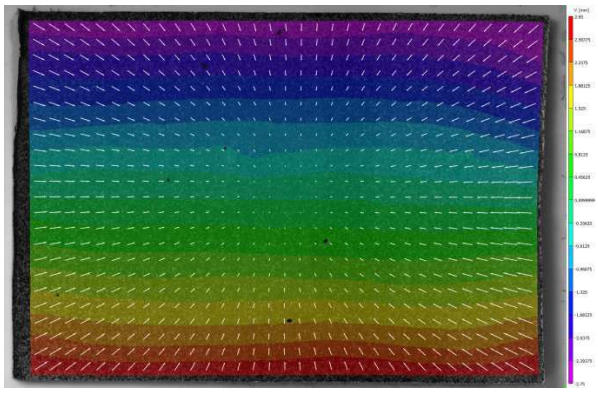


V : max= +2.1 mm / min= -3 mm

(b) Essai CD2-s361 à t_{SL} = 26h

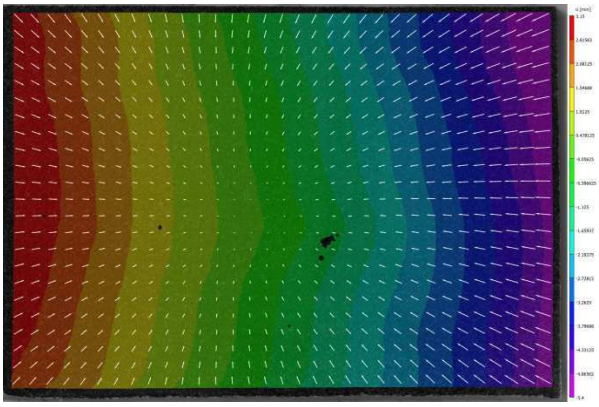


U : max= +4.5 mm / min= -5.5 mm

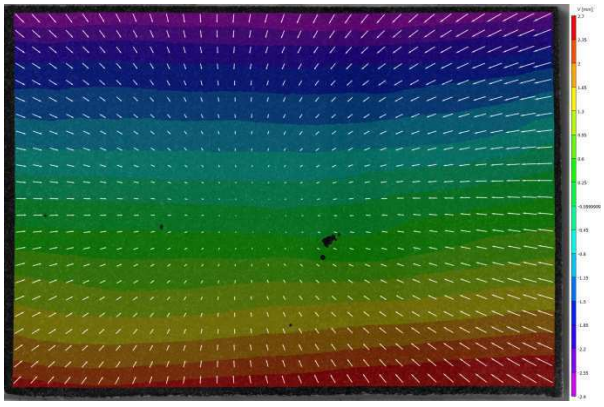


V : max= +2.95 mm / min= -2.75 mm

(c) Essai CD1-s110 à t_{SL} = 57h

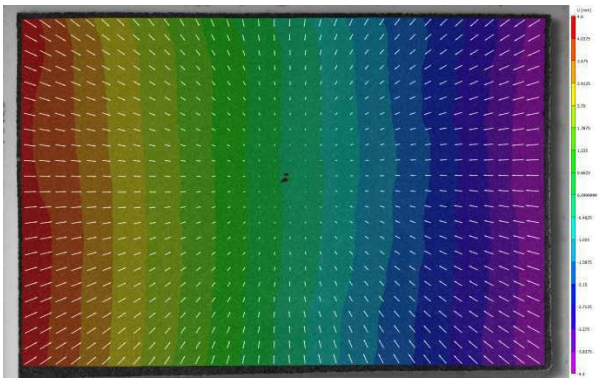


U : max= +3.15 mm / min= -5.4 mm

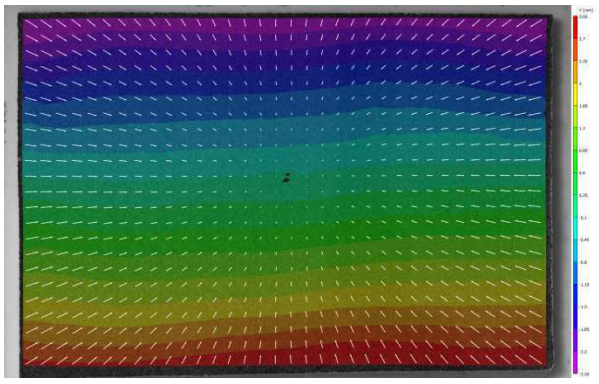


V : max= +2.7 mm / min= -2.9 mm

(d) Essai CD2-s110 à t_{SL} = 50h

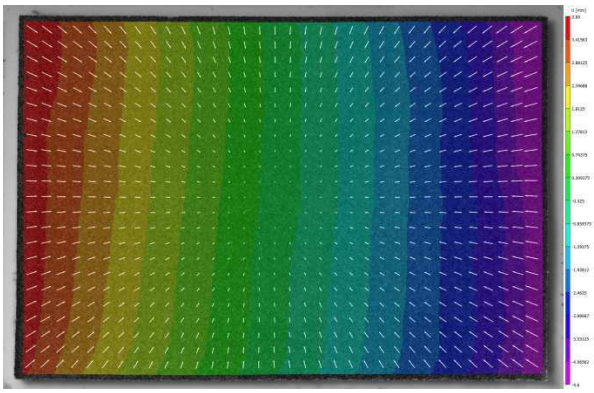


U : max= +4.6 mm / min= -4.4 mm

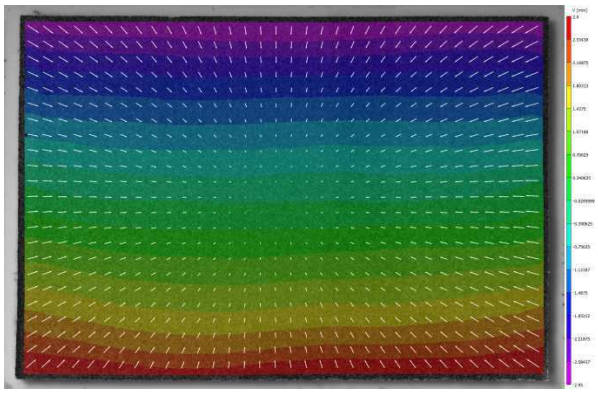


V : max= +3.05 mm / min= -2.55 mm

(e) Essai CD1-s38 à t_{SL} = 162h



U : max= +3.95 mm / min= -4.6 mm



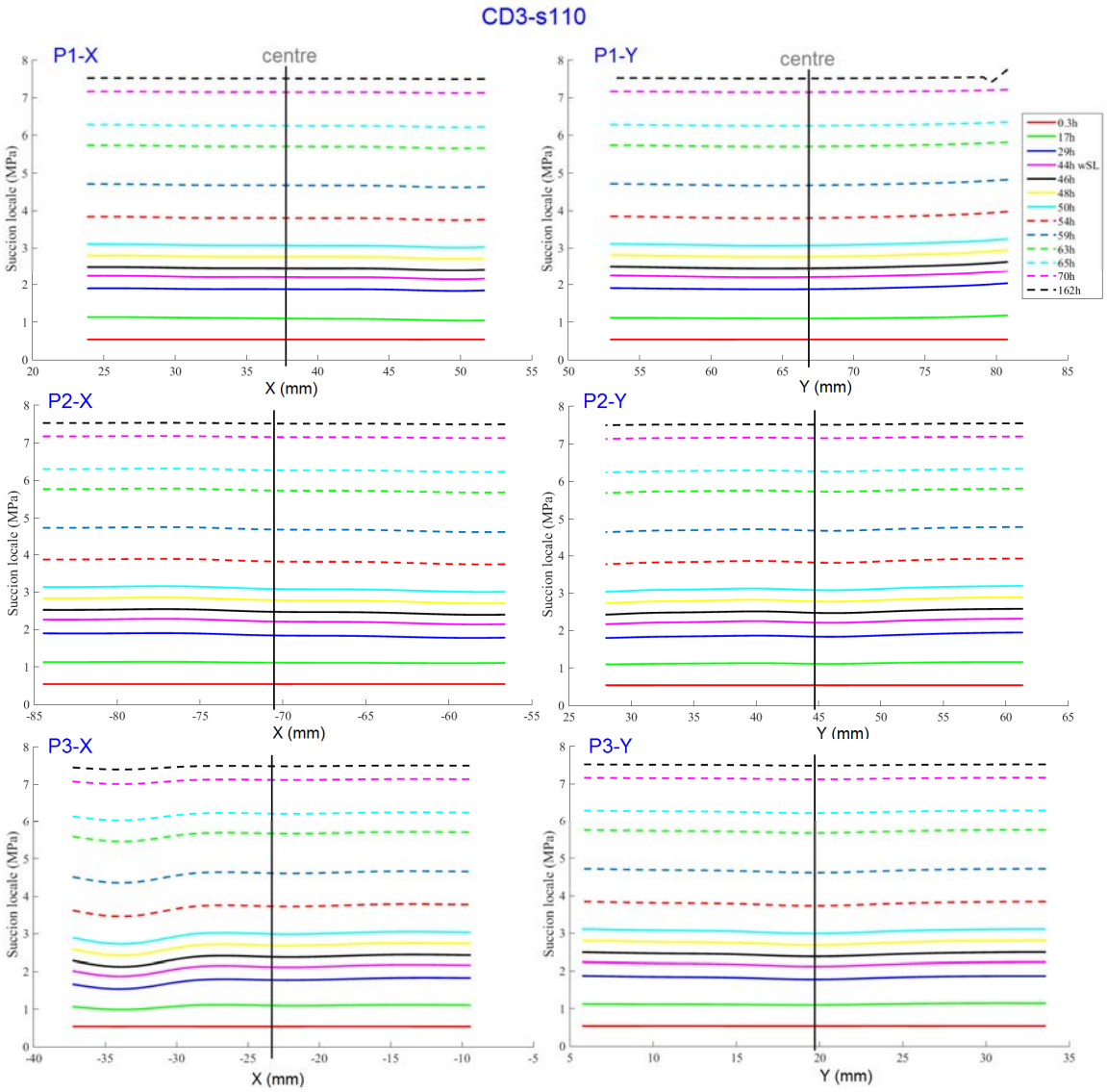
V : max= +2.9 mm / min= -2.95 mm

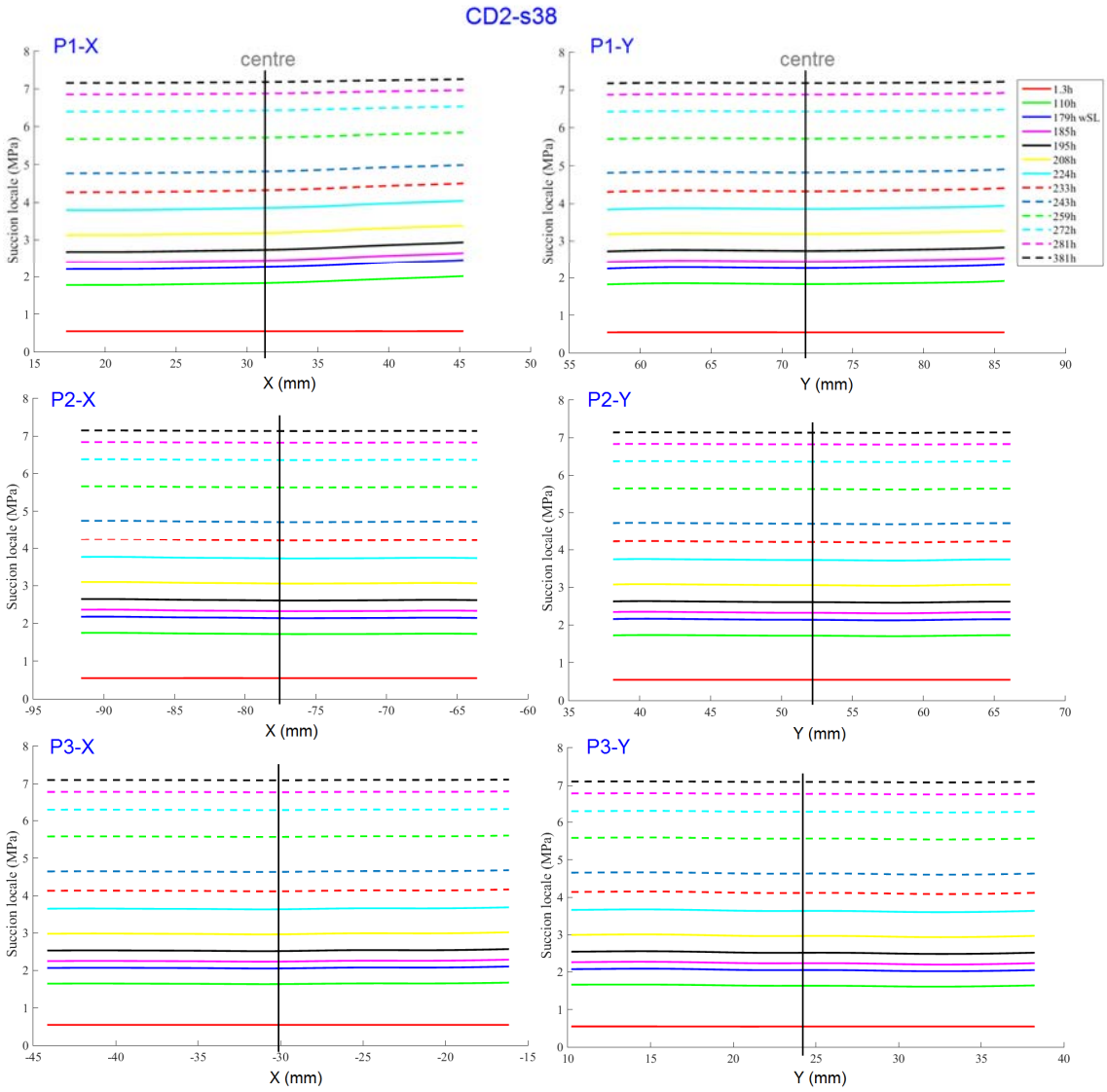
(f) Essai CD2-s38 à t_{SL} = 179h

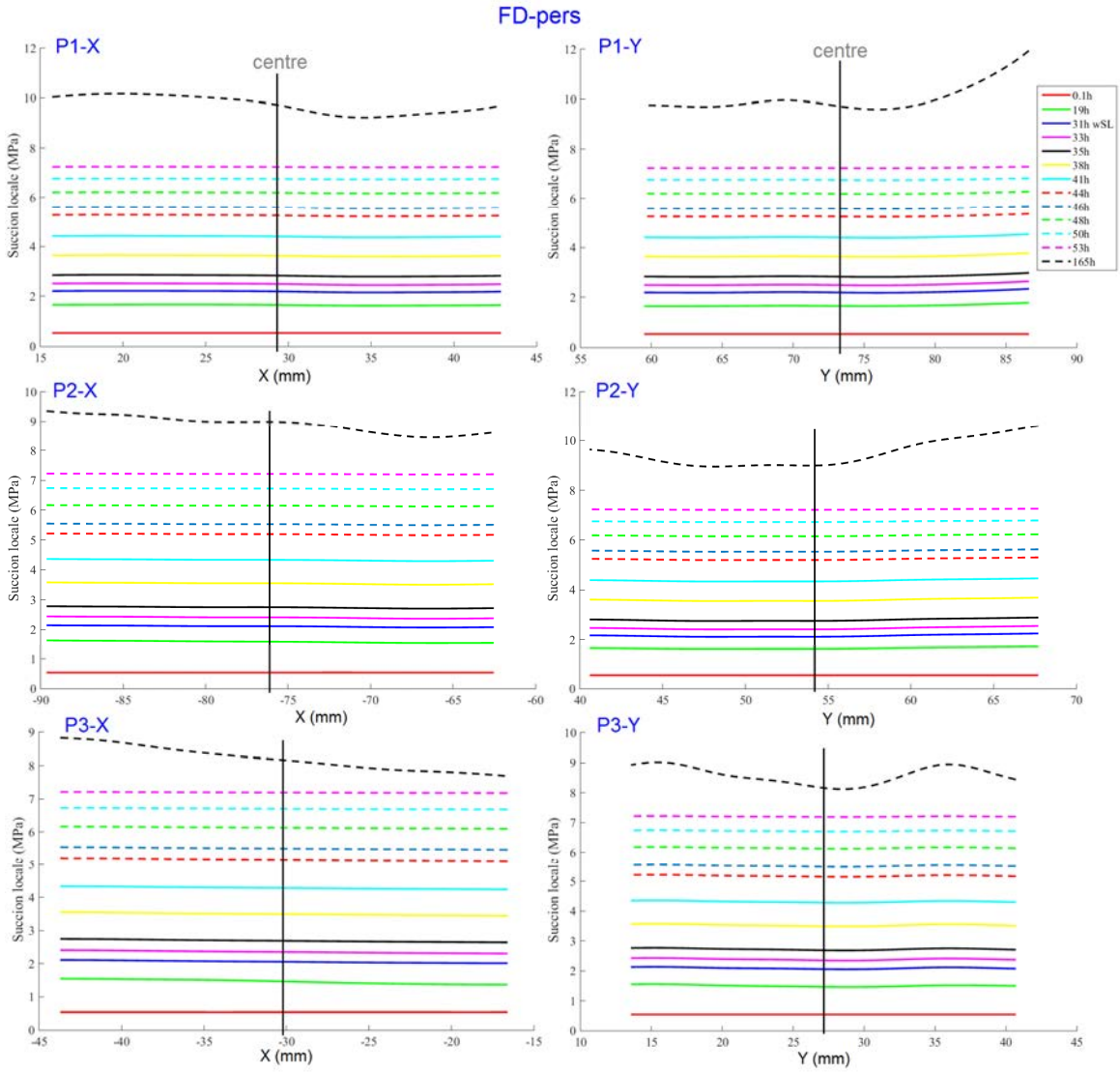
Annexe 3.4. Programme Matlab de calcul de la succion locale

```
%%Distributions
ddl=1;
%%% dimensions de la matrice W, S
a=225;
b=337;
%%%%%

%%%% Début
%%%%%% Chargement du fichier issu de la CIN %%%%%
load Essai4_KOH_24042014-0003_0.mat
Xa=x_c;
Ya=y_c;
exa=(100*exx);
eya=(100*eyy);
exya_=(100*exy);
exya=exa+eya;
e1a=(100*e1);
e2a=(100*e2);
%%%%%%%% Calcul de la deformation volumique locale %%%%%%%
eza=0.067;
i=1;
j=1;
for i=1:b
    for j=1:a

    Va(j,i)=exya(j,i)-eza;

if j<a
    j=j+1;
end
    end
    if i<b
        i=i+1;
    end
end
%%%%%%%%% Calcul de la succion locale %%%%%%%%%

Ea=1.272-(2.272*(abs(Va/100)));
Sr_a=100;
Wa=(Ea/2.65)*Sr_a;
u=1;
l=1;
Sa=zeros(a,b);
for u=1:b
    for l=1:a
if Wa(l,u)>=30
    Sa(l,u)=(exp((Wa(l,u)-47.30868131)/(-2.996080677)))/1000;
end
if Wa(l,u)>=2.08
      Sa(l,u)=(exp((Wa(l,u)-157.3185257)/(-17.38474153)))/1000;
end
if Wa(l,u)<2.08
      Sa(l,u)=(exp((Wa(l,u)-6.245241261)/(-0.4678128016)))/1000;
end

if l<a
l=l+1;
end
    end
    if u<b
        u=u+1;
    end
end
%%%%%%%%%% Affichage de la cartographie de la succion locale %%%%%%%%%%%%

figure(6)

contourf(Xa,Ya,Sa);
hold on
plot(Xa(f,min:max)',Ya(f,min:max)','w','linewidth',1.5);
plot(Xa(min_:max_,f_)',Ya(min_:max_,f_)','w','linewidth',1.5);
shading flat;
colorbar
```

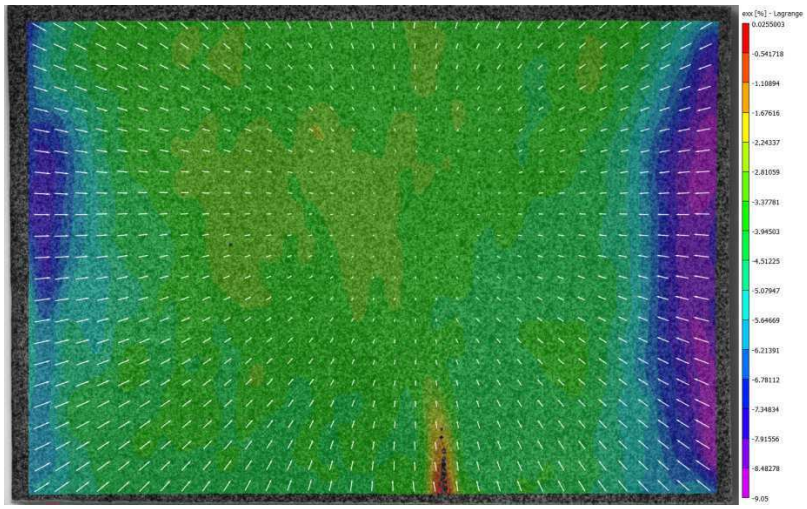
Annexe 3.5. Distributions de la succion locale



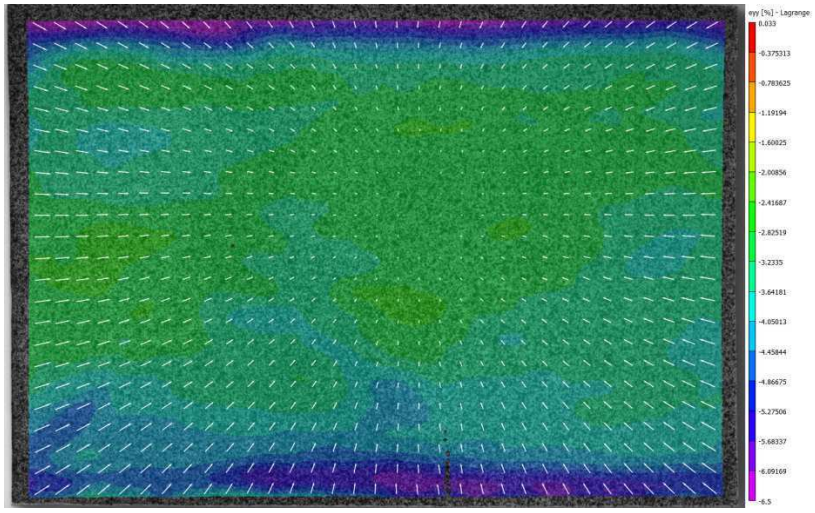

CD2-s38
P1-X
centre
Succion locale (MPa)
X (mm)
P1-Y
centre
Succion locale (MPa)
Y (mm)
1.3h
110h
179h wSL
185h
195h
208h
224h
233h
243h
259h
272h
281h
381h
P2-X
Succion locale (MPa)
X (mm)
P2-Y
Succion locale (MPa)
Y (mm)
P3-X
Succion locale (MPa)
X (mm)
P3-Y
Succion locale (MPa)
Y (mm)



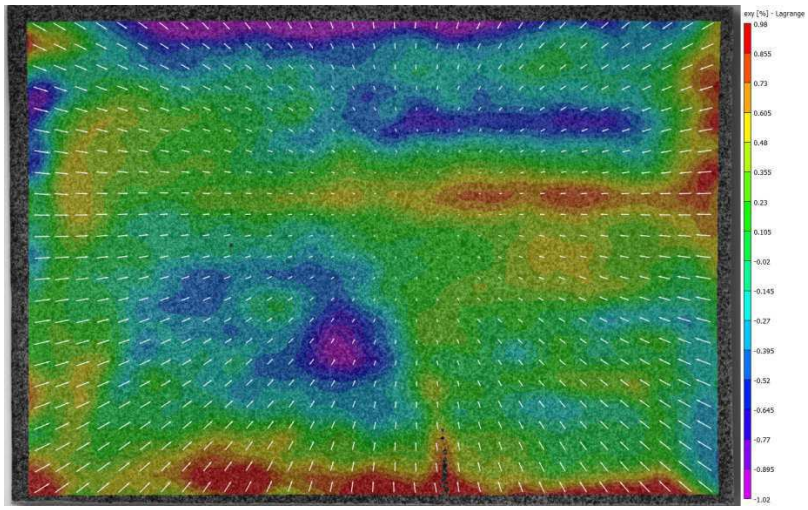
Annexe 3.6. Déformations locales sous dessiccation contrôlée



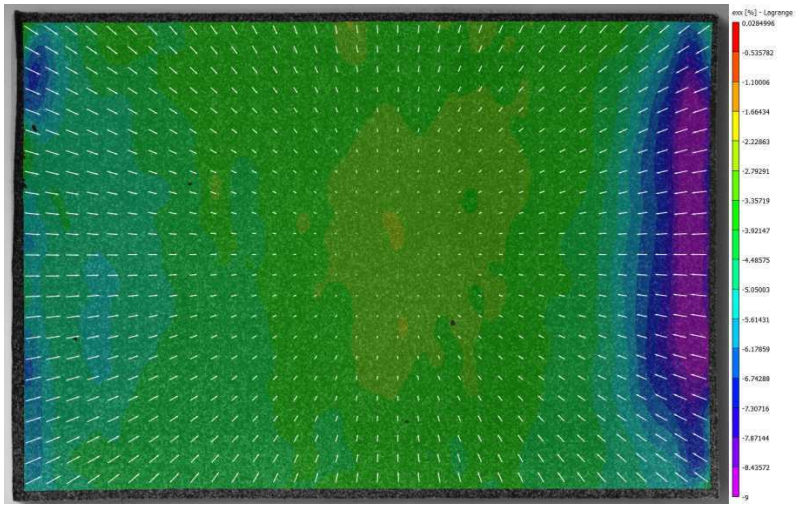
ε_{xx} (%) CD1-s234 à t=114h



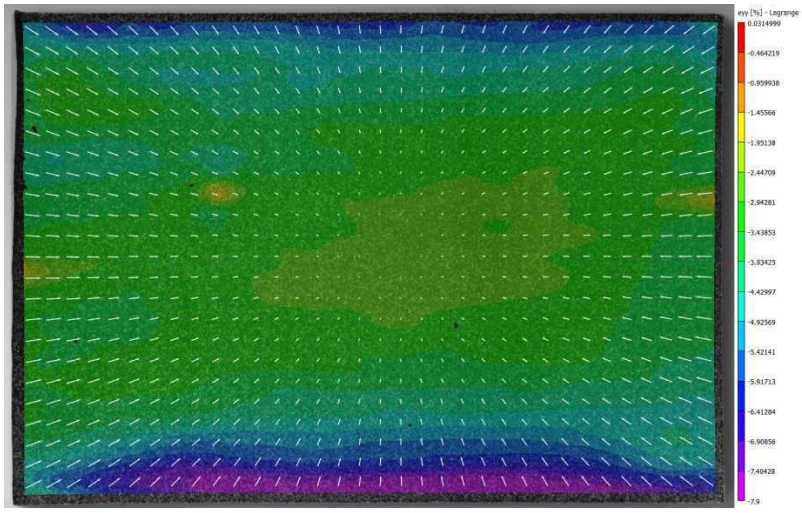
ε_{yy} (%) CD1-s234 à t=114h



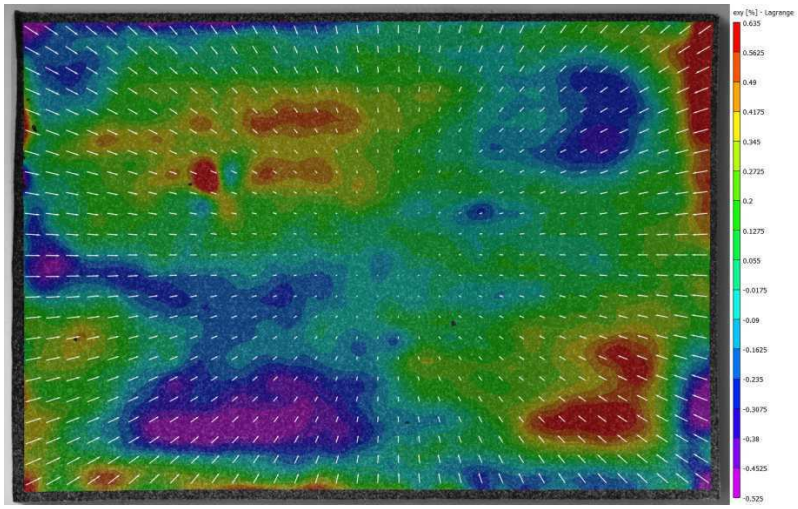
ε_{xy} (%) CD1-s234 à t=114h



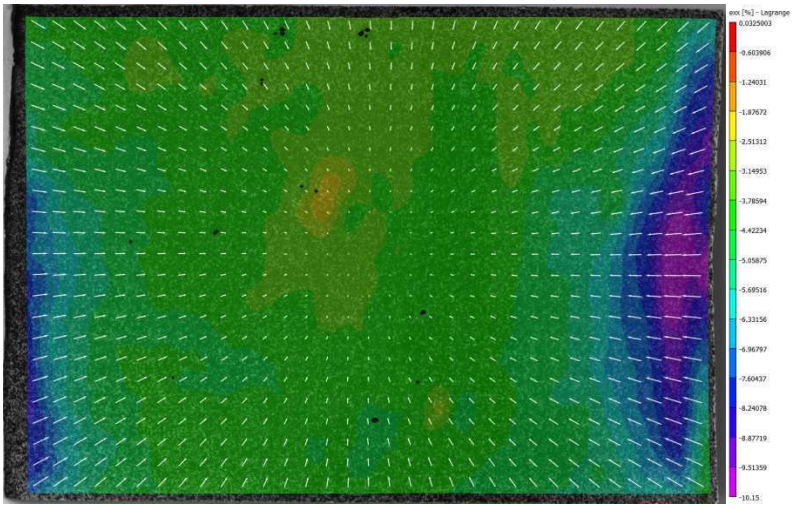
ε_{xx} (%) CD3-s361 à t=112h



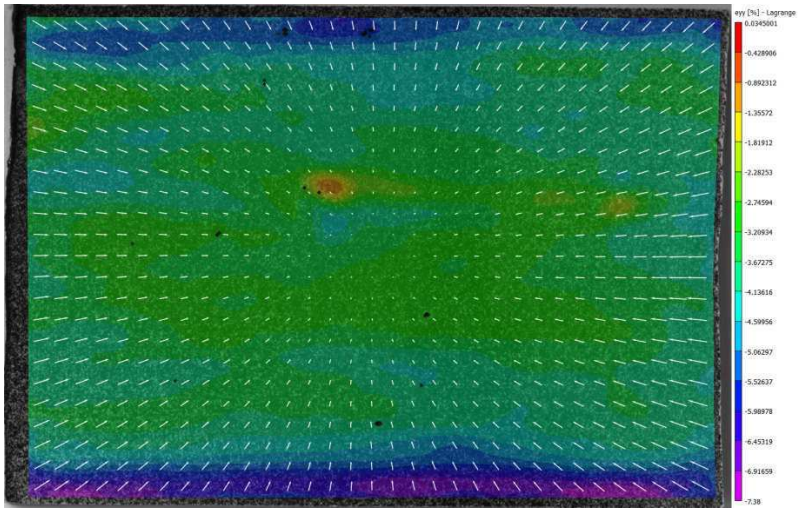
ε_{yy} (%) CD3-s361 à t=112h



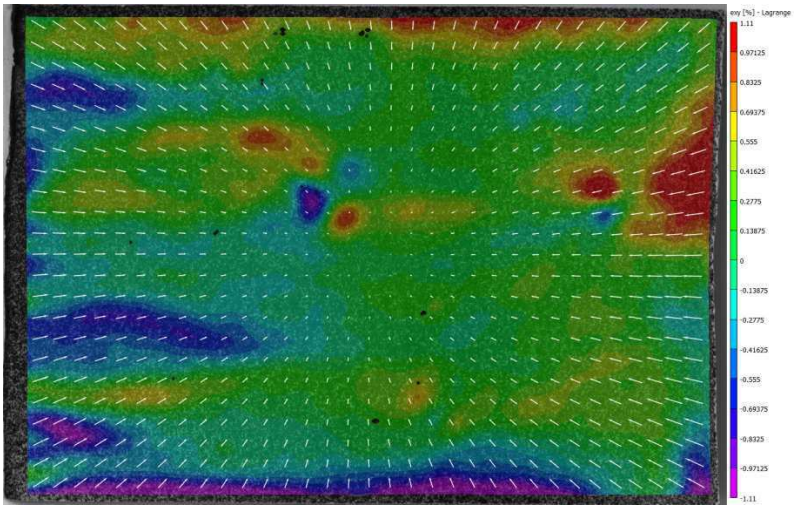
ε_{xy} (%) CD3-s361 à t=112h



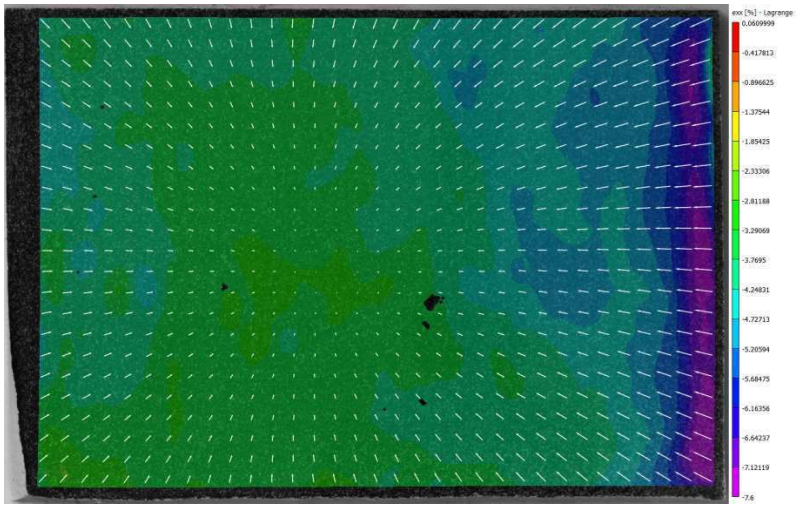
ε_{xx} (%) CD1-s110 à t=112h



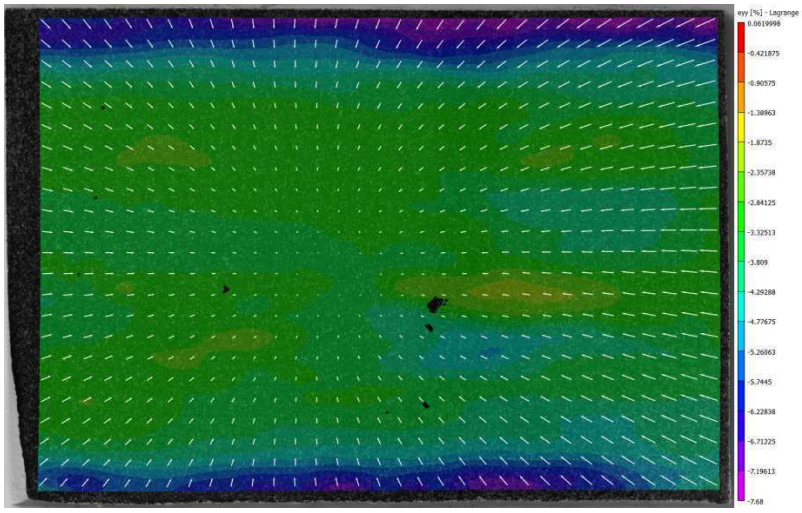
ε_{yy} (%) CD1-s110 à t=112h



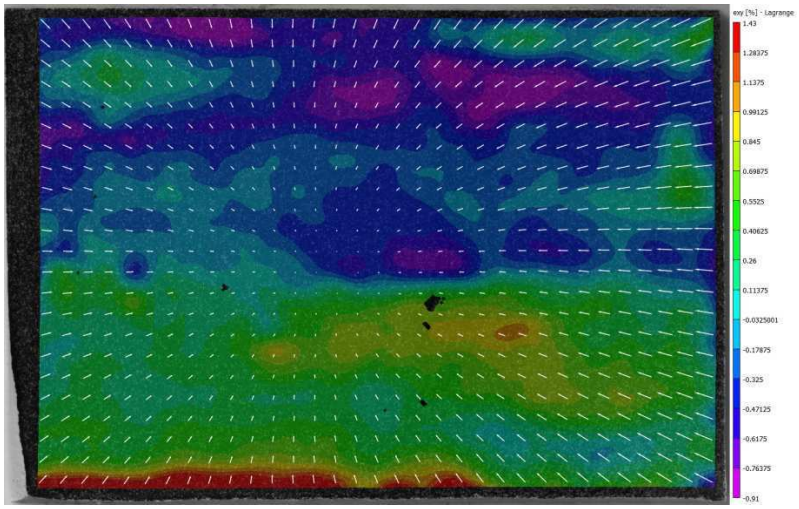
ε_{xy} (%) CD1-s110 à t=112h



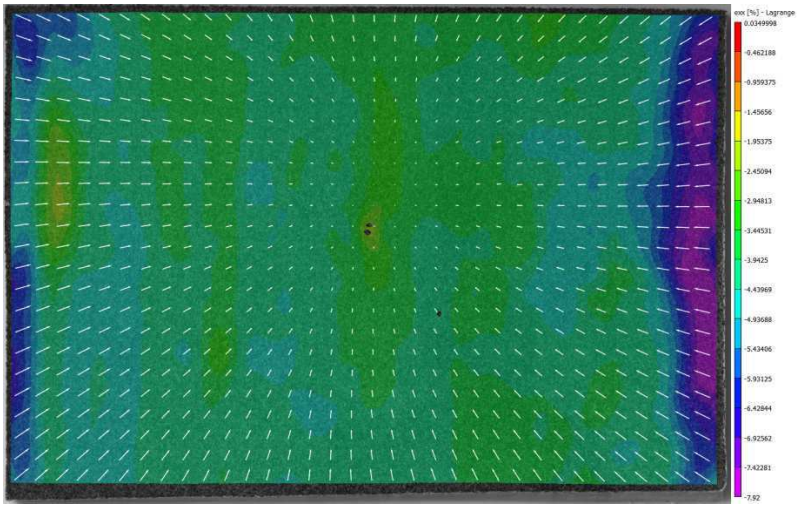
ε_{xx} (%) CD2-s110 à t=165h



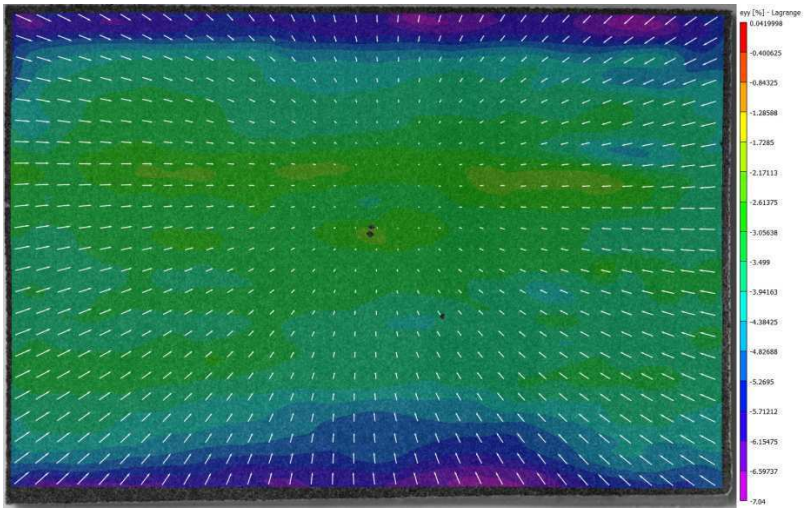
ε_{yy} (%) CD2-s110 à t=165h



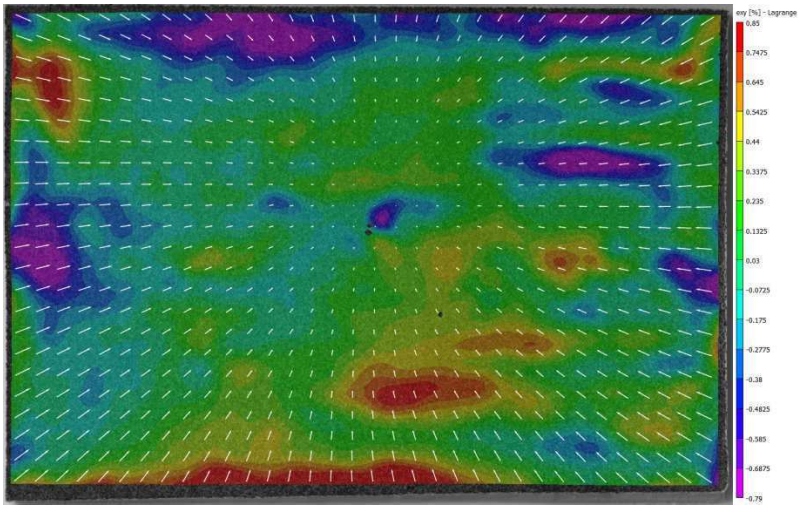
ε_{xy} (%) CD2-s110 à t=165h



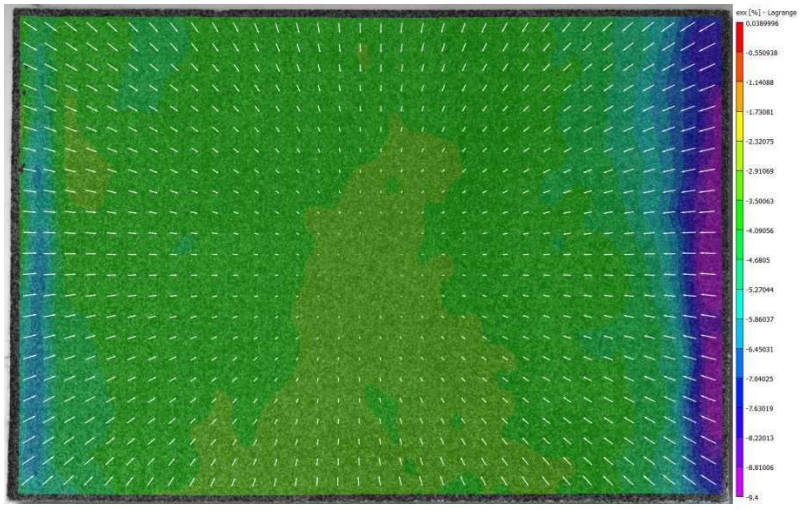
ε_{xx} (%) CD1-s38 à t=376h



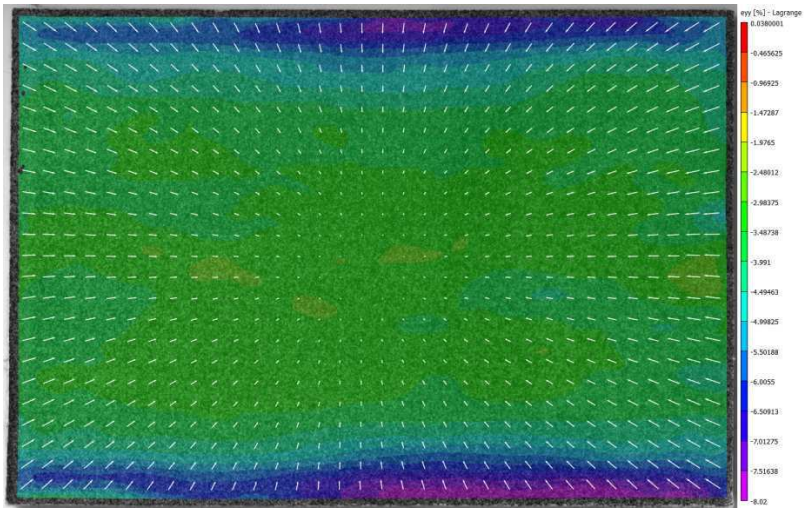
ε_{yy} (%) CD1-s38 à t=376h



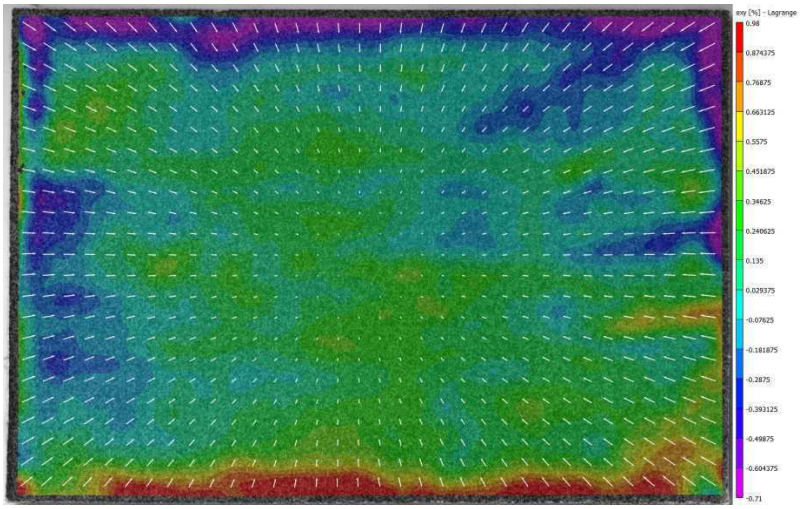
ε_{xy} (%) CD1-s38 à t=376h



ε_{xx} (%) CD2-s38 à t=381h



ε_{yy} (%) CD2-s38 à t=381h

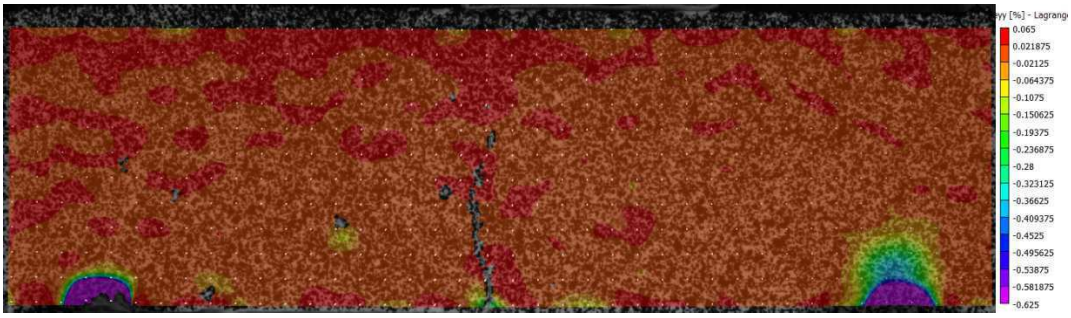


ε_{xy} (%) CD2-s38 à t=381h

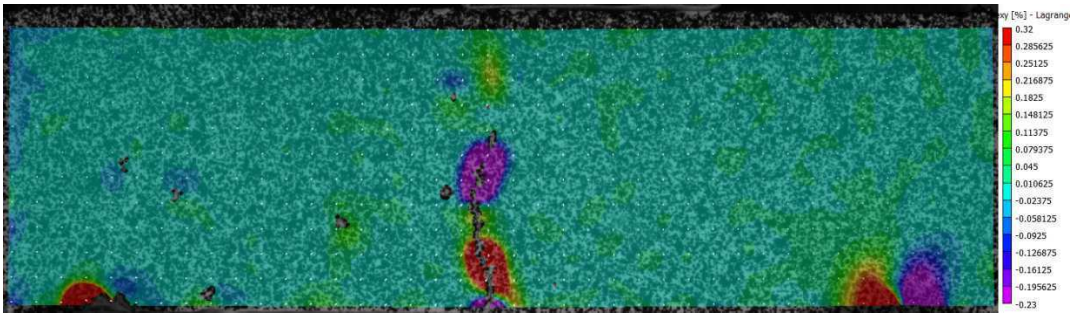
Annexe 4

Annexe 4.

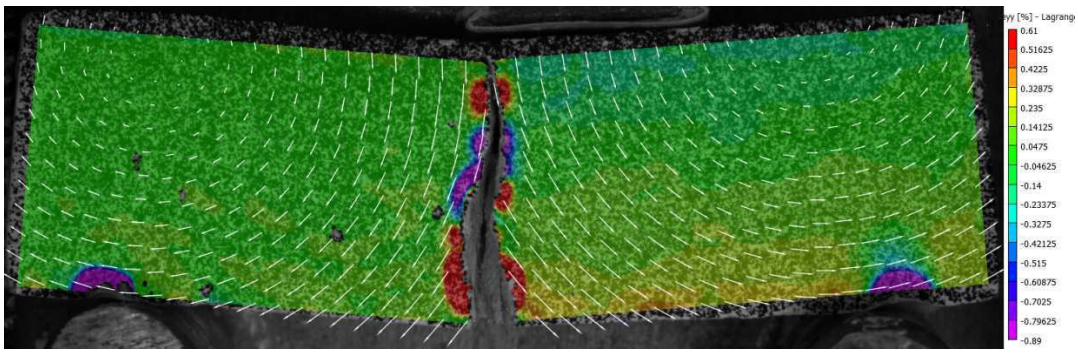
Annexe 4.1. Déformations locales obtenues sous traction indirecte par flexion



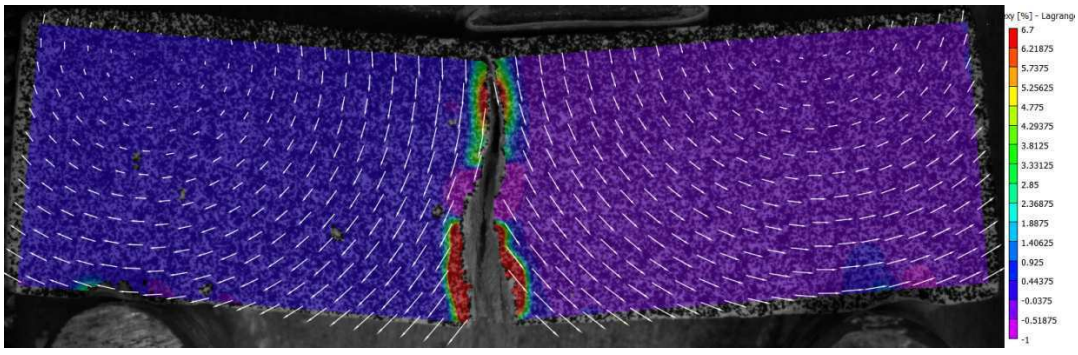
ε_{yy} - position $i+1$ (Flex1-s38$_V$)



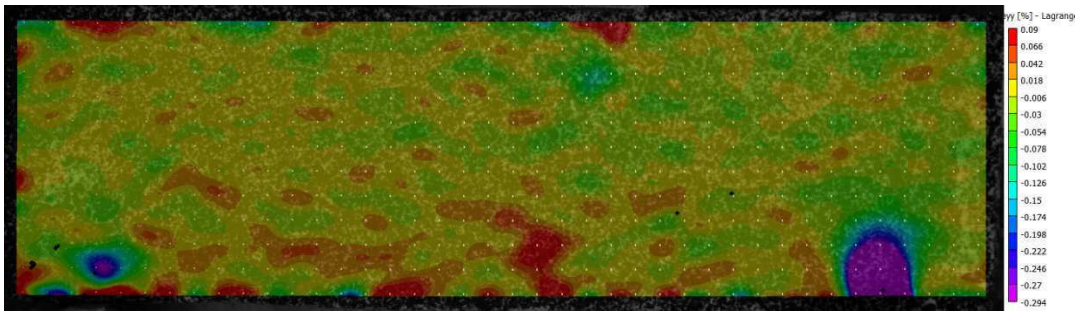
ε_{xy} - position $i+1$ (Flex1-s38$_V$)



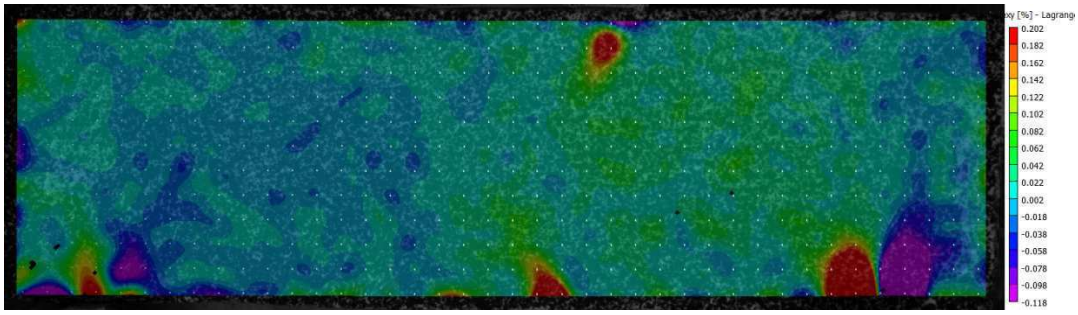
ε_{yy} - position f (Flex1-s38$_V$)



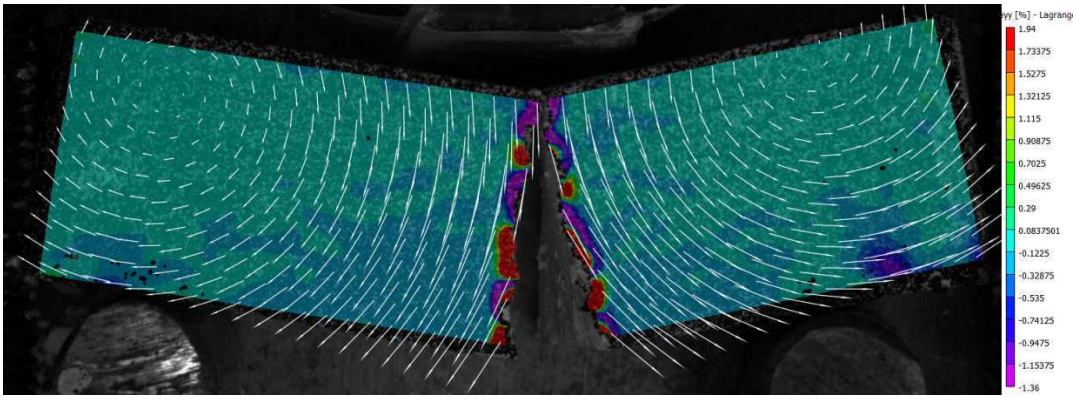
ε_{xy} - position f (Flex1-s38$_V$)



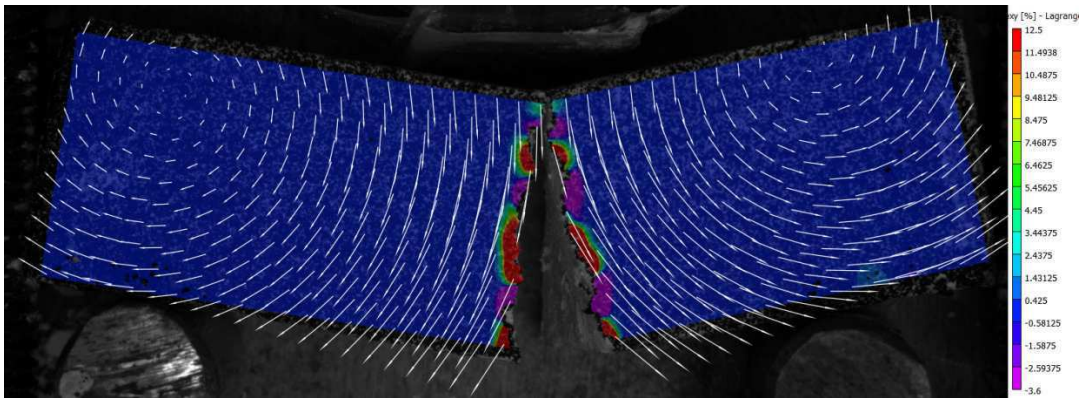
ε_{yy} - position i ($Flex3\text{-}s38_H$)



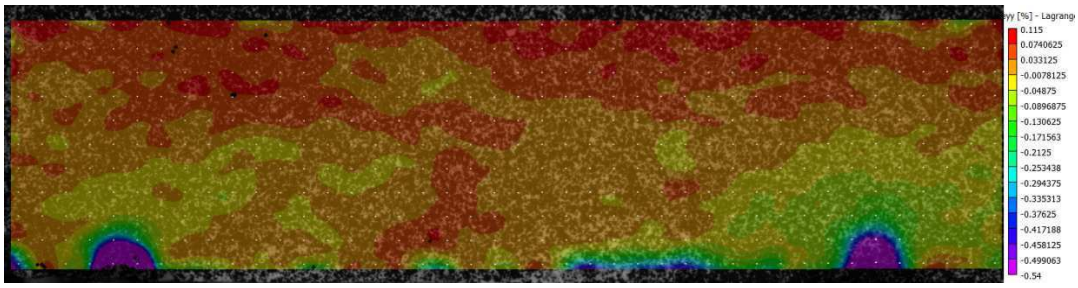
ε_{xy} - position i ($Flex3\text{-}s38_H$)



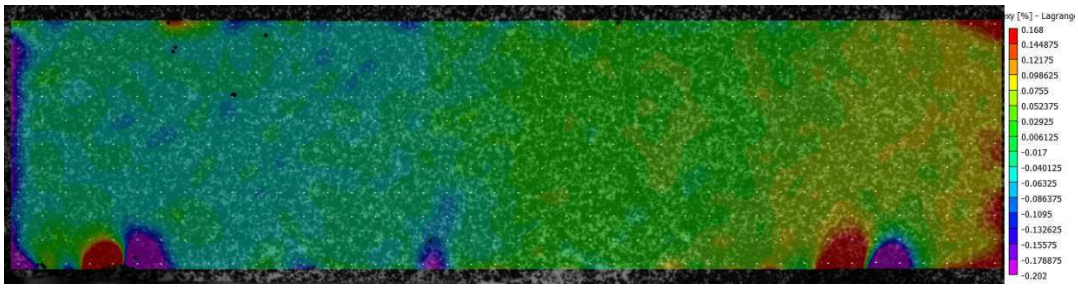
ε_{yy} - position f ($Flex3\text{-}s38_H$)



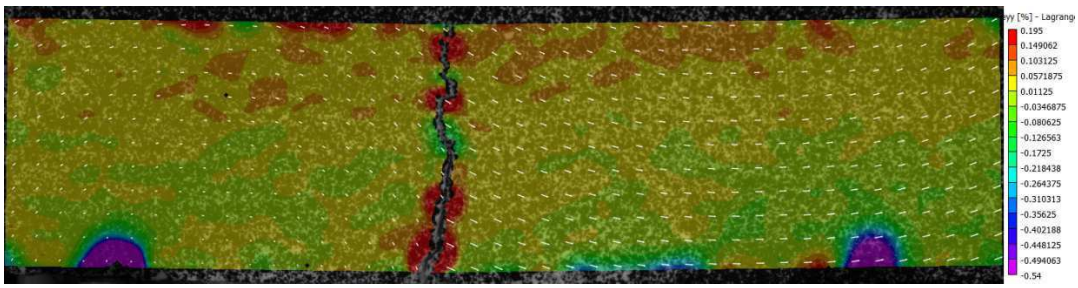
ε_{xy} - position f ($Flex3\text{-}s38_H$)



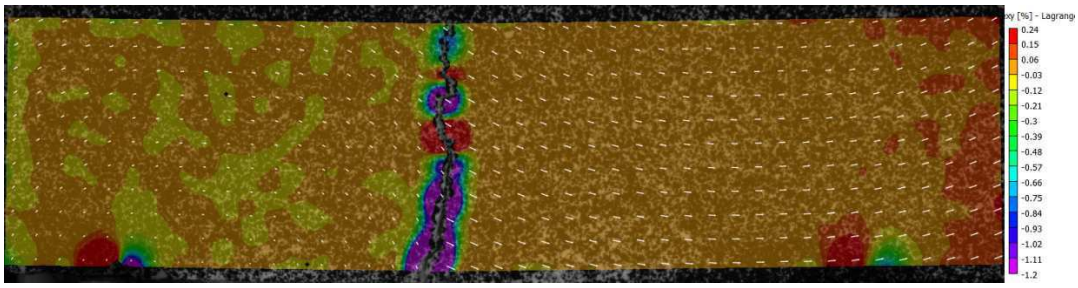
ε_{yy} - position *i* (Flex2-s110$_V$)



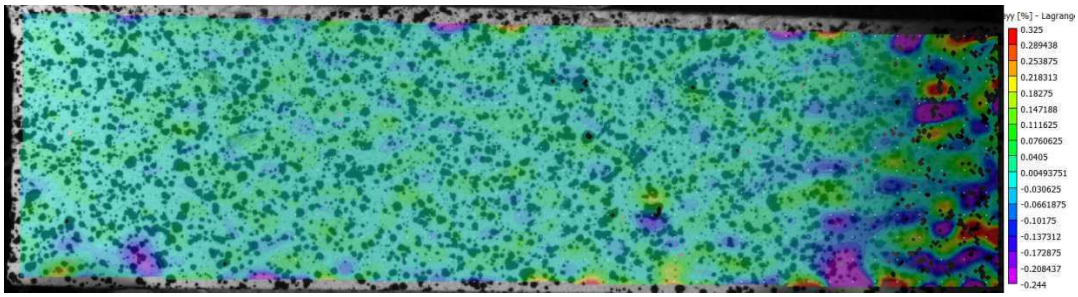
ε_{xy} - position *i* (Flex2-s110$_V$)



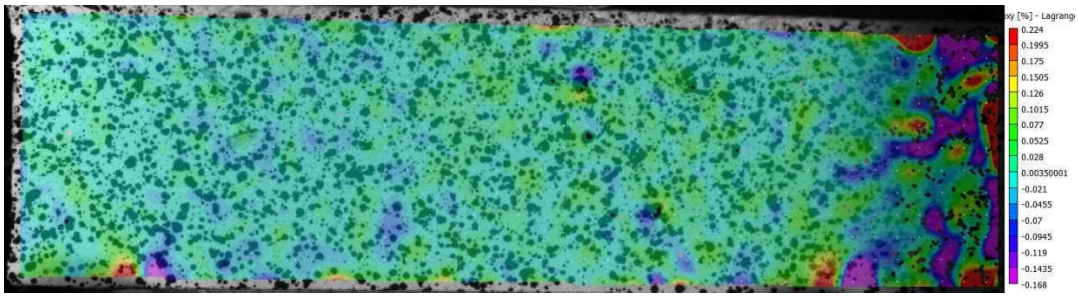
ε_{yy} - position *i+1* (Flex2-s110$_V$)



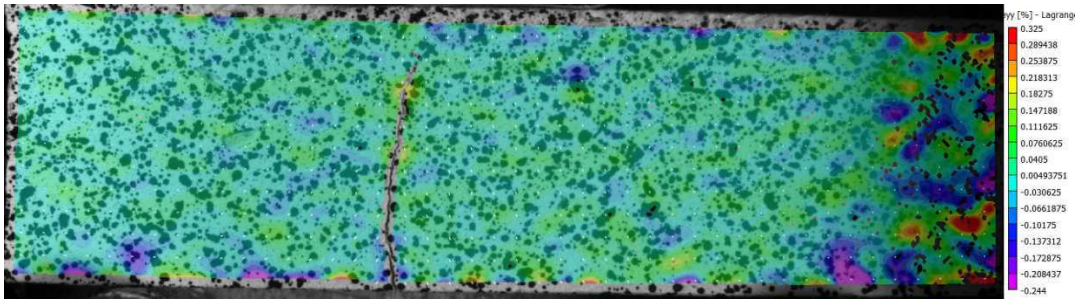
ε_{xy} - position *i+1* (Flex2-s110$_V$)



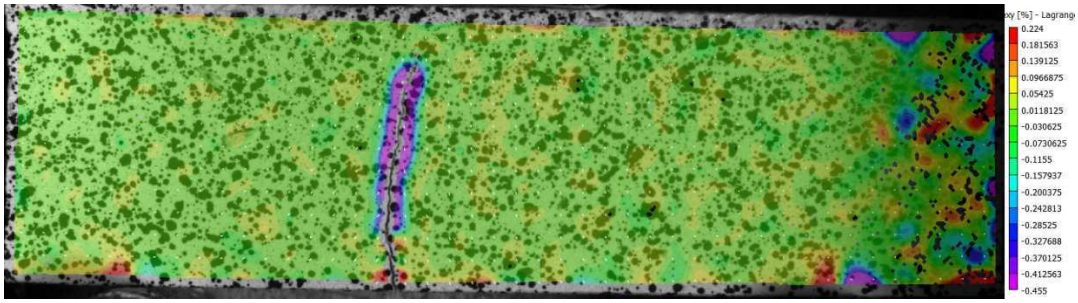
ε_{yy} - position *i* (Flex3-s110$_H$)



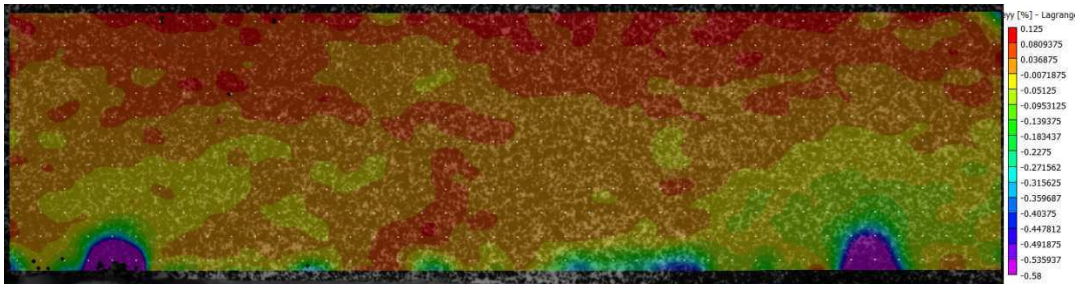
ε_{xy} - position i ($Flex3\text{-}s110_H$)



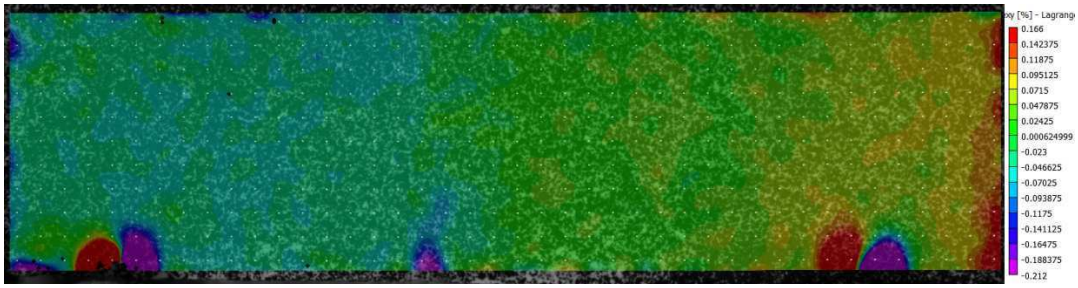
ε_{yy} - position $i+1$ ($Flex3\text{-}s110_H$)



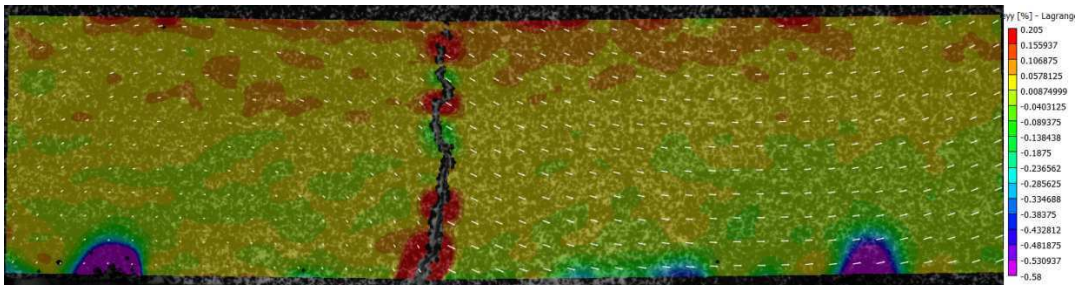
ε_{xy} - position $i+1$ ($Flex3\text{-}s110_H$)



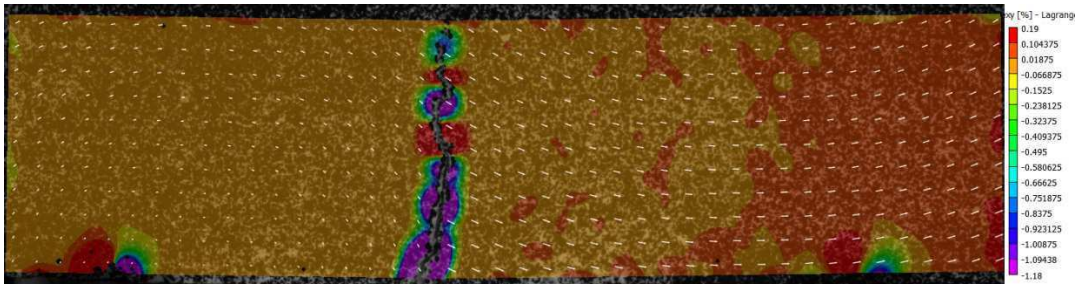
ε_{yy} - position i ($Flex1\text{-}s361_V$)



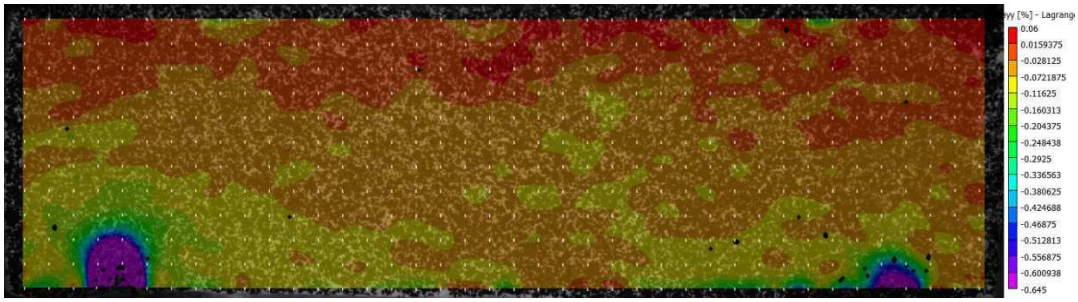
ε_{xy} - position i ($Flex1\text{-}s361_V$)



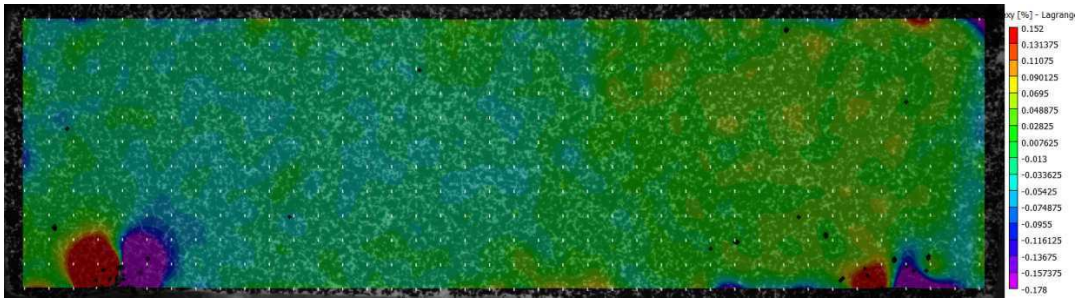
ε_{yy} - position $i+1$ (Flex1-s361$_V$)



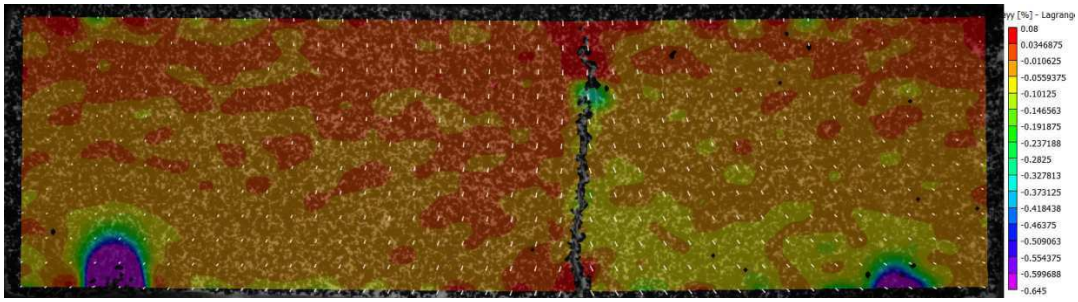
ε_{xy} - position $i+1$ (Flex1-s361$_V$)



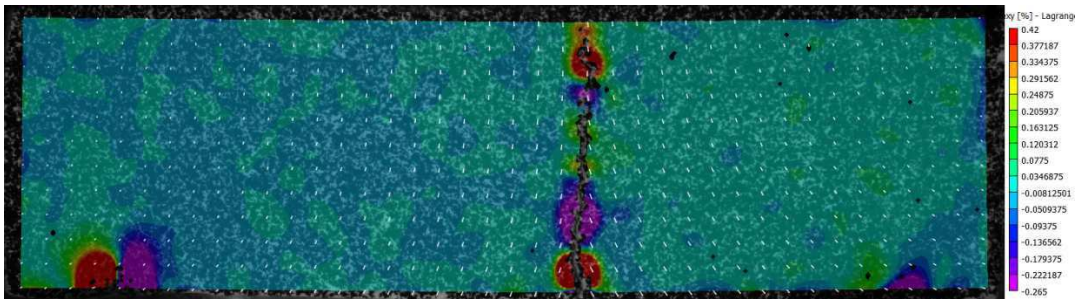
ε_{yy} - position i (Flex4-s361$_H$)



ε_{xy} - position i (Flex4-s361$_H$)



ε_{yy} - position $i+1$ (Flex4-s361$_H$)



ε_{xy} - position $i+1$ (Flex4-s361$_H$)

Publications

Article dans une revue internationale

Ighil Ameur L., Robin G., Hattab M. (2015) "*Elastic properties in a clayey material under mechanical loading - an estimation through ultrasonic propagations*", European Journal of Environmental and Civil Engineering., 20, DOI: 10.1080/19648189.2015.1090926.

Communications orales avec actes dans un congrès international ou national

Ighil Ameur L. and Hattab M. (2017) "*Crack initiation and propagation of clays under indirect tensile strength test by bending related to the initial suction*". International Workshop Advances in Laboratory Testing & Modelling of Soils and Shales (ATMSS). January 18–20, Swiss Alps, (Accepted).

Ighil Ameur L., Robin G., Hattab M. (2016) "*Characterization of elastic properties of a remoulded clay under complex triaxial paths using ultrasound propagations*". International Conference of the ASCE Engineering Mechanics Institute EMI 2016. October 25–27, Metz, France.

Gao Q., Hattab M., Fleureau J-M., Ighil Ameur L. (2016) "*Microscale investigation of clay particle orientation on different stress paths*". International Conference of the ASCE Engineering Mechanics Institute EMI 2016. October 25–27, Metz, France.

Ighil Ameur L., Robin G., Hattab M. (2016) "*Identification des propriétés élastiques d'une argile remaniée par propagation d'ondes ultrasonores sur chemins triaxiaux complexes*". Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, 6-7 et 8 Juillet, Nancy, France.

Fleureau J-M., Wei X., Ighil Ameur L., Hattab M., *Vanessa Bicalho K.* (2015) "*Experimental Study of Cracking Mechanisms of Clay during Drying*". Proceedings of the 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Diego Manzanal, Alejo O. Sfriso (Eds). 15–18 November, Buenos Aires, Argentina. pp. 2101-2108.

Wei X., *Ighil Ameur L.*, Fleureau J-M., Hattab M. (2015) "*Some mechanisms of crack formation of clay mixture under free desiccation*". Symposium International SEC 2015 International Symposium. France, Marne-La-Vallée, 18 - 19 June. p. 267.

Ighil Ameur L., Robin G., Hattab M. (2014) "*Caractérisation des propriétés élastiques d'un kaolin sous chargement oedométrique par propagation ultrasonore*". 32^{émes} Rencontres Universitaires de Génie Civil (AUGC2014). 4-6 juin. Orléans, France.

Communications orales sans actes dans un congrès international ou national

Wei X., Ighil Ameur L., Fleureau J-M., Bompard P., *Hattab M.* (2015) Highlighting some mechanisms of crack formation and propagation in clays on drying-path. Conference of the ASCE Engineering Mechanics Institute EMI 2015. June 16 – 19, USA, Stanford.