



HAL
open science

Étude expérimentale de la fissuration hydrique d'un sol argileux

Zhengtian Yang

► **To cite this version:**

Zhengtian Yang. Étude expérimentale de la fissuration hydrique d'un sol argileux. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Université de Lorraine, 2022. Français. NNT : 2022LORR0038 . tel-03774977

HAL Id: tel-03774977

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03774977v1>

Submitted on 12 Sep 2022

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

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



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 bibliothèque : 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'UNIVERSITE DE LORRAINE

Spécialité : **Science des matériaux. Mécanique des sols**

Présentée par

Zhengtian YANG

Étude expérimentale de la fissuration hydrique d'un sol argileux

Soutenue publiquement le 21 avril 2022

Devant le jury composé de :

Jean-Marie FLEUREAU	Professeur Emérite	CentraleSupélec - Paris Saclay	Président
Saïd TAIBI	Professeur des Universités	Université le Havre Normandie	Rapporteur
Moulay Saïd EL YOUSOUFI	Professeur des Universités	Université de Montpellier	Rapporteur
Stephen HEDAN	Maître de Conférences-HDR	Université de Poitiers	Examineur
Xin WEI	Associate Professor	Xi'an Jiaotong University	Examinatrice
Mohamad JRAD	Maître de Conférences	Université de Lorraine	Examineur
Lamine IGHIL AMEUR	Docteur-Chercheur	Cerema	Invité
Mahdia HATTAB	Professeur des Universités	Université de Lorraine	Directrice de Thèse
Hanbing BIAN	Maître de Conférences-HDR	Université de Lille	Co-Directeur de Thèse

Laboratoire d'Étude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux
LEM3 UMR CNRS 7239 - Université de Lorraine
7 rue Félix Savart - 57070 Metz - France

« Je pense, donc je suis. »

« Cogito, ergo sum. »

“I think, therefore I am.”

“我思故我在”

René Descartes

à Gabriel

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier Mme Mahdia HATTAB, Professeure des Universités au laboratoire LEM3 UMR 7239 de l'Université de Lorraine et directrice de thèse, qui m'a encadré tout au long de cette thèse et qui m'a fait partager ses brillantes intuitions. Qu'elle soit aussi remerciée pour sa gentillesse, sa disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'elle m'a prodigués. Cette thèse est le fruit d'une recherche de plus de cinq années avec elle. C'est à ses côtés que j'ai compris ce que rigueur et précision voulaient dire.

J'adresse tous mes remerciements à M. Saïd TAIBI Professeur à l'Université le Havre Normandie, ainsi qu'à M. Moulay Saïd EL YOUSOUF, Professeur à l'Université de Montpellier, de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse.

Je remercie également M. Jean-Marie FLEUREAU Professeur émérite de CentraleSupélec Paris Saclay, M. Stephen HEDAN Maître de conférences de l'Université de Poitiers et Mme Xin WEI Professeure associée de Xi'an Jiaotong University d'avoir accepté d'être membres du jury de thèse.

Je tiens à remercier particulièrement M. Mohamad JRAD Maître de conférences de L'Université de Lorraine, pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse et pour sa participation scientifique ainsi que le temps qu'il a consacré à ma recherche. Je tiens également à remercier M. Fares BENNAI Maître de conférences de L'Université de Lorraine, pour sa disponibilité et ses conseils dans la réalisation des essais expérimentaux. J'en profite pour remercier l'ensemble des collègues du LEM3.

Un grand Merci à mon co-directeur de thèse, M. Hanbing BIAN Maître de Conférences de l'Université de Lille, pour toutes nos discussions et ses conseils, qui m'ont accompagné tout au long de mes études en France.

Merci aussi à M. Lamine IGHIL AMEUR, Chercheur au Cerema, dont les thèmes de recherche ont fortement inspiré cette thèse. Merci également à M. Xiaolei CHEN, Docteur au laboratoire LEM3, qui m'aide toujours de toutes les manières possibles.

Je tiens à adresser mes sincères gratitude à mes collègues et amis, en particulier Mme Morgane KESSLER, Mme Dan ZHAO, M. Qianfeng GAO, M. Yajun ZHAO, M. Dongyu WANG et M. Huhe QIAO pour leur aide dans ma vie et mes études.

Enfin, je dois adresser mes remerciements les plus chaleureux à ma famille qui m'a apporté un soutien et des encouragements tout au long des années de mes études en France.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I. Étude bibliographique	5
Introduction	7
1. Notions de base : Sols non-saturés	8
1.1. Sols argileux et milieux poreux	8
1.1.1 Définition et classification des sols argileux	8
1.1.2 Microstructure des argiles	10
1.2. L'eau dans les sols non saturés	13
1.2.1 Eau libre, eau adsorbée et eau inter lamellaire.....	14
1.2.2 Les effets de capillarité	16
1.3. La notion de succion	17
1.3.1 Définition et propriétés.....	17
1.3.2 Méthodes de contrôle et de mesure de la succion dans les sols	18
2. Comportement des sols argileux partiellement saturés et sous sollicitations hydriques	24
2.1. Phénomène du retrait	24
2.2. Propriétés de rétention d'eau	27
3. Fissuration des argiles sous sollicitations hydriques	28
3.1. Phénomène de fissuration due à la dessiccation	28
3.2. L'effet de la fissuration sur les performances du sol	38
3.3. Comportement mécanique et analyse à la rupture	39
3.3.1 Mesure de la résistance à la traction d'un sol sous succion	39
3.3.2 Critères de rupture et comportement	48
3.3.3 Mécanique de la rupture liée à la fissuration de dessiccation.....	51
3.3.4 Initiation et propagation de la fissuration en mode ouverture (Mode I).....	54
Conclusion	58
Chapitre II. La Méthode de Corrélation d'Images Numériques – principe –	

calibration – interprétation des données	59
Introduction	61
1. Technique et fonctionnement de la Corrélacion d'Images Numériques (CIN)62	
1.1. Technique de CIN	62
1.2. Principe et fonctionnement	68
1.3. Restitution des données- approche lagrangienne	76
2. Erreurs de mesure et calibration.....	78
2.1. Maitrise des paramètres influençant la mesure.....	78
2.1.1 Choix du mouchetis	78
2.1.2 Taille de l'imagette (<i>Subset</i>) et taille de pas (<i>Step</i>).....	82
2.1.3 Transparence de l'enceinte de contrôle et influence de la vitre.....	83
2.1.4 Point de mire et distance focale- réglages CIN-3D	85
2.1.5 Remarque concernant le système d'éclairage	85
2.1.6 Les algorithmes de CIN	86
2.2. Étalonnage pour l'utilisation de <i>VIC-2D</i> et de <i>VIC-3D</i>	86
3. Organigramme et calcul des déformations	88
3.1. Calcul des déformations globales	88
3.2. Calcul des déformations locales	90
3.3. Méthode pour la détermination des directions principales de la déformation.....	92
Conclusion	94
Chapitre III. Matériaux et techniques expérimentales.....	96
Introduction	98
1. Propriétés physiques du matériau et préparation des argiles remaniées.....	99
1.1. Propriétés physiques et minéralogiques du <i>Kaolin K13</i>.....	99
1.1.1 Caractéristiques physiques	99
1.1.2 Minéralogie	99
1.2. Confection des argiles remaniées en boue d'argile (<i>Kaolin K13</i>).....	100

2. Techniques de contrôle de succion par équilibre de vapeur	102
2.1. Méthode pour le contrôle de l'humidité relative	102
2.2. Calcul de la succion à une température et une humidité relative imposées	103
2.3. Solutions salines utilisées pour les essais de dessiccation contrôlée	103
2.3.1 Solution saline dans la chambre de contrôle	104
2.3.2 Vérification de la solution KOH.....	105
3. Mesures des paramètres d'état de l'argile non saturée par la méthode du Kerdane.....	106
3.1. Mesure de la variation volumique d'échantillon – Essai au Kerdane	106
3.2. Préparation de l'échantillon	107
3.2.1 Méthode de calcul des paramètres d'état	109
4. Apparition de la fissuration - Traitement par Image-J	109
4.1. Traitement de la fissuration.....	110
4.2. Zones de déformations	111
5. Interface support/argile.....	111
5.1. Essai de cisaillement direct sur plan support/argile	112
5.2. Frottement mobilisé à l'interface	113
Conclusion	116
Chapitre IV. Phénomène du retrait – Mise en évidence par l'observation	117
Introduction	119
1. Courbe de retrait et Courbe de rétention d'eau du <i>Kaolin K13</i>	120
1.1. Détermination de la courbe de retrait	120
1.2. Etude de la courbe de rétention d'eau	125
2. Étude du phénomène de retrait, approche par la technique CIN	129
2.1. Contrôle et suivi de l'humidité relative	129

2.2. Retrait - analyse à l'échelle globale du grand échantillon.....	131
2.3. Déformations locales - Analyse	143
2.4. Teneur en eau et succion locale dans la matrice	149
Conclusion	155
Chapitre V Initiation et propagation des fissures	156
Introduction	158
1. Fissuration de l'argile sous une sollicitation hydrique	159
1.1. Apparition des fissures et analyse quantitative	159
1.2. L'effet du support sur la formation des fissures (analyse en 2D)	163
1.3. Analyse à l'échelle locale à partir de cartographies issues de la CIN-3D.....	166
1.3.1 La déformation locale suivant l'axe X	166
1.3.2 La déformation locale suivant l'axe Y	168
1.3.3 La déformation locale de cisaillement (X,Y)	170
1.3.4 Exemple de propagation de fissure - analyse à partir de cartographies issues de la CIN-2D.....	171
1.3.5 Topographie d'une argile sur chemin de séchage et déformation de la surface (analyse en 3D).....	176
2. Poutrelles d'argile non saturée en flexion 3 points	181
2.1. Comportement mécanique des poutrelles d'argile sous succion en flexion.....	183
2.2 Analyse par la CIN de la déformation locale liée à la fissuration.....	185
Conclusion	193
Conclusion générale.....	194
Références bibliographiques.....	196

Table des illustrations

Figure I.1 : Schématisation d'un milieu poreux vu comme une superposition de deux continus (Coussy, 1995).....	8
Figure I.2 : Représentation schématique des principaux groupes de minéraux argileux par Grunberger (1995) dans Kouadio (2010).....	9
Figure I.3 : Empilements des feuillets argileux à l'échelle de la particule (Gasc-Barbier, 2002).....	9
Figure I.4 : Unité structurale des minéraux argileux d'après Brindley et Pédro (1973)....	10
Figure I.5 : Schéma montrant l'organisation structurale de la kaolinite par Bergaya et Lagaly (2006) cité par Ighil Ameur (2016).....	11
Figure I.6 : Représentation des couches cristallisées des minéraux argileux (d'après Mitchell, 1993 ; cité par Delage et Cui, 2000).....	11
Figure I.7 : Représentation structurale de minéral argileux de type T-O et type T-O-T (Pope et al., 2001).....	12
Figure I.8 : Représentation de la structure de la particule d'argile : (a) Schéma de la particule de kaolinite (Tessier, 1984), (b) Image MEB d'une argile de type kaolinite (Comparo, 2004).....	13
Figure I.9 : Modes d'associations supposés des particules de montmorillonite : (a) dispersion, (b) agrégation face-face, (c) association bord-face, (b) association bord-bord (d'après Van Olphen, 1964 ; cité par Gautier, 2008).....	13
Figure I.10 : Représentation schématique d'un sol non-saturé selon Wheeler et al., (2003).....	14
Figure I.11 : Les couche d'eau absorbée sur la surface des particules (Van Damme, 2001).....	15
Figure I.12 : Illustration du phénomène de remontée capillaire dans un tube (Delage et Cui, 2000).....	16
Figure I.13 : Différents stades de pénétration de l'air dans un sol granulaire (d'après Childs, 1969 ; cité par Delage et Cui, 2000).....	16
Figure I.14 : Illustration de la méthode de plaque tensiométrique : (a) Principe de mesure de la succion par tensiométrie (Delage et Cui, 2000), (b) Dispositif expérimental de la plaque tensiométrique (illustration de Wei, 2014).....	20
Figure I.15 : Schéma et photos du dispositif expérimental osmotique (par Li, 2015).....	20
Figure I.16 : Courbe de calibration de la concentration de la solution PEG 20000 en fonction de la succion à 25°C (d'après Williams et Shaykewich, 1969 ; cité par Vicol,	

1990).....	21
Figure I.17 : Schéma de principe de la technique d'équilibre de vapeur par Delage et Cui (2000).	21
Figure I.18 : Schéma et photos de l'appareil DVS Intrinsic (DVS Intrinsic Brochure, <i>Surface Measurement Systems</i>).	23
Figure I.19 : Évolution de masse mesurée par l'appareil DVS, ainsi que les humidités relatives imposées et mesurées (<i>Kaolinite P300</i> - Wei, 2014).	24
Figure I.20 : Caractéristiques de la courbe de retrait d'un sol naturel d'après Stirk (1954) cité par Tang et al. (2011).	25
Figure I.21 : Courbe de retrait obtenue par Tang et al. (2011) sur l'argile de Romainville.	25
Figure I.22 : Courbe de retrait typique d'après Fredlund et al. (2002) ; cité par Gao (2018).	26
Figure I.23 : Comparaison du chemin de séchage NC et des chemins œdométriques et isotropes NC dans le domaine saturé pour l'argile (<i>Kaolinite P300</i>) par Taïbi (1994).	27
Figure I.24 : Courbe de rétention d'eau – premier cycle de dessiccation-humidification sur l'argile jaune (<i>Kaolinite P300</i>) initialement sous forme de boue ($w = 1.5w_L$) par Indarto (1991) cité par Taïbi (1994).	28
Figure I.25 : La forme des fissures dans un sol rectangulaire en fin de séchage, l'échantillon est de dimensions 60 x 84 cm ² et d'épaisseur 23,2 mm (Corte et Higashi, 1960).	29
Figure I.26 : Modèles théoriquement plausibles de fissures de dessiccation dans des milieux idéalisés d'après Bažant et Cedolin (1991).	30
Figure I.27 : Exemples des observations de la fissuration in-situ : (a) La fissuration dans les résidus miniers de charbon, New Hope Colliery, Australie (Morris et al., 1992) ; (b) Fissuration hexagonale sur une surface de playa composée de sédiments uniformes, Nevada, États-unien (Longwell, 1928) ; (c) Différentes échelles de fissuration observée à Xi'an, Chine (Wei, 2020).	31
Figure I.28 : Dispositif expérimental pour l'essai de fissuration par Lau, (1987).	32
Figure I.29 : L'utilisation de différents supports d'échantillon permet de contrôler les conditions aux limites au niveau du contact entre l'échantillon et le support (Péron, 2008) : (a) Moule d'échantillon et support en Téflon traité avec graisse ; (b) Support en métal avec des encoches parallèles espacées de 2mm pour générer une forte contrainte axiale.	33
Figure I.30 : Fissures observées par Péron (2008).	34
Figure I.31 : Fissurations observées dans les échantillons avec différentes épaisseurs : (a)	

Échantillon de 4 mm d'épaisseur ; (b) Échantillon de 12 mm d'épaisseur (Péron et al. 2009a).....	34
Figure I.32 : Schéma de dispositif expérimental pour surveiller le développement de la fissuration (Tang et al., 2010).....	35
Figure I.33 : Procédure de traitement d'image numérique : (a) Image originale en niveau de gris des fissures ; (b) l'image binaire noire et blanc des fissures après traitement (Tang et al., 2010).....	35
Figure I.34 : Schéma du dispositif expérimental équipé de deux caméras - photo montrant l'épaisseur de l'échantillon pendant le séchage (Tang et al., 2011).	36
Figure I.35 : Échantillon d'argile rectangulaire (Wei, 2014), (a) État initial ; (b) Fissures dans l'échantillon après 23 heures de séchage.....	36
Figure I.36 : Dispositif expérimental pour la corrélation d'images numériques (Wei, 2014).	37
Figure I.37 : Schéma du dispositif expérimental pour essais de dessiccation contrôlée (Ighil Ameer, 2016).	38
Figure I.38 : Représentation de l'échantillons sur le support (Ighil Ameer, 2016).	38
Figure I.39 : Conductivité hydraulique en fonction du nombre de cycles de séchage pour les différents sols argileux étudiés (Albrecht et Benson, 2001).....	39
Figure I.40 : Schéma d'équipement de LVDT pour essai traction directe (Nahlawi et al., 2004).....	40
Figure I.41 : La relation entre la force de traction et le déplacement de l'argile <i>Werribee</i> avec différents teneurs en eau (Nahlawi et al., 2004).....	40
Figure I.42 : Résistance à la traction et déformation à la rupture en fonction de la teneur en eau pour l'argile de <i>Werribee</i> (Nahlawi et al., 2004).....	41
Figure I.43 : Dispositif expérimental pour mesurer la résistance à la traction des sols (Avila, 2004).....	41
Figure I.44 : Dispositif expérimental pour essais de traction : (a) échantillon avant traction ; (b) échantillon après traction ; (c) rupture d'échantillon (Wei, 2014).	42
Figure I.45 : Relation entre contrainte de traction et déformation pour <i>Kaolinite P300</i> avec différents teneurs en l'eau (Wei, 2014).	42
Figure I.46 : Schéma du dispositif expérimental pour l'essai de double poinçon (Fang et Chen, 1971).....	43
Figure I.47 : Charges et distribution des contraintes dans les essais de flexion d'après Al-Hussaini et Townsend (1973).	43
Figure I.48 : Diagrammes de distribution des contraintes et déformations dans un essai de flexion (Ajaz et Parry, 1975).	44

Figure I.49 : Dispositif expérimental des essais de flexion pour petites poutrelles d'argile (Ighil Ameer et Hattab, 2017).	47
Figure I.50 : Déformation locale longitudinale ε_{xx} en (a) image i ; (b) image $i + 1$; (c) image f et (d) leurs positions sur la courbe de contrainte de traction (Ighil Ameer et Hattab, 2017).	47
Figure I.51 : Critère de rupture de Mohr-Coulomb cité par Wei et al. (2020b).	48
Figure I.52 : Enveloppes de rupture selon différents critères (Lee et Ingles, 1968).	50
Figure I.53 : Critère de Mohr-Coulomb modifié Fang et Chen (1972).	51
Figure I.54 : Fissure dans une plaque finie cité par Wei (2020b).	51
Figure I.55 : Modes de fissuration dans un problème 3D : (a) Mode I mode d'ouverture ; (b) Mode II mode de glissement ; (c) Mode III mode de déchirement d'après Degarmo et al. (2003) ; cités par Ighil Ameer (2016).	53
Figure I.56 : Fissure en mode ouverture : (a) cartographie de la déformation longitudinale ε_{xx} ; (b) schéma de la déformation principale dans la zone I (Wei et al., 2016).	55
Figure I.57 : Cartographie de déformation principale majeure ε_1 à la fin du séchage ($s = 361$ MPa, $w = 2,2$ %) Ighil Ameer (2016).	56
Figure I.58 : Déformations principales locales calculées à la fin du séchage dans deux zones Ighil Ameer (2016).	57
Figure II.1 : Schéma du système d'imagerie de CIN-2D.	63
Figure II.2 : Schéma du système d'imagerie de CIN-3D.	63
Figure II.3 : Procédure de mise en œuvre de la technique CIN-2D.	64
Figure II.4 : Procédures de mise en œuvre de la technique CIN-3D.	66
Figure II.5 : Système expérimental de la dessiccation contrôlée utilisant la technique CIN-2D.	67
Figure II.6 : Dispositif expérimental de la technique CIN-3D.	68
Figure II.7 : Échantillon d'argile sans et avec mouchetis.	69
Figure II.8 : Détection et suivi du mouvement des pixels et des niveaux de gris.	70
Figure II.9 : Image de référence - Le carré rouge est l'imagerie utilisée pour suivre le mouvement du point de mesure, les points d'intersection sur la grille jaune sont les points de mesure.	71
Figure II.10 : Taille de pas et résolution spatiale.	71
Figure II.11 : Représentation schématique du principe de la CIN.	72
Figure II.12 : Les principes de la CIN locale et de la CIN globale par Yang et Bhattacharya (2019)	74

Figure II.13 : Image de référence, zone AOI et le système de coordonnées de Lagrange dans le logiciel <i>VIC-2D</i> .	76
Figure II.14 : Exemple de données sous forme fichier <i>Excel</i> exportées par logiciel <i>VIC-2D</i> .	77
Figure II.15 : Système de coordonnées et plan adapté pour la représentation des données <i>VIC-3D</i> .	78
Figure II.16 : Platine de positionnement.	79
Figure II.17 : Déplacement et rotation imposés à l'ensemble de l'échantillon.	79
Figure II.18 : Echantillons avec différentes densités de mouchetis.	79
Figure II.19 : Exemples de champ de déformations ε_{xx} avec différents types de mouchetis.	81
Figure II.20 Choix des paramètres de calcul avec <i>VIC-2D</i> .	82
Figure II.21 Cartographies de la déformation ε_{xx} avec différentes valeurs du <i>Subset</i> et du <i>Step</i> .	83
Figure II.22 : Mire de calibration de <i>VIC-3D</i> .	85
Figure II.23 : Schéma des différentes configurations de mouvements imposés à l'échantillon.	86
Figure II.24 : Schéma de l'échantillon et calcul de la déformation globale.	88
Figure II.25 : Organigramme de calcul des déformations globales via la CIN.	89
Figure II.26 : Calcul des déformations locales via la CIN.	91
Figure II.27 : Petites zones P_i pour le calcul des déformations locales – cartographie du déplacement vertical W .	91
Figure II.28 : État des déformations via le plan de Mohr.	92
Figure II.29 : Directions des déformations principales (a) schéma de principe, (b) exemple de résultat sous forme de cartographie.	93
Figure III.1: Composition minéralogique du <i>Kaolin K13</i> et de la <i>Kaolinite P300</i> .	100
Figure III.2: Préparation de la boue : (a) malaxeur, (b) boue d'argile et (c) conditionnement.	101
Figure III.3 : Schéma de principe de la technique d'équilibre de vapeur.	102
Figure III.4 : Dispositifs et enceintes utilisés, (a) Dessiccateur ; (b) Chambre de contrôle.	103
Figure III.5 : La courbe d'humidité relative en fonction du temps, la courbe de succion imposée en fonction du temps.	105

Figure III.6 : Dispositif d'essai au Kerdane.....	107
Figure III. 7 : Principe de l'essai au Kerdane.....	109
Figure III.8 : Organigramme de traitement la fissuration hydrique avec Image-J.....	110
Figure III.9 : Image d'une fissure avant et après le traitement par Image-J.	110
Figure III.10 : Exemple d'une zone de déformation capturée autour d'une fissure.	111
Figure III.11 : Dispositif expérimental d'essai de cisaillement direct support/argile.....	112
Figure III.12 : L'angle de frottement des différents supports testés.	114
Figure III.13 : Topographie 3D de la surface du support <i>TF</i> donnée par le microscope confocal (Ighil Ameer (2016)).	115
Figure IV.1 : Caractéristiques des solutions salines dans les dessiccateurs.....	121
Figure IV.2 : Courbe de retrait du sol - (a) Courbe de retrait typique, (b) Variation de l'indice des vides en fonction de la teneur en eau (Indarto (1991) cité dans Taïbi (1994)).	123
Figure IV.3 : (a) Variation du degré de saturation en fonction de la teneur en eau (Indarto (1991) cité dans Taïbi (1994)) et la courbe de retrait, (b) Déformation volumique en fonction de la teneur en eau – cas de l'essai <i>DC7-TG-3D-s385</i>	124
Figure IV.4 Variation de la teneur en eau volumétrique en fonction de la succion (Indarto (1991) cité dans Taïbi (1994) ; Wei (2014)).....	127
Figure IV.5 Variation du degré de saturation en fonction de la succion (Indarto (1991) cité dans Taïbi (1994)).	127
Figure IV.6 : Dessiccation contrôlée (a) Variation de l'humidité relative en fonction du temps, (b) Variation de la succion en fonction du temps, (c) Évolution de la teneur en eau en fonction du temps, (d) Vitesse de séchage en fonction du temps.	130
Figure IV.7 : Variation de la température ambiante en fonction du temps.	131
Figure IV.8 : Schéma des déformations globales ε_x , ε_y et ε_z de l'échantillon sur le support lisse.	132
Figure IV.9 : Déformations horizontales globales(a) Variation de la déformation globale suivant l'axe X en fonction de la teneur en eau, (b) Variation de déformation globale suivant l'axe Y en fonction de la teneur en eau..	133
Figure IV.10 : Déformation verticale globale - (a) Topographie du déplacement vertical local de l'essai <i>DC6-TG-3D-s387</i> , $t = 16$ h et $w = 34,4$ % (b) Évolution de la déformation globale verticale en fonction de la teneur en eau.....	135
Figure IV.11 : Topographie de déplacements verticaux W au cours du séchage.	136
Figure IV.12 : Évolution de la déformation volumique en fonction de la teneur en eau..	138
Figure IV.13 : Variations des déformations globales en fonction de la teneur en eau, (a)	

Résultats de l'essai <i>DC6-TG-3D-s387</i> , (b) Résultats de l'essai <i>DC7-TG-3D-s385</i>	139
Figure IV.14 : Variations du paramètre d'anisotropie en fonction de teneur en eau des essais <i>DC6-TG-3D-s387</i> et <i>DC7-TG-3D-s385</i>	140
Figure IV.15 : Paramètre d'anisotropie – Comparaison de la courbe d'ajustement avec les résultats expérimentaux.	141
Figure IV.16 : Variations des déformations de retrait calculées par le coefficient d'anisotropie η , en fonction de la teneur en eau.	142
Figure IV.17 : Champ des déplacements U et V au cours du séchage.	144
Figure IV.18 : Disposition des différentes zones d'analyse, P_i , du champ de déformation horizontale ε_{xx} de l'essai <i>DC6-TG-3D-s387</i> ($t = 28.8$ h, $w = w_{SL} = 24$ %).	145
Figure IV.19 : Variations de la déformation horizontale locale obtenues dans chaque zone P_i – cas de l'essai <i>DC6-TG-3D-s387</i> . Cartographie de ε_{xx} et des zones P_i	146
Figure IV.20 : Variations de la déformation horizontale locale obtenues pour chaque zone P_i – cas de l'essai <i>DC6-TG-3D-s387</i> . Cartographie de ε_{yy} et des zones P_i	147
Figure IV.21 : Variations de la déformation horizontale locale obtenues pour chaque zone P_i – cas de l'essai <i>DC6-TG-3D-s387</i> . Cartographie de ε_{zz}	147
Figure IV.22 Variation de la déformation volumique locale en fonction de la teneur en eau - cas de l'essai <i>DC6-TG-3D-s387</i>	148
Figure IV.23 : Distributions de la teneur en eau selon l'axe X - cas de l'essai <i>DC6-TG-3D-</i> <i>s387</i>	150
Figure IV.24 : Cartographies de distribution de la teneur en eau locale	151
Figure IV.25 : Cartographies de distribution de la succion locale.	154
Figure V.1 : Chemin de séchage – (a) Évolution de la teneur en eau en fonction du temps, (b) Variations de la succion imposée en fonction du temps.	160
Figure V.2 : Dimension et morphologie des fissures produites dans les différents échantillons, (a) <i>DC1-PG-2D-s359</i> , (b) <i>DC2-PG-2D-s361</i> , (c) <i>DC5-PG-3D-d360</i>	160
Figure V.3 : Développement de fissures hydriques dans différents échantillons en fonction de la teneur en eau, (a) Variation de la longueur totale des fissures, (b) Variation de la largeur moyenne des fissures.	161
Figure V.4 : Variation de l'indice de fissuration en fonction de la teneur en eau.	162
Figure V.5 : Schéma des deux supports utilisés (a) Support lisse (<i>TG</i>), (b) Support semi- rugueux (<i>PG</i>).	163
Figure V.6 : Effet du support sur la déformation globale en fonction de teneur en eau, (a)	

Variation de la déformation horizontale, (b) Variation de la déformation verticale. .	164
Figure V.7 : Variation de la déformation de retrait (libre), déformation avec le support semi-rugueux et la déformation mécanique calculée en fonction de la teneur en eau au cours du dessiccation de l'échantillon.....	165
Figure V.8 : Cartographies de la déformation locale ε_{xx} de l'essai <i>DC5-PG-3D-s390</i>	167
Figure V.9 : Cartographies de la déformation locale ε_{yy} de l'essai <i>DC5-PG-3D-s390</i> ..	169
Figure V.10 : Cartographies de la déformation de cisaillement ε_{xy} de l'essai <i>DC5-PG-3D-s390</i>	170
Figure V.11 : Fissures hydriques et leurs zones en extension - cartographie des déformations ε_{yy} de l'essai <i>DC2-PG-2D-s361</i>	172
Figure V.12 : Déformations locales ε_{xx} , ε_{yy} et ε_{xy} dans la zone <i>I-DC2</i> à différents temps de séchage.	173
Figure V.13 : Cartographies des directions principales locales dans la zone <i>I-DC2</i> essai <i>DC2-PG-2D-s361</i>	174
Figure V.14 : Déformations locales ε_{xx} , ε_{yy} et ε_{xy} dans la zone <i>II-DC2</i> à différents temps de séchage	175
Figure V.15 : Cartographies des directions principales locales dans la zone <i>II-DC2</i> essai <i>DC2-PG-2D-s361</i>	176
Figure V.16 : Topographies des surfaces aux différentes teneurs en eau en retrait libre essai <i>DC6-TG-3D-s387</i>	178
Figure V.17 : Topographies aux différentes teneurs en eau indiquant des fissures et du retrait de l'essai <i>DC5-PG-3D-s390</i>	180
Figure V.18 : Essai de flexion 3 points : (a) Schéma du dispositif expérimental et position de la poutrelle d'argile (b) Illustration de la flexion.	181
Figure V.19 : Schéma de fabrication et dimensions de la poutrelle.	182
Figure V.20 : Évolution de la force de flexion en fonction de la déflexion Poutrelles sous un environnement initial de succion de 38 MPa.	182
Figure V.21 : Évolution de la force en fonction de la déflexion Poutrelles sous un environnement initial de succion de 104 MPa.	183
Figure V.22 : Évolution de la force en fonction de la déflexion Poutrelles sous un environnement initial de succion de 364 MPa.	184
Figure V.23 : Cartographies des déformations locales dans la poutrelle de l'essai <i>PF1-s38</i> avant la fissuration.	186
Figure V.24 : Évolution de la déformation locale ε_{xx} pendant la fissuration essai <i>PF1-s38</i> .	

.....	187
Figure V.25 : Évolution de la déformation locale ε_{xx} pendant la fissuration essai <i>PF2-s104</i> .	
.....	188
Figure V.26 : Évolution de ε_{xx} pendant la fissuration essai <i>PF2-s364</i> .	189
Figure V.27 : Distribution des déformations locales ε_{xx} , essai <i>PF2-s364</i> , (a) Positions des lignes analysées (b) Distributions de la déformation locale.....	190
Figure V.28 : Distribution des déformations locales ε_{yy} essai <i>PF2-s364</i> , (a) Positions des lignes analysées (b) Distributions de la déformation locale.....	191
Figure V.29 : Distribution des déformations de cisaillement ε_{xy} l'essai <i>PF2-s364</i> , (a) Positions des lignes analysées (b) Distributions de la déformation locale.	192

Table des tableaux

Tableau I.1 : Technique de mesure ou d'imposition de la succion	19
Tableau I.2 : Relation humidité relative - succion (Delage et Cui, 2000).	22
Tableau II.1 : Mesures de déplacements et déformations locaux avec différentes densités de mouchetis.	80
Tableau II.2 : Déplacements et déformations locaux avec et sans vitre.	84
Tableau II.3 : Sensibilité des déplacements mesurés avec et sans vitre.	87
Tableau II.4: Sensibilité des déformations mesurées avec et sans vitre.	87
Tableau III.1 : Propriétés physiques du <i>Kaolin K13</i> et de la <i>Kaolinite P300</i>	99
Tableau III.2 : Méthodologie du mélange de l'argile poudre et de l'eau.	101
Tableau III.3 : Caractéristiques chimiques de solution saline utilisée.	104
Tableau III.4 : Comparaison de la succion imposée avec la valeur théorique.	106
Tableau III.5: Les humidités relatives et succions liées aux différentes solutions salines saturées.	108
Tableau IV.1 : Caractéristiques des solutions salines dans les dessiccateurs.	120
Tableau IV.2 : Caractéristiques et nomenclature des essais aux Kerdane.	122
Tableau IV.3 : Paramètres de l'équation de Fredlund.	125
Tableau IV.4 : Paramètres de l'équation de Van Genuchten.	128
Tableau IV.5 : Caractéristiques et nomenclature des essais de dessiccation contrôlée.	129
Tableau IV.6 : Paramètres de la courbe d'ajustement obtenus.	141
Tableau V.1 : Caractéristiques des essais qui ont fait apparaître des fissures hydriques.	159
Tableau V.2 : Caractéristiques hydriques des essais sélectionnés.	177
Tableau V.3 : Nomenclature et caractéristiques hydriques des essais de flexion réalisés.	182

Introduction générale

Introduction générale

Les sols argileux sont abondamment distribués sur la terre et ont été largement utilisés comme matériaux de génie civil. Dans les pratiques d'ingénierie, la fissuration des sols, en particulier des sols argileux, est un phénomène très courant qui se manifeste lors de la dessiccation. L'argile est un matériau hygroscopique sensible aux variations de l'humidité relative ambiante et la variation de sa teneur en eau conduit à des variations de volume. Sur un chemin de séchage, une argile saturée se déforme en réponse à la perte d'eau. Cela induit le phénomène de retrait qui représente l'une des raisons principales de la fissuration par dessiccation. Par conséquent, des désordres liés à l'endommagement des structures soutenues par le sol ou de la structure du sol peuvent apparaître. Dans diverses applications géotechniques, agricoles et environnementales, les fissures hydriques dues à la dessiccation des sols peuvent avoir de sérieux impacts sur les performances des sols.

Dans le domaine de l'ingénierie hydraulique, les fissures, dans les barrages, causées par le changement climatique peuvent augmenter leur perméabilité et réduire leur stabilité structurelle. Par exemple, les barrages de Stockton et de Wister aux États-Unis se sont effondrés en raison de surcharges de tuyaux provoquées par des fissures hydriques (Sheraed, 1973). La sécheresse de 2007 à Chongqing en Chine, a provoqué de graves fissures dans 1 200 barrages réservoirs (Tang et al., 2011).

Dans le domaine de la géotechnique environnementale, les argiles peuvent être utilisées comme barrières ouvragées pour le stockage des déchets nucléaires. En raison des températures élevées induites par les déchets nucléaires, des fissures de retrait peuvent apparaître et réduire l'efficacité des barrières, ce qui provoque la contamination du milieu naturel souterrain (Miller et al., 1988). Une autre application concerne le revêtement d'argile pour les décharges de déchets. La barrière d'argile va permettre d'éviter la contamination de l'eau souterraine grâce à sa faible perméabilité. La conductivité hydraulique de la couche d'argile peut augmenter considérablement dans le cas où des fissures se manifestent (Albrecht et Benson, 2001).

Dans ce contexte, Il est primordial de comprendre le comportement de retrait et les mécanismes de la fissuration dus au séchage des argiles. Des recherches supplémentaires sont absolument nécessaires pour mieux prédire le comportement des argiles et maîtriser leur utilisation.

L'objectif principal de la thèse est d'analyser le phénomène d'initiation et de propagation des fissures dans les sols argileux sous sollicitation hydrique et mécanique. Il s'agit également de caractériser le phénomène du retrait par dessiccation afin d'étudier finement les déformations et la fissuration qui en résulte.

Pour atteindre les objectifs de l'étude, la recherche proposée dans cette thèse est menée par des études expérimentales. Le comportement de retrait et de fissuration des échantillons d'argile est étudié à l'échelle globale et locale au moyen de différentes

méthodes expérimentales qui sont répertoriées ci-dessous :

- La méthode des solutions salines a été utilisée pour imposer différents niveaux de succion aux petits échantillons d'argile et pour réaliser des essais de dessiccation contrôlée avec les grands échantillons d'argile sur le même chemin de séchage.
- Les techniques de CIN-2D et CIN-3D ont été utilisées pour caractériser le retrait et la fissuration des échantillons en termes de déformations globales de l'échantillon et des champs de déplacements et de déformations locaux.
- La méthode du kerdane a permis de mesurer les paramètres hydriques des échantillons. La courbe de retrait et la courbe de rétention d'eau de l'argile étudiée ont été obtenues par ajustement des données à l'aide des modèles de Fredlund ([Fredlund et al., 2002](#)) et Van Genuchten ([Van Genuchten., 1980](#)).
- Les essais de flexion trois points ont permis d'étudier la fissuration des échantillons d'argile avec différents niveaux de succion sous tension indirecte et de déterminer la résistance à la traction de l'argile.
- Le logiciel Image-J a permis d'effectuer une analyse quantitative continue des fissures développées dans les échantillons au cours du séchage.
- La modification du dispositif d'essai de cisaillement direct, pour la mesure de l'angle de frottement de différents supports en contact avec l'argile, a permis d'étudier l'interaction entre le support et l'échantillon.

Ce mémoire de thèse est structuré en cinq chapitres :

Le chapitre I représente une synthèse bibliographique générale concernant le comportement au séchage, le retrait du séchage et la fissuration hydrique des sols argileux, ainsi que les notions théoriques des sols argileux non saturés.

Le chapitre II est dédié à la présentation de la technique de traitement d'images représentant le moyen principal de mesure. Le principe et le fonctionnement de la corrélation d'images numériques, l'étalonnage du dispositif expérimental, la précision des mesures, ainsi que le traitement des résultats de mesure et la détermination des déformations sont détaillés dans ce chapitre.

Les propriétés du matériau argileux étudié et les techniques expérimentales utilisées dans l'étude sont présentées dans le chapitre III.

Dans le chapitre IV, le phénomène de retrait des échantillons d'argile dû au séchage à l'échelle globale et locale a été étudié. D'abord, la courbe de retrait et la courbe de rétention d'eau ont été déterminées. Par la suite, le phénomène de retrait libre a été étudié par des

essais de dessiccation contrôlée. Les résultats de la CIN à l'échelle locale ont été présentés et discutés.

Enfin, le dernier chapitre vise à analyser l'initiation et la propagation des fissures observées sous chargements hydrique et mécanique afin d'identifier les mécanismes de fissuration.

Chapitre I

Étude bibliographique

Chapitre I. Étude bibliographique

Sommaire :

Introduction

1. Notion de base : Sols non-saturés

1.1. Sols argileux et milieux poreux

1.2. L'eau dans les sols non-saturés

1.3. La notion de succion

2. Comportement des sols argileux partiellement saturés et sous sollicitations hydriques

2.1. Phénomène du retrait

2.2. Propriétés de rétention d'eau

3. Fissuration des argiles sous sollicitations hydriques

3.1. Phénomène de fissuration due à la dessiccation

3.2. L'effet de la fissuration sur les performances du sol

3.3. Comportement mécanique et analyse à la rupture

Conclusion

Introduction

Le retrait et la fissuration par dessiccation des argiles sont des problèmes courants qui ont des impacts direct ou indirect sur les performances des sols argileux dans les diverses applications géotechniques. Dans la littérature, de nombreuses publications étudient le comportement du sol au séchage, y compris le retrait et la fissuration des sols argileux sous dessiccation. Dans ce chapitre, la synthèse bibliographique présente le comportement des sols argileux saturés et non saturés sous sollicitations hydriques. L'état de l'art dans ce chapitre est composé de trois volets.

Le premier volet de ce chapitre introduit les définitions de base du sol non saturé liées au sujet qui sont aussi la base théorique de ces travaux. Le matériau étudié est l'argile qui est un milieu poreux. Sa définition et ses propriétés physico-chimiques sont résumées dans ce chapitre. La microstructure des argiles et l'organisation texturale sont également décrites en détail dans cette partie. Ensuite, nous nous concentrerons sur l'eau dans les sols, afin d'étudier le comportement des sols sous sollicitations hydriques. Le principe est donc d'avoir une bonne connaissance des distributions de l'eau au sein du milieu non-saturé. Les méthodes expérimentales existantes permettant de contrôler et mesurer la succion sont également présentées dans cette partie. Grâce à ces études nous avons sélectionné des méthodes pour les appliquer à nos essais de dessiccation.

Le second volet concerne le comportement de l'argile sous sollicitation hydrique. Le retrait est un des phénomènes importants liés au séchage. Afin de mieux comprendre ce phénomène, nous avons introduit ici la courbe de retrait et la courbe de rétention d'eau. Cela nous permet d'étudier le comportement de l'argile pendant tout le processus de dessiccation et de fournir une base théorique pour analyser des résultats expérimentaux de nos essais.

Les fissures peuvent se produire lorsque les sols argileux sèchent. **Le troisième volet** consiste à aborder des études de la littérature effectuées sur la fissuration des argiles. Ces études comprennent des observations in-situ et observations en laboratoire. Nous avons ensuite passé en revue les travaux sur l'effet de la fissuration sur les performances du sol, ainsi que le mécanisme de fissuration dans les argiles.

Afin de mieux comprendre le critère de rupture et les relations entre la résistance à la traction et l'amorce de la fissure, différentes études expérimentales sont analysées dans cette partie du chapitre.

1 Notions de base : Sols non-saturés

1.1 Sols argileux et milieux poreux

A l'échelle microscopique, un milieu poreux est constitué d'une phase solide et d'une phase de vide (pore). Coussy (2004) considère les milieux poreux comme la superposition de deux milieux continus : une matrice solide et un ensemble de vides inclus dans cette matrice. La figure I.1 représente un schéma de cette superposition d'après Coussy (Coussy, 1991). La matrice solide est présentée à gauche, avec son espace interstitiel. Au milieu, l'espace occupé par le fluide est présenté en noir. A droite, la combinaison de la phase solide et de la phase fluide. Ce fluide peut être un gaz ou un liquide occupant tous les pores. L'espace poreux connecté (porosité connectée) est l'espace dans lequel le fluide peut s'écouler.

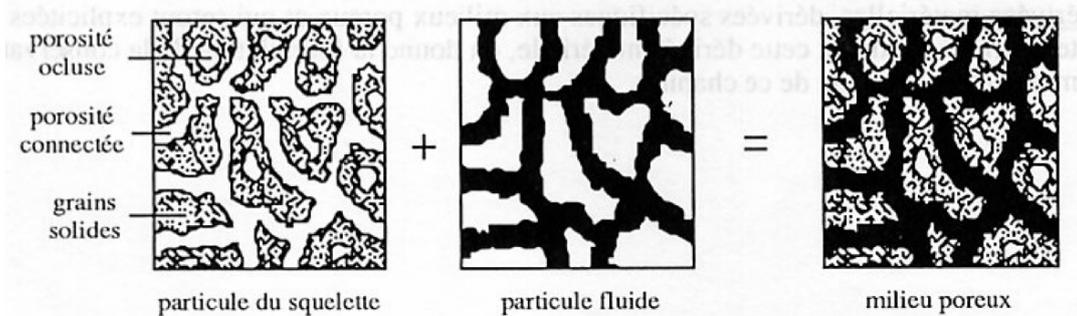


Figure I.1 : Schématisation d'un milieu poreux vu comme une superposition de deux milieux continus (Coussy, 1995).

1.1.1 Définition et classification des sols argileux

Les argiles sont des minéraux qui proviennent de l'altération et de la dégradation des roches sous des effets physiques tels que des variations de température qui ont subi des effets chimiques par exemple au contact de l'eau. La définition de l'argile a été stipulée par le Comité International de Classification et de Nomenclature des Minéraux Argileux (A.I.P.E.A.), durant la quatrième Conférence Internationale à *Madrid* en 1972. Le comité a défini l'argile comme un matériau naturel composé principalement de minéraux à grains fins généralement plastique à des teneurs en eau appropriées, le matériau durcit après séchage ou cuisson (Brindley et Pédro, 1973).

L'argile est définie d'une manière plus générale comme un type de sol naturel à grain fin contenant des minéraux argileux (Bailey, 1980). Les phénomènes physico-chimiques des minéraux argileux jouent un rôle important lors de la désaturation de l'argile sous sollicitations hydriques. Il convient donc de comprendre la composition minéralogique des argiles, leur structure, ainsi que l'état de l'eau dans les minéraux argileux pour caractériser l'influence de la dessiccation sur le comportement hydrique, mécanique et hydromécanique des sols argileux.

- Les argiles

Le mode d'arrangement de tétraèdres et octaèdres est le critère le plus utilisé pour classer les principaux groupes de minéraux argileux (Grim, 1968 ; Mitchell, 1976). Leur présentation schématique est donnée dans la figure I.2.

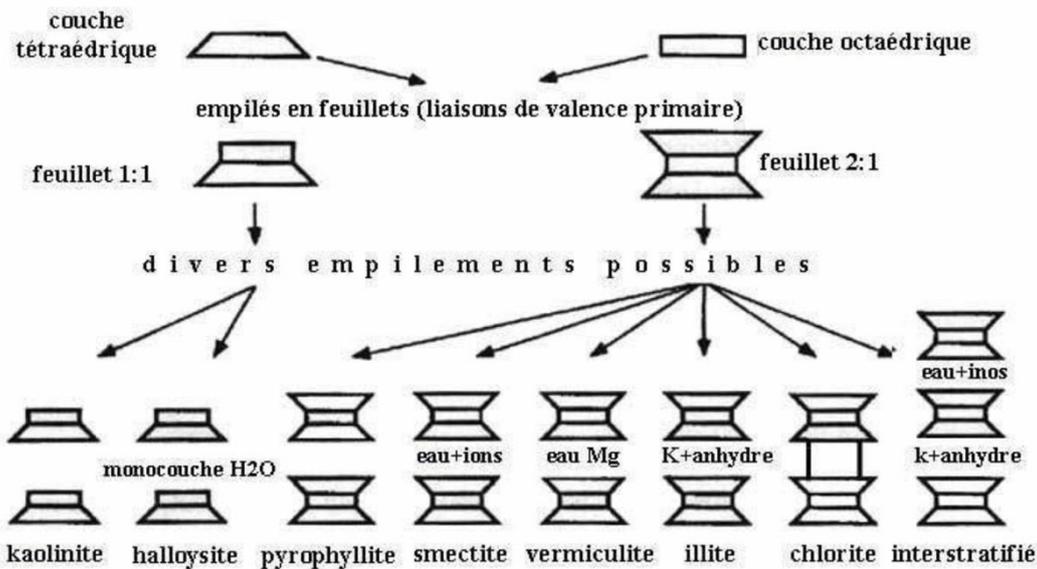


Figure I.2 : Représentation schématique des principaux groupes de minéraux argileux par Grunberger (1995) dans Kouadio (2010).

- Kaolinite

La kaolinite appartient à la famille des phyllosilicates de type 1/1 dans laquelle l'empilement des feuillets est fixé et ordonné (Fig. I.3) sous forme de structure $Al_2Si_2O_5(OH)_4$. La superposition des feuillets de kaolinite conduit au développement d'une liaison hydrogène entre les O^- et les H^+ au niveau de la surface de contact. Elle se forme sous des conditions drainées avec un faible pH, en particulier dans les régions intertropicales de fortes précipitations. Dans la nature, les sols kaoliniques sont formés par altération atmosphérique ou hydrothermale de kaolinite. Ce sont donc des argiles stables. La distance entre les feuillets est proche de 7 Å.

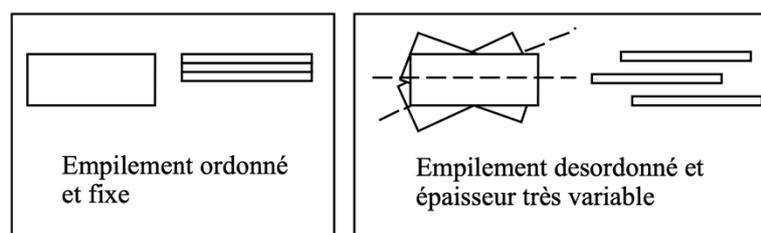


Figure I.3 : Empilements des feuillets argileux à l'échelle de la particule (Gasc-Barbier, 2002).

1.1.2 Microstructure des argiles

Les études de microstructure des argiles contribuent à la compréhension du comportement macroscopique et des propriétés physiques du sol argileux. Ces études impliquent la détermination des propriétés des argiles au niveau microscopique. A l'échelle de la particule ou de l'agrégat, l'arrangement et la distribution des particules, l'assemblage des particules et les pores ainsi que leur contact et leur connectivité ont été étudiés par divers auteurs parmi lesquels [Delage et Lefebvre, \(1984\)](#) ; [Mitchell, \(1993\)](#) ; [Fukue et al., \(1999\)](#) ; [Hicher et al., \(2000\)](#) ; [Borsic et al., \(2005\)](#) ; [Mitchell et Soga, \(2005\)](#).

Les minéraux argileux sont caractérisés par leur unité structurale qui est constituée d'un feuillet et d'un espace interfoliaire (Fig. I.4). Les feuillets sont séparés les uns des autres par des espaces interfoliaires qui peuvent contenir de l'eau interlamellaire, assurant différents types de liaisons électrochimiques entre les feuillets ([Brindley et Pédro, 1973](#) ; [Van Olphen, 1977](#)).

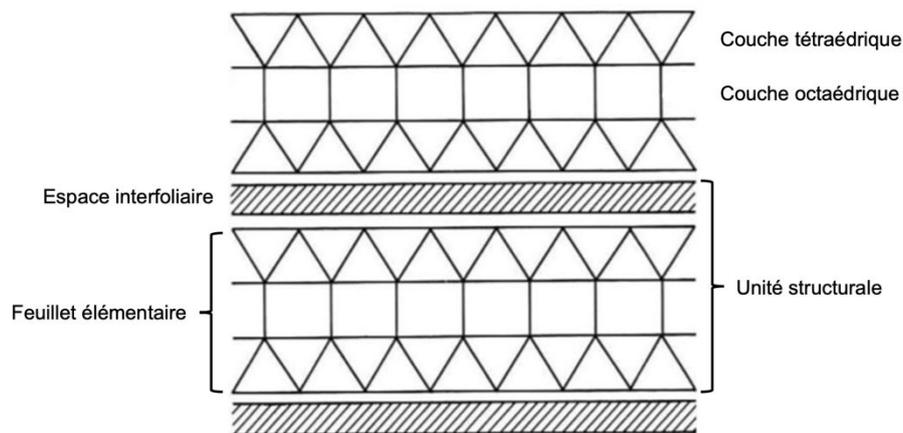


Figure I.4 : Unité structurale des minéraux argileux d'après [Brindley et Pédro \(1973\)](#).

La structure feuilletée des argiles détermine les propriétés physiques du minéral ([Caillère et Hénin, 1959](#)). L'organisation structurale des minéraux argileux est présente à trois niveaux : au niveau du feuillet, au niveau de la particule et au niveau de l'agrégat. Un exemple d'organisation structurale de la kaolinite est présenté sur la figure I.5.

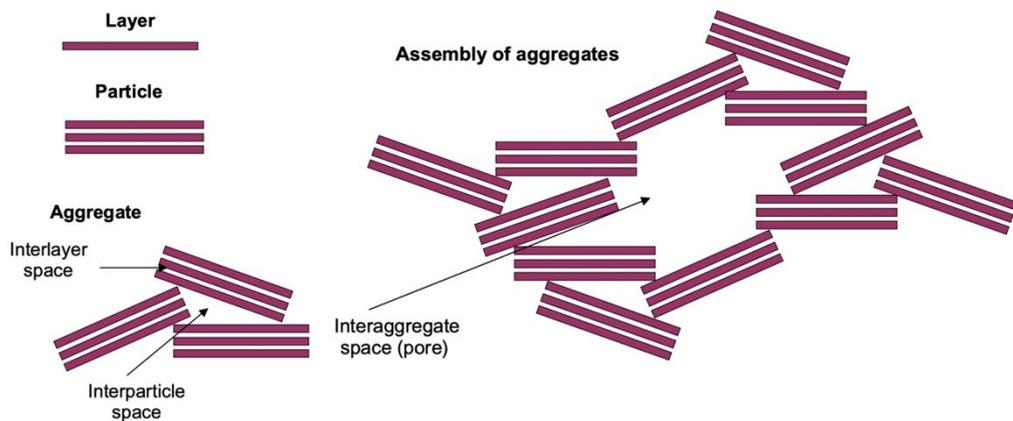


Figure I.5 : Schéma montrant l'organisation structurale de la kaolinite par [Bergaya et Lagaly \(2006\)](#) cité par [Ighil Ameur \(2016\)](#).

- Le feuillet

Le feuillet est lui-même formé de deux ou trois couches cristallisées. Les deux types de couches cristallisées existants sont les suivants :

- Couche tétraédrique *T* : les tétraèdres sont formés d'un atome de silicium Si^{4+} au centre entouré de quatre anions d'oxygène O^{2-} aux sommets (Fig. I.6 a). L'épaisseur de couche est 4,6 Å.
- Couche octaédrique (*O*) : les octaèdres sont constitués d'un ion métallique, généralement Al^{3+} ou Mg^{2+} , au centre entouré de six groupes hydroxyle OH^- (Fig. I.6 b). L'épaisseur de couche est 5,05 Å.

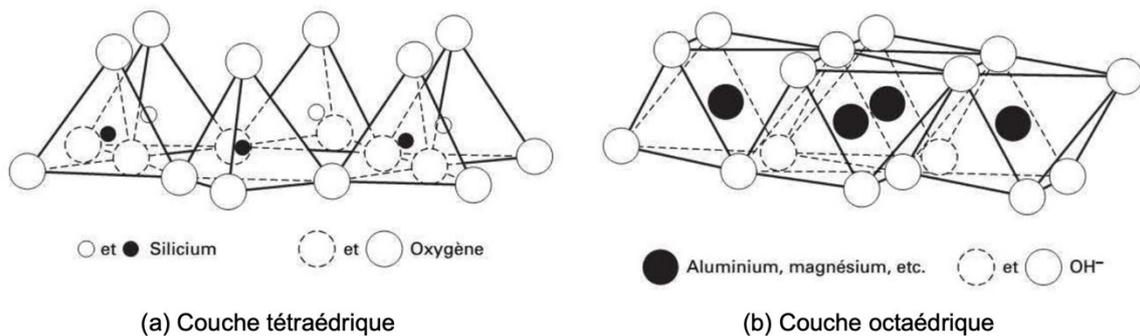


Figure I.6 : Représentation des couches cristallisées des minéraux argileux (d'après [Mitchell, 1993](#) ; cité par [Delage et Cui, 2000](#)).

Les feuillets sont des empilements de ces couches cristallisées. Suivant l'ordre des empilements de ces couches octaédriques *O* et tétraédriques *T*, nous avons différents types de minéraux argileux. Ceux-ci sont classés en deux catégories :

- Le type *T-O* (ou type 1/1) est formé d'une couche *T* et d'une couche *O* (Fig. I.7 a).

L'unité structurale est dite dissymétrique.

- Le type $T-O-T$ (ou type $2/1$) possède une couche O disposée entre deux couches T (Fig. I.7 b). L'unité structurale de base est dite symétrique.

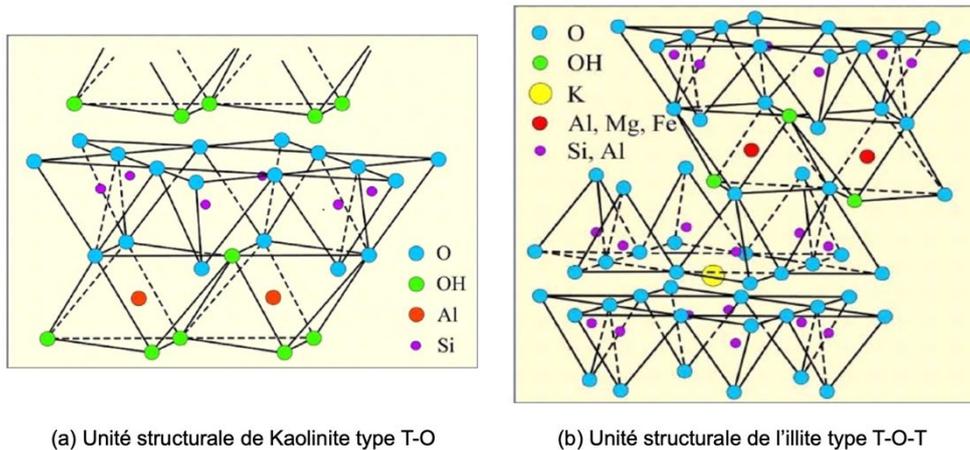


Figure I.7 : Représentation structurale de minéral argileux de type T-O et type T-O-T (Poppe et al., 2001).

- La particule

Une particule d'argile résulte de l'empilement face à face de feuillets élémentaires (5 à 10 feuillets) (Fig. I.8 a). Les forces de cohésion entre feuillets sont plus faibles que les forces d'interaction entre les couches cristallisées (couche tétraédrique et couche octaédrique). L'observation de la structure de la particule dans un plan perpendiculaire au plan des feuillets peut prendre deux états de structure : une structure ordonnée lorsque les distances interfeuillets sont constantes, et une structure désordonnée quand les distances interfeuillets sont variables (Pons, 1980). La figure I.8 (b) présente une image au MEB d'une argile de type kaolinite (type $T-O$). Les liaisons hydrogènes entre les O^- et les H^+ au niveau des interfeuillets rendent ordonné l'empilement des feuillets. L'argile avec cette structure ordonnée est donc relativement stable.

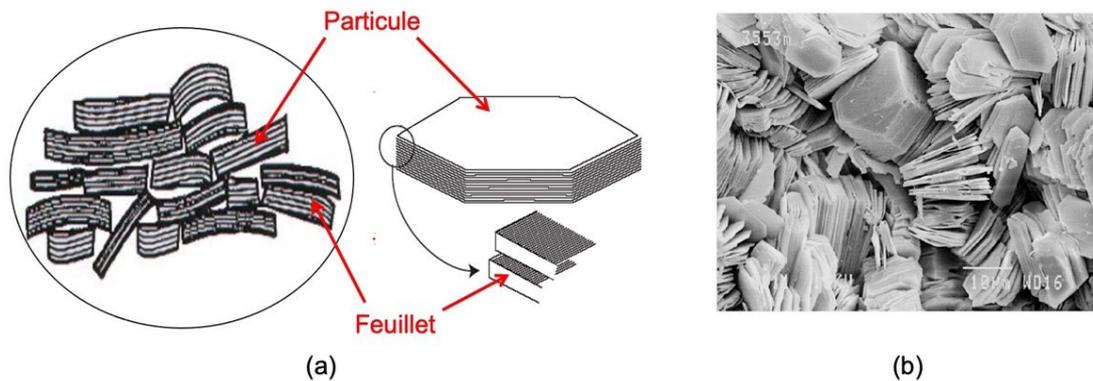


Figure 1.8 : Représentation de la structure de la particule d'argile : (a) Schéma de la particule de kaolinite (Tessier, 1984), (b) Image MEB d'une argile de type kaolinite (Comparo, 2004).

- L'agrégat

L'agrégat est un assemblage des particules. Le mode d'association des particules dans l'agrégat est géré par la force d'interaction dominante entre les particules, celle-ci peut être attractive ou répulsive. La forme et les dimensions des agrégats peuvent varier. Van Olphen (1964) et Tessier (1975) ont proposé différents modes d'association des particules formant l'agrégat. La figure 1.9 représente ces modes dans le cas de la montmorillonite (une argile plastique très gonflante).

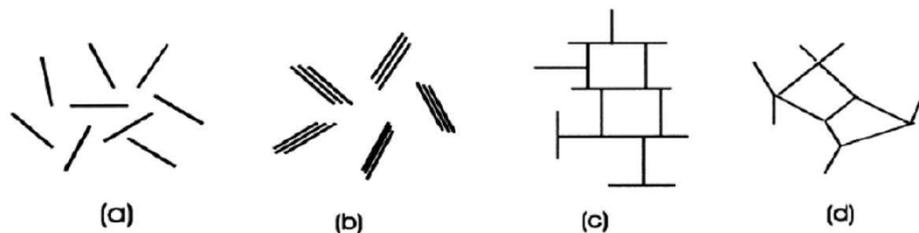


Figure 1.9 : Modes d'associations supposés des particules de montmorillonite : (a) dispersion, (b) agrégation face-face, (c) association bord-face, (d) association bord-bord (d'après Van Olphen, 1964 ; cité par Gautier, 2008).

1.2 L'eau dans les sols non saturés

L'eau joue un rôle majeur dans le comportement des sols non-saturés, en particulier dans les matériaux argileux sensibles à l'eau. Sa cohabitation avec l'air dans les pores prend des formes variées, selon les propriétés de l'eau contenue dans les pores. On peut par exemple citer les phénomènes capillaires qui se développent dans les pores au contact des deux fluides (l'eau et l'air) (Delage et Cui, 2000).

Pour les sols argileux, l'eau peut avoir des interactions physicochimiques avec les minéraux des particules d'argile. Par ailleurs, la concentration des sels dissous dans l'eau

est à l'origine de phénomènes osmotiques qui influencent la migration des molécules d'eau dans les pores de matériaux argileux.

Dans ce paragraphe, on décrit les différents états de l'eau qui peuvent se présenter dans les sols non-saturés et qui influencent fortement leur comportement.

1.2.1 Eau libre, eau adsorbée et eau inter lamellaire

Dans les sols non-saturés, il existe trois types principaux d'états d'eau : libre, adsorbée ou interlamellaire.

- Eau libre

L'eau libre se trouve principalement dans les espaces interagrégats et éventuellement dans l'espace interparticulaire (loin des surfaces externes des particules) du matériau argileux. L'effet d'un gradient de charge hydraulique permet à l'eau libre de circuler librement dans le milieu. Lorsque la teneur en eau est élevée, le sol est alors proche de la saturation. A l'état saturé l'eau libre est susceptible de s'écouler et d'obéir à la loi de Darcy (Richard, 1931). L'eau libre est souvent définie comme une l'eau gravitaire. Lorsque le sol est dans un état non-saturé ou partiellement saturé, l'eau libre est associée à la pression capillaire (ou la succion). On parle dans ce cas d'eau capillaire.

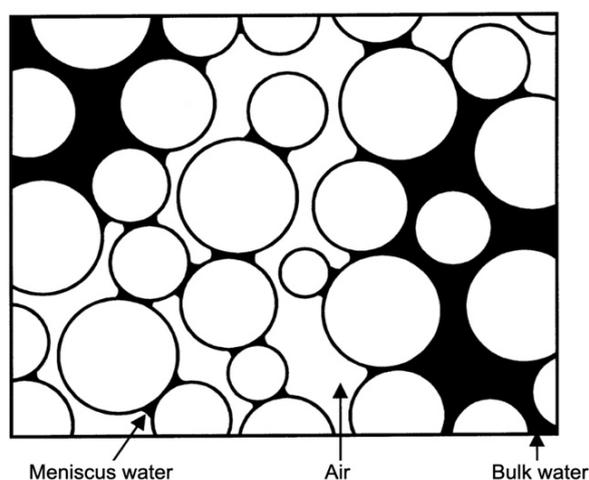


Figure I.10 : Représentation schématique d'un sol non-saturé selon Wheeler et al., (2003).

Wheeler et al. (2003) représentent un schéma idéalisé du sol non-saturé (Fig. I.10). L'eau libre est présente sous deux différents états : l'eau gravitaire (Bulk water) et l'eau capillaire (Meniscus water) qui se situe dans les pores au contact avec l'air et les particules.

- Eau adsorbée

L'eau adsorbée est présente sur la surface des particules fines de sol, sous forme d'une

couche de molécules d'eau. Cette couche peut contenir une seule épaisseur de molécules (adsorption moléculaire) ou plusieurs (adsorption multimoléculaire) (Martin, 1962 ; Fig. I.11, Van Damme, 2002). Selon la théorie des colloïdes, lorsque le diamètre d'une particule solide est inférieur à 0,2 μm , cette particule possède des propriétés colloïdales. Il en résulte que les particules colloïdales ayant tendance à adsorber des molécules polaires ou des ions venant de l'espace environnant afin d'atteindre un équilibre électrique. Cette capacité d'adsorption provoque, autour des plaquettes d'argile, la formation de couches d'eau adsorbée (Andrei, 1977 ; Bolle, 1993).

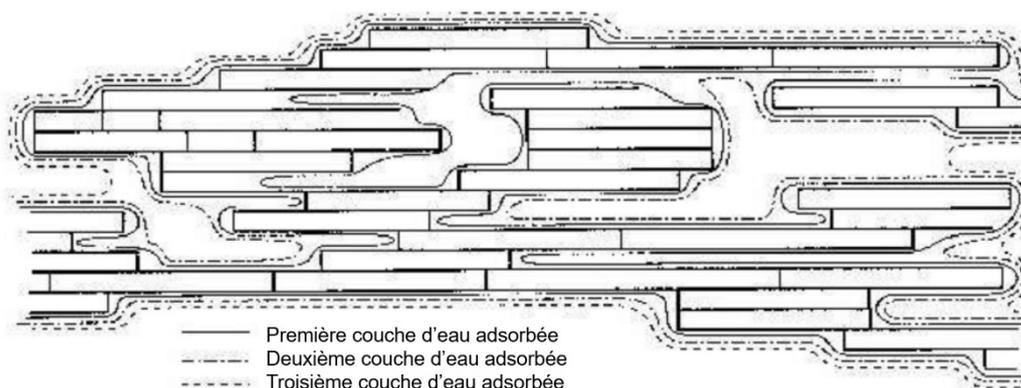


Figure I.11 : Les couche d'eau adsorbée sur la surface des particules (Van Damme, 2002).

La structure de l'eau adsorbée est bidimensionnelle et le champ des contraintes qui y règne n'est pas hydrostatique. A une température élevée (entre 90 °C et 300 °C) Prost (1990) considère que l'eau adsorbée est évaporable et peut participer au transfert hydrique.

- Eau interlamellaire

Cet état de l'eau se situe dans l'espace très confiné séparant deux feuillets parallèles à une distance inférieure au nanomètre, et présente une forte structuration due à la présence de charges électriques dans l'espace interfoliaire. L'attraction exercée par les argiles sur l'eau est engendrée par les feuillets argileux chargés négativement, ou bien par la présence de cations compensateurs. Les différents mécanismes d'interaction entre l'argile et l'eau dans l'espace interfoliaire (Low, 1961 ; Van Olphen, 1977 ; Mitchell, 1993) sont les suivants :

- Liaison hydrogène : entre les molécules d'eau et les oxygènes ou hydroxyles situés à la surface du feuillet.
- Liaison Van der Waals : du fait de la charge négative diffuse du feuillet, des liaisons Van de Waals peuvent s'établir entre l'eau et les régions où les charges négatives manifestent leur action attractive.
- Hydratation des cations échangeables : les cations dans l'espace interfoliaire deviennent des sites privilégiés sur lesquels les molécules d'eau viennent se fixer,

l'ensemble forme un polyèdre de coordination (Fripiat et Gatineau, 1984).

- Attraction par osmose : plus on se rapproche de la surface chargée négativement du feuillet, plus la concentration des cations augmente. Les molécules d'eau ont tendance à diffuser vers les surfaces argileuses pour réduire le gradient de concentration.

1.2.2 Les effets de capillarité

Le phénomène de capillarité se produit à l'interface entre deux fluides. Aux interfaces eau-air, les molécules sont soumises à un ensemble de forces d'interaction. Le phénomène de capillarité est souvent illustré par le schéma de la figure I.12 : Un tube de rayon r a une extrémité plongée dans l'eau et l'autre extrémité reliée à l'air. La remontée capillaire est présentée par le paramètre h , dans ce cas l'interface eau-air se présente sous forme de ménisque.

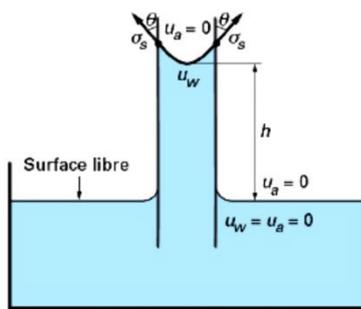


Figure I.12 : Illustration du phénomène de remontée capillaire dans un tube (Delage et Cui, 2000).

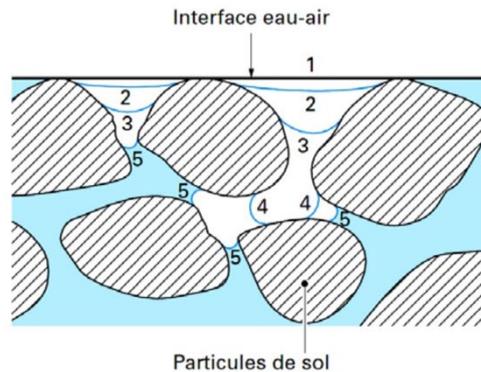


Figure I.13 : Différents stades de pénétration de l'air dans un sol granulaire (d'après Childs, 1969 ; cité par Delage et Cui, 2000).

La différence entre la pression de l'air u_a et la pression de l'eau u_w définit la pression capillaire. La relation entre la tension superficielle à l'interface eau-air et la pression capillaire est donnée par la loi de Jurin (Eq. I.1) qui est une simplification de la loi de Laplace. Cette relation est basée sur l'hypothèse selon laquelle l'interface eau-air est sphérique et les pores sont cylindriques.

La pression capillaire s'écrit en fonction du rayon r :

$$u_a - u_w = \frac{2\sigma_s \cos \theta}{r} \quad \text{Eq. I. 1}$$

Avec :

θ : angle de contact entre le ménisque et le solide

σ_s : tension superficielle d'interface eau-air (à 20 °C, $\sigma_s = 72,8 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$)

r : rayon de courbure du ménisque (rayon capillaire)

u_a : pression de l'air

u_w : pression de l'eau.

Le schéma de la figure I.13 illustre un sol granulaire non-saturé contenant de l'eau, de l'air et des solides. Dans ce milieu, l'état de capillarité se présente avec une eau discontinue formant des ménisques capillaires entre les grains. Les ménisques sont localisés au niveau des plus petits pores (aux contacts intergranulaires) : plus le sol se désature, plus les ménisques deviennent petits (Fredlund et Rahardjo, 1993). Selon l'équation de la loi de Jurin, la pression capillaire au sein du milieu non saturé est inversement proportionnelle au rayon de courbure de ce ménisque (Sparks, 2003). C'est pourquoi l'effet de capillarité augmente lorsqu'on tend vers un état plus sec.

1.3 La notion de succion

1.3.1 Définition et propriétés

La succion est une mesure de l'affinité entre le sol et l'eau (Delage et al., 2001). En 1965, une définition de la succion est donnée dans un contexte thermodynamique dans le domaine de la géotechnique (Aitchison et al., 1965). Similaire au potentiel électrique d'une charge dans un champ électrique, l'énergie est nécessaire pour amener de l'eau libre (Mitchell, 1976). Le potentiel d'eau est défini comme la quantité de travail qu'il faut fournir pour amener une quantité infinitésimale d'eau de l'état d'eau pure (loin du sol) à celui d'eau interstitielle dans le sol non saturé (Delage et Cui, 2000).

Ce potentiel d'eau noté ψ peut se décomposer en quatre termes présentés en équation (Eq. I.2) (Aitchison et al., 1965 ; Alonso et al., 1987).

$$\psi = \psi_p + \psi_g + \psi_m + \psi_o \quad \text{Eq. I.2}$$

Avec :

ψ_p : potentiel de pression externe

ψ_g : potentiel gravitaire

ψ_m : potentiel matriciel

ψ_o : potentiel osmotique.

Le potentiel de pression externe et le potentiel gravitaire existent dans les sols saturés. En revanche, le potentiel matriciel et le potentiel osmotique sont particuliers aux sols non saturés. La succion matricielle notée s_m et la succion osmotique notée s_o sont définies à partir des potentiels matriciel et osmotique. La succion totale est la somme de ces deux types de succions. (Krahn et Fredlund, 1972 ; Fredlund et Rahardjo, 1993).

- Succion matricielle s_m

La succion matricielle correspond au potentiel capillaire et d'adsorption (Delage et Cui, 2000). Dans un sol granulaire, l'adsorption est souvent négligée, la succion matricielle équivaut alors à la pression capillaire lorsque les contraintes mécaniques extérieures sont nulles. On a la relation suivante (Eq. I. 3) de la pression matricielle :

$$s_m = u_c = u_a - u_w \quad \text{Eq. I. 3}$$

- Succion osmotique s_o

La succion osmotique est le résultant d'une différence de pression osmotique. Elle est due à la présence de sel dans les sols et aux réactions électro-physico-chimiques de l'eau et des minéraux avec les particules très fines. Lorsque les concentrations en soluté sont faibles, la succion osmotique peut être calculée par l'équation de Van't Hoff (Mitchell, 1962) :

$$s_o = -RT \sum C_i \quad \text{Eq. I. 4}$$

Avec :

R : constante des gaz parfaits ($R = 8,31432 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T : température absolue (K)

C_i : concentration en soluté ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$)

Dans le cas des matériaux granulaires, la succion osmotique est supposée négligeable par rapport à la succion matricielle, la succion totale est alors équivalente à la succion matricielle :

$$s = s_m = u_a - u_w \quad \text{Eq. I. 5}$$

En général, la succion est décrite comme une pression d'eau négative, elle est exprimée en pascal.

1.3.2 Méthodes de contrôle et de mesure de la succion dans les sols

La succion peut varier dans une gamme très large allant de 0 à plusieurs centaines de MPa. Cela nécessite des techniques expérimentales différentes adaptées à la gamme de succion. Ces techniques permettent de déterminer la courbe de rétention d'eau du sol ; la méthodologie est détaillée dans les articles de Fleureau et al. (1993) et Delage et Cui (2000).

Le tableau I.1 montre la gamme accessible au contrôle de la succion et à sa mesure, ainsi que la technique utilisée.

Tableau I. 1 : Technique de mesure ou d'imposition de la succion

Technique	Référence (Première réalisation)	Gamme de succion appliquée (MPa)	Remarque
Papier filtre	Gardner (1937)	0-300	Méthode la plus simple
Plaque Tensiométrique	Richards et Gardner (1936)	0,001-0,01	Qualité de contact entre pierre poreuse et sol
Surpression d'air	Richards (1931)	0-1,5	
Psychromètre	Spanner (1951)	0-8,5	Sensible à la variation de la température
Osmotique	Zur (1966)	0,15-10	
Solution saline	Esteban (1990)	1,5-1000	

Je présente ci-dessous quelques techniques trouvées dans la littérature.

- *Plaque tensiométrique : $0,1 \text{ kPa} < s < 10 \text{ kPa}$*

[Delage et Cui \(2000\)](#), [Fleureau et Kheirbek-Saoud \(2001\)](#) décrivent la plaque tensiométrique comme une méthode adaptée aux faibles valeurs de la succion, généralement inférieures à 10 kPa.

On sait que la succion du sol s est égale la différence entre la pression d'air u_a et la pression d'eau u_w . Lorsque la pression d'air u_a est égale à la pression atmosphérique prise comme référence, alors la succion est donnée par la relation suivante :

$$s = -u_w \quad \text{avec } u_w < 0 \quad \text{Eq.I. 6}$$

Le principe de cette technique est de mesurer ou d'appliquer une pression négative dans le sol par une hauteur de colonne d'eau. [Richards et Gardner \(1936\)](#) ont utilisé la méthode du tensiomètre pour mesurer la pression négative du sol in-situ. Le principe de mesure est illustré par le schéma de la figure I.14 (a). L'échantillon de sol, à cause de sa succion s , absorbe de l'eau dans une pierre poreuse. Cette absorption cause une baisse de la pression d'eau dans le réservoir qui peut être mesurée à l'aide d'un manomètre.

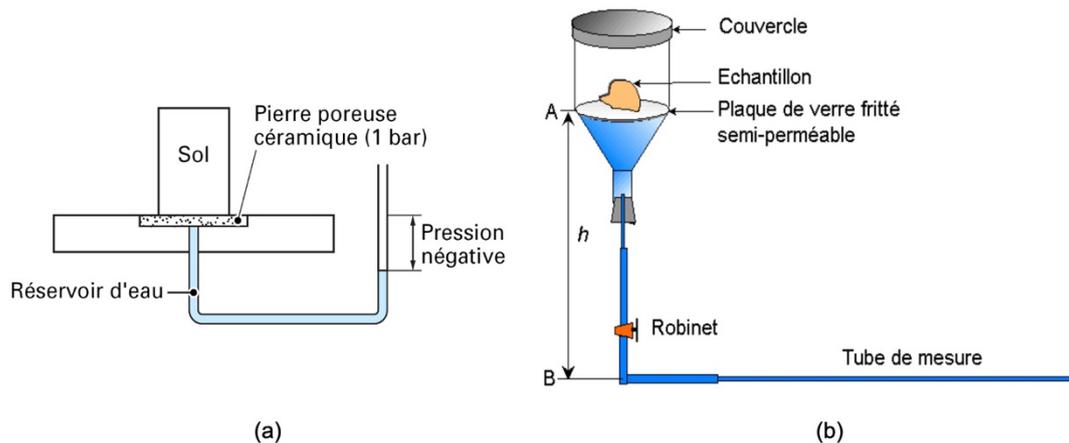


Figure I.14 : Illustration de la méthode de plaque tensiométrique : (a) Principe de mesure de la succion par tensiométrie (Delage et Cui, 2000), (b) Dispositif expérimental de la plaque tensiométrique (illustration de Wei, 2014).

La figure I.14 (b) représente le dispositif expérimental de la technique de plaque tensiométrique pour imposer une succion dans l'échantillon posé sur la plaque de verre fritté.

Une pression capillaire, succion s est imposée en fixant la hauteur h comprise entre l'échantillon, posé sur la plaque, et le niveau de référence du tube de mesure. L'équilibre de l'eau est assuré par les ménisques qui se créent à l'intérieur de l'échantillon et aussi à la surface du contact entre l'échantillon et le filtre en verre fritté.

- Osmotique : $0,15 \text{ MPa} < s < 10 \text{ MPa}$

La méthode osmotique est basée sur l'utilisation d'une membrane semi-perméable et d'une solution aqueuse de molécules organiques de polyéthylène glycol (PEG). Zur (1966) a introduit cette méthode dans le domaine de géo-matériaux, le principe étant de mettre en contact une éprouvette de sol et une solution de PEG en insérant entre les deux une membrane semi-perméable (Zur, 1966). Celle-ci empêche le passage des macromolécules de la solution vers l'éprouvette mais permet les échanges d'eau. La figure I.15 représente le schéma de principe et photo du dispositif expérimental de cette méthode.

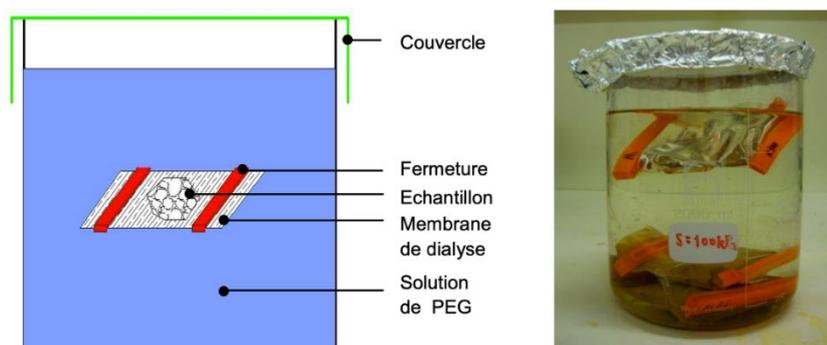


Figure I.15 : Schéma et photos du dispositif expérimental osmotique (par Li, 2015).

Ainsi, le passage de l'eau à travers la membrane semi-perméable (imperméable aux solutés) s'arrête lorsque la concentration en macromolécules est la même des deux côtés de la membrane. Les mouvements d'eau, et donc la succion, sont contrôlés par osmose. La relation entre la concentration en macromolécules et la succion imposée a été caractérisée par différents auteurs (Williams et Shaykewich, 1969 ; Cui, 1993 ; Delage et al., 1998 ; Cuisinier et Masrouji 2001 ; Delage et Cui, 2008) : plus la concentration est élevée, plus la succion imposée est forte. La figure I.16 montre une courbe d'étalonnage (concentration-succion) de la solution de PEG 20000 de Williams et Shaykewich (1969) cité par Vicol (1990).

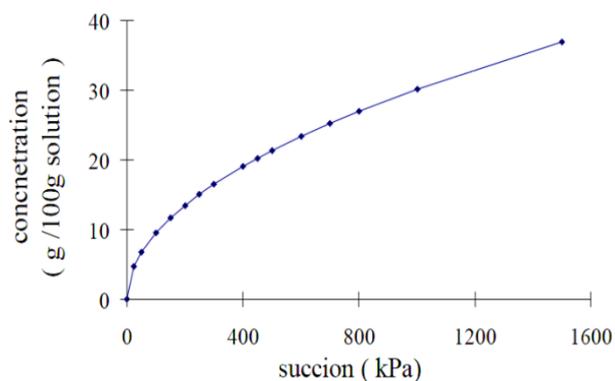


Figure I.16 : Courbe de calibration de la concentration de la solution PEG 20000 en fonction de la succion à 25°C (d'après Williams et Shaykewich, 1969 ; cité par Vicol, 1990).

- Technique d'équilibre de vapeur (VET : Vapour Equilibrium Technique) : $s > 1,5$ MPa

La technique d'équilibre de vapeur (VET) est employée pour imposer des valeurs de succion plus élevées que les deux techniques présentées précédemment. La succion imposée peut aller jusqu'à 1000 MPa. Cette technique permet d'imposer une humidité relative à une éprouvette de sol au moyen d'une solution saline saturée. Dans une atmosphère confinée, lorsqu'une solution saline saturée est en équilibre, l'humidité relative dans cette l'atmosphère reste constante pour une valeur de température donnée. La succion imposée indirectement peut alors être calculée par le Loi de Kelvin.

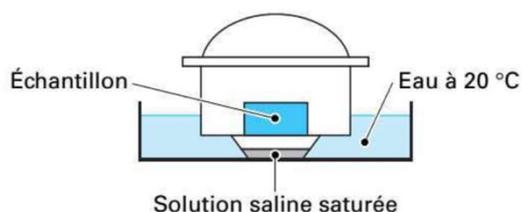


Figure I.17 : Schéma de principe de la technique d'équilibre de vapeur par Delage et Cui (2000).

L'échantillon de sol est placé dans un dessiccateur, à humidité et température contrôlées,

moyennant une solution saline saturée (Fig. I.17). Les transferts d'eau s'effectuent sous forme de vapeur entre l'échantillon et l'atmosphère du dessiccateur jusqu'à l'équilibre, la succion du sol est liée à l'humidité relative de la solution (Loi de Kelvin). Chaque type de solution saline saturée correspond à une succion imposée en fonction de ses propriétés physico-chimiques. [Delage et Cui \(2000\)](#) ont évalué la méthode de solution saline pour contrôler la succion. Les humidités relatives et succions obtenues par différents sels sont indiquées dans le tableau I.2.

Tableau I.2 : Relation humidité relative - succion ([Delage et Cui, 2000](#)).

Sel	Succion (MPa)	Humidité relative (%)
K ₂ SO ₄	4,2	97
ZnSO ₄ 7H ₂ O	12,6	91.3
(NH ₄) ₂ SO ₄	29	81
NaCl	37,8	76
NaNO ₂	57,3	66
Mg(NO ₃) ₂	82,4	55
K ₂ CO ₃	137,8	44
KCH ₃ CO ₂	182,1	20
KOH	331,9	9

Le processus d'équilibre d'eau en phase vapeur est lent. Il dépend de la taille de l'échantillon et du sel utilisé ([Delage et Cui, 2000](#)). Avec le KOH par exemple, on peut atteindre une succion élevée. Le processus peut durer jusqu'à une dizaine de jours avec des échantillons argileux peu perméables. Il existe des moyens pour améliorer cette méthode expérimentale et accélérer le processus de la VET, par exemple l'installation d'un système de circulation de l'air humide ([Bernier et al., 1997](#) ; [Cui et al., 2002](#) ; [Lloret et al., 2003](#)). Cette modification a permis à [Marcial et al. \(2002\)](#) de réduire considérablement la durée des essais.

La température influe non seulement sur les propriétés physiques et chimiques des solutions salines, mais intervient aussi directement dans la Loi de Kelvin ([Delage et al., 1996](#) ; [Wahib, 2013](#) ; [Ighil Ameur, 2016](#)). C'est pourquoi la mesure ou le contrôle de température est nécessaire.

- Gravimétrie d'adsorption de vapeur d'eau (DVS : Dynamic Vapour Sorption) : $s > 7 \text{ MPa}$

Dans la méthode VET, l'humidité relative est contrôlée par différentes solutions salines saturées. L'un des inconvénients de cette méthode réside dans le fait qu'il est difficile d'appliquer différentes valeurs d'humidités relatives de façon continue, ou cyclique, dans le même échantillon. La DVS est une technique gravimétrique qui mesure la vitesse et la quantité de solvant (l'eau) absorbée par l'échantillon. Pour ce faire, elle modifie la concentration de vapeur (l'humidité relative) autour de l'échantillon et mesure le changement de masse qu'il produit.

Avec l'appareil DVS (Fig. I.18), l'humidité relative dans la chambre où est placé l'échantillon peut être contrôlée automatiquement et assez précisément. Les courbes d'évolution de masse d'échantillon et de changement d'humidité relative peuvent être tracées (Wei, 2014, Fig. I.19).

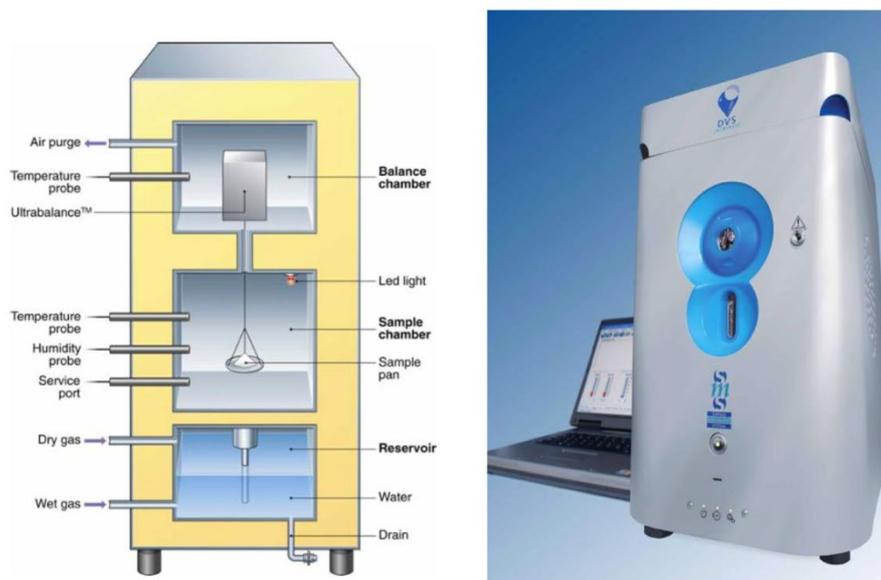


Figure I.18 : Schéma et photos de l'appareil DVS Intrinsic (DVS Intrinsic Brochure, Surface Measurement Systems).

Wei (2014) a utilisé le DVS pour imposer différentes succions dans la gamme ($0,1 \text{ kPa} < s < 700 \text{ MPa}$) sur des mélanges argileux. Différentes humidités relatives sont imposées à l'échantillon posé sur une microbalance numérique très sensible et précise. Les chemins de séchage et d'humidification sont appliqués (Fig. I.19).

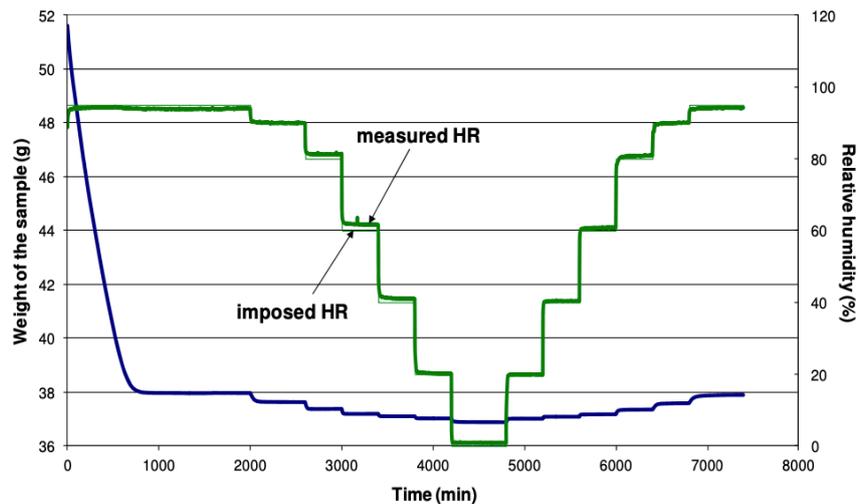


Figure I.19 : Évolution de masse mesurée par l'appareil DVS, ainsi que les humidités relatives imposées et mesurées (Kaolinite P300 - Wei, 2014).

2 Comportement des sols argileux partiellement saturés et sous sollicitations hydriques

2.1 Phénomène du retrait

Le retrait est une diminution du volume du sol due à l'évaporation de l'eau présente dans ses pores (Terzaghi et al., 1996). Corte et Higashi (1960) ont souligné que la fissure de dessiccation peut se produire si le retrait du sol est contrarié et que la contrainte de traction qui en découle dépasse la résistance maximale à la traction du sol. En raison du développement de ces fissures de retrait, le séchage peut affecter les propriétés du sol telles que la résistance, la perméabilité, la compressibilité, etc. Ces modifications des propriétés du sol peuvent compromettre la durabilité des structures géotechniques comme mentionné dans différentes littératures (Nahlawi et al., 2004 ; Dyer, 2005 ; Morris et al. 1992 ; Tang et al., 2011 ; Wang et al., 2017). Au cours des dernières décennies, les scientifiques accordent une attention particulière à l'étude du phénomène du retrait des sols (Tempany, 1917 ; Haines, 1923 ; Stirk, 1954 ; Fleureau et al., 1993 ; Péron et al., 2006-2009 ; Tang et al., 2011).

- Courbe de retrait – description du phénomène

Dans les sols, la perte d'eau dans les pores peut entraîner une diminution du volume. Stirk (1954) souligne que le déroulement du retrait d'un sol naturel peut être décrit en quatre phases, en fonction de la diminution de l'indice des vides : 1) retrait structural, 2) retrait normal, 3) retrait résiduel et 4) retrait zéro. Ces différentes phases sont représentées sur

la courbe dite de retrait (teneur en eau w – indice des vides e) dans la figure I.20.

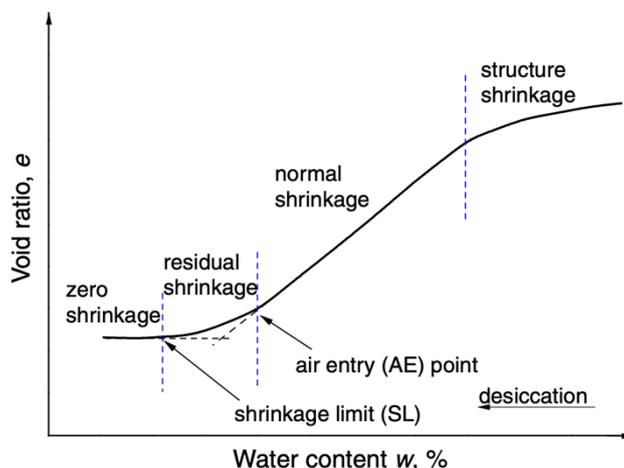


Figure I.20 : Caractéristiques de la courbe de retrait d'un sol naturel d'après [Stirk \(1954\)](#) cité par [Tang et al. \(2011\)](#).

La phase de retrait normal correspond à une diminution du volume du sol, ce qui correspond au volume d'eau perdu. Dans cette phase, le sol est toujours saturé et l'air n'est pas encore entré dans les pores. Une fois le point d'entrée d'air atteint, l'air commence à entrer dans les pores, et occupe de plus en plus les vides du sol. Ainsi, le retrait normal va progressivement s'arrêter. A partir de ce point, la phase du retrait résiduel commence. Lorsque la teneur en eau continue sa diminution, la diminution du volume de sol est plus faible que le volume d'eau perdue, jusqu'à atteindre une variation de volume très faible (nulle), qui est proche de la phase de retrait zéro. Cette dernière phase de retrait zéro commence à la limite de retrait. Au cours de cette dernière phase, le volume du sol ne varie plus, mais l'eau continue de s'évaporer.

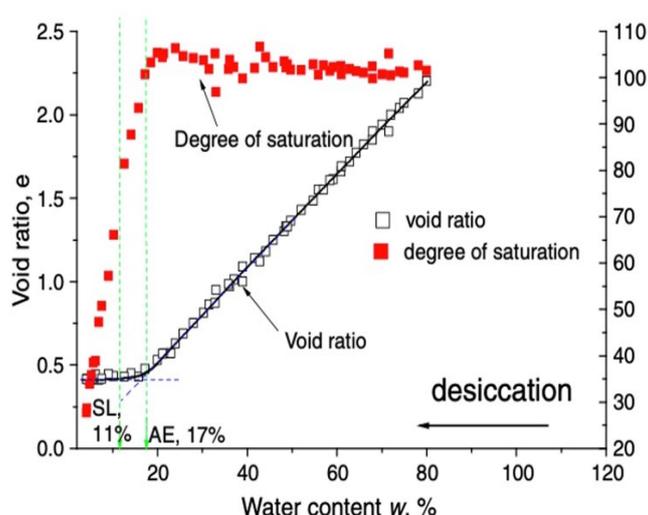


Figure I.21 : Courbe de retrait obtenue par [Tang et al. \(2011\)](#) sur l'argile de Romainville.

Un exemple de courbe de retrait est donné par [Tang et al. \(2011\)](#) présenté dans la figure I.21. L'étude du phénomène de retrait et de fissuration pendant le séchage est réalisée sur

l'argile de Romainville dont l'état initial est une boue homogène.

L'évolution du degré de saturation au cours de la dessiccation et la courbe du retrait sont présentées simultanément dans cette figure. Les trois étapes du retrait sont séparées par deux points de transition, qui sont le point d'entrée d'air ($AE = 17\%$) et la limite de retrait ($SL = 11\%$). On peut observer que durant le retrait normal le sol est saturé, puis lorsqu'il atteint le point d'entrée d'air (qui indique le début de la désaturation) du retrait résiduel est initié. La limite de retrait correspond à un degré de saturation en décroissance, le retrait dans cette phase est achevé.

La limite du retrait (w_{SL}) d'un sol est une des propriétés de classification en mécanique des sols (voir ASTM D427 2004). Dans la norme française XP P94-060-2, la limite de retrait sur la courbe de retrait correspond à la teneur en eau à l'intersection de deux parties de la courbe, l'une issue du retrait normal, l'autre du retrait zéro.

De nombreux chercheurs ont développé différentes lois empiriques pour estimer la courbe de retrait (Holtz et al., 1981 ; Braudeau et al., 1988 ; Fredlund et al., 2002 ; Leong et al., 2015). Parmi ces formules, l'équation proposée par Fredlund et al. (2002) est largement utilisée (Eq. I.7). Elle fait intervenir trois paramètres.

$$e = a_0 \left[\left(\frac{w}{b_0} \right)^{c_0} + 1 \right]^{1/c_0} \quad \text{Eq. I.7}$$

$$b_0 = \frac{S_{r0} \cdot a_0}{G_s} \quad \text{Eq. I.8}$$

Avec :

a_0 : l'indice des vides minimum ;

b_0 : déterminé en fonction de la ligne de saturation ($e = G_s w$) (Fig. I.22) ;

c_0 : courbure de la courbe ;

S_{r0} : degré de saturation initial.

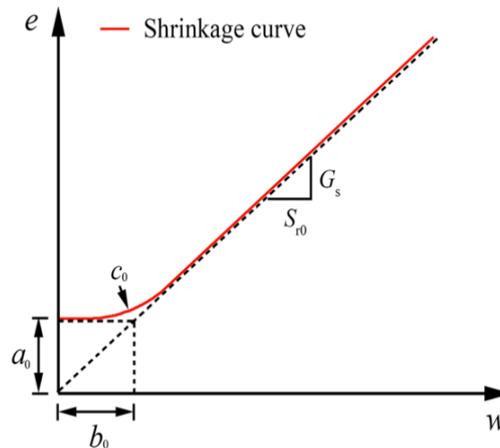


Figure I.22 : Courbe de retrait typique d'après Fredlund et al. (2002) ; cité par Gao (2018).

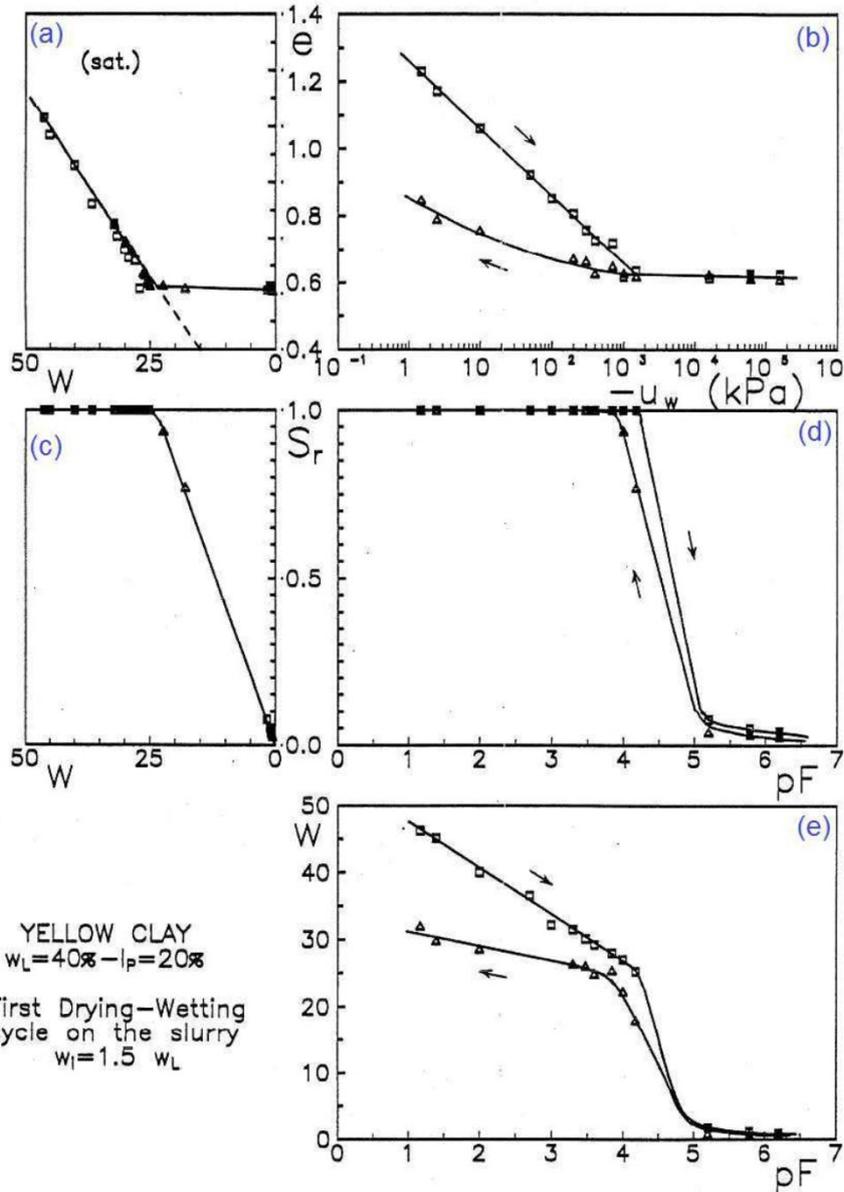


Figure I.24 : Courbe de rétention d'eau – premier cycle de dessiccation-humidification sur l'argile jaune (*Kaolinite P300*) initialement sous forme de boue ($w = 1.5w_L$) par Indarto (1991) cité par Taibi (1994).

3 Fissuration des argiles sous sollicitations hydriques

3.1 Phénomène de fissuration due à la dessiccation

La fissuration des sols argileux au cours du séchage intervient généralement lorsque la contrainte de traction développée dans le sol, due à la succion, dépasse sa résistance à la traction (Kodikara et al., 2000). Les contraintes de traction se développent lorsque le retrait du sol est contrarié. Ce phénomène peut être causé par des facteurs internes, une hétérogénéité de la teneur en eau, de la densité etc., ou des facteurs externes tels que des interfaces rugueuses en contact avec le sol au moment du séchage. Hahn (1970) a

évoqué deux types de rupture pouvant être liés au séchage, les ruptures causées par des contraintes de traction (la direction de la rupture est perpendiculaire à la contrainte principale maximale), et les ruptures dues à des contraintes de cisaillement.

Du point de vue morphologique, les modes de fissuration observés peuvent être classés en deux catégories : les modes orthogonaux et les modes non-orthogonaux. Dans le mode orthogonal les fissures tendent à former des angles droits. La figure I.25 représente un exemple de modèle de fissuration typique de fissures avec des intersections principalement orthogonales. Les flèches indiquent les directions dans lesquelles les fissures se sont développées.

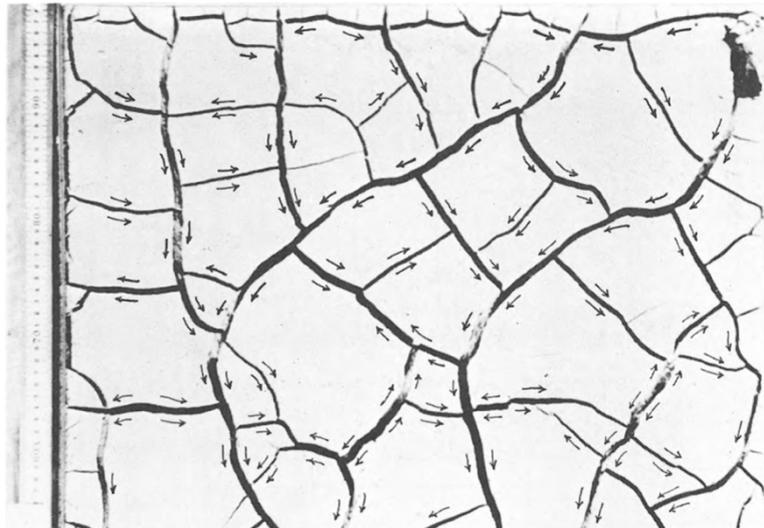


Figure I.25 : La forme des fissures dans un sol rectangulaire en fin de séchage, l'échantillon est de dimensions 60 x 84 cm² et d'épaisseur 23,2 mm (Corte et Higashi, 1960).

Dans le mode non-orthogonal, les fissures ont tendance à se rencontrer avec un angle de 120° (fissurations en formes hexagonales). Dans la plupart des cas, les fissures se propagent de manière séquentielle. Au début du séchage, des fissures primaires apparaissent et divisent la surface du sol en différents blocs. Ensuite le séchage continue et les fissures secondaires ou tertiaires se développent successivement et les grands blocs du sol se divisent encore et ainsi de suite. Théoriquement, ce processus de fissuration en fissures secondaires et tertiaires peut être considéré comme une bifurcation des fissures primaires (Bažant et Cedolin, 1991 ; Kodikara et al., 1999). Dans un sol homogène, des fissures (primaires) se développent dans la direction perpendiculaire à la contrainte principale maximale. Toutes les fissures suivantes (secondaires) ont tendance à se propager perpendiculairement aux fissures existantes. Les fissures ne se connectent pas perpendiculairement en raison de la distribution de contrainte locale et obéissent à des modèles de types hexagonaux.

La figure I.26, qui est une illustration de [Bažant et Cedolin \(1991\)](#), présente des modèles plausibles de fissuration sous dessiccation dans un milieu idéalisé. Le modèle en fissures parallèles peut être considéré comme un modèle 2D, les autres modèles sont essentiellement en 3D.

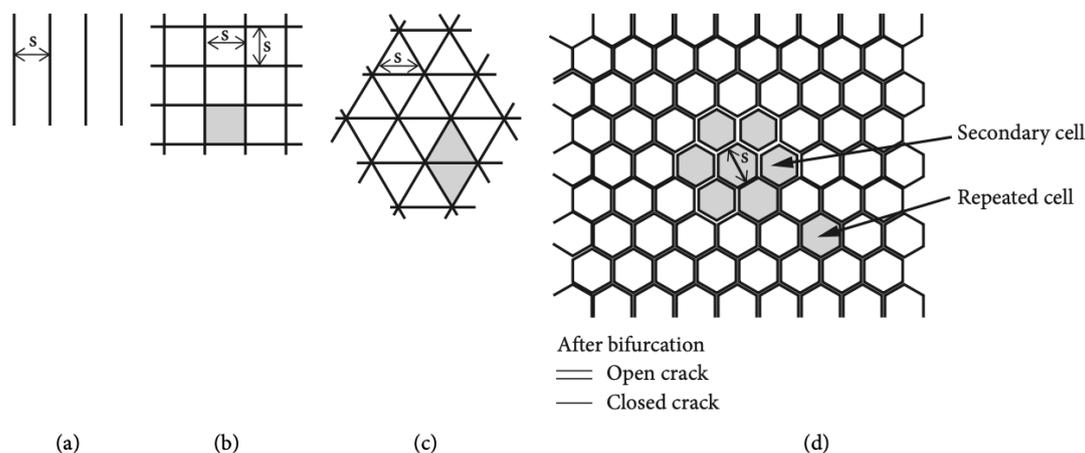


Figure I.26 : Modèles théoriquement plausibles de fissures de dessiccation dans des milieux idéalisés d'après [Bažant et Cedolin \(1991\)](#).

3.1.1 Observations in-situ

En géotechnique, au début du XIXe siècle, [Longwell \(1928\)](#) a effectué des études sur la fissuration de dessiccation de la boue argileuse, causée par l'évaporation d'eau et qui présentent différentes géométries (Fig. I.27 b). [Willden et Mabey \(1961\)](#) décrit en détail des fissures géantes formant une forme polygonale et se développent dans le sens de longueur et de la profondeur. [Morris et al. \(1992\)](#) ont mené des travaux approfondis sur la distribution et la morphologie des fissures dans les régions à climat sec du Canada et de l'Australie. Ces travaux montrent que la fissuration des sols sous dessiccation est contrôlée par la succion et par des propriétés du sol telles que la résistance à la traction, la contrainte de cisaillement, etc. La figure I.27 présente quelques formes de fissuration dans différentes régions du globe.



Figure I.27 : Exemples des observations de la fissuration in-situ :
 (a) La fissuration dans les résidus miniers de charbon, New Hope Colliery, Australie (Morris et al., 1992) ;
 (b) Fissuration hexagonale sur une surface de playa composée de sédiments uniformes, Nevada, États-unien (Longwell, 1928) ;
 (c) Différentes échelles de fissuration observée à Xi'an, Chine (Wei, 2020).

3.1.2 Observations en laboratoire

Différents systèmes expérimentaux ont été conçus et réalisés au laboratoire permettant de suivre l'initiation et le développement de la fissuration dans un échantillon de sol au cours de son séchage.

Corte et Higashi (1960) ont utilisé la boue d'un sol saturé de différentes épaisseurs de dimensions 85x60 cm². Le séchage a provoqué des fissures dont la forme n'est pas seulement liée à la température ou à l'humidité relative mais également dépend aussi de l'épaisseur de l'échantillon. Divers matériaux ont été utilisés comme support à l'échantillon afin d'avoir différentes caractéristiques d'adhérence (frottement) à l'interface sol-support. Les matériaux utilisés comprenaient du bois, du bois graissé et du papier de verre. Ils montrent que la rugosité du support peut impacter le développement des fissures.

Lau (1987) a effectué une série d'essais de fissuration au laboratoire de *University of Saskatchewan Canada*. L'objectif de ces essais de fissuration était d'étudier les effets du

type de sol, de la teneur en eau initial, de l'épaisseur d'échantillon et de l'état des parois latérales de récipient, sur la fissuration du sol. Deux types de sols ont été utilisés à cet effet. Au début de séchage, la teneur en eau initiale des sols est proche de la limite de liquidité, la succion a été mesurée au cours d'essai par les tensiomètres. La déformation verticale de retrait a été également mesurée. Des photos de l'échantillon ont été prises pendant les essais pour suivre le développement de la fissuration (Fig. I.28).

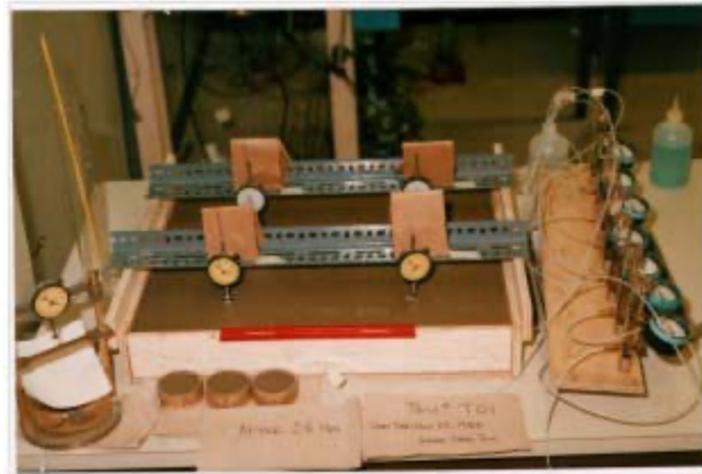


Figure I.28 : Dispositif expérimental pour l'essai de fissuration par [Lau, \(1987\)](#).

[Péron et al. \(2009\)](#) ont mené des recherches de dessiccation sur des sols cohésifs. Une attention particulière a été portée au phénomène de retrait et au développement des fissures. Les auteurs ont réalisé des essais de dessiccation libre et des essais de dessiccation contrainte. Le sol étudié est un sol argileux remanié (*Bioley silty clay*) provenant de Lausanne, Suisse. Les échantillons sont fabriqués à partir d'une boue d'argile qui n'est pas compactée. La teneur en eau initiale est de 48 %, environ soit 1,5 fois la limite de liquidité. Tous les essais de dessiccation sont effectués à une température moyenne de 20 °C et une humidité relative de 40 %. Les essais ont été réalisés sur des échantillons en forme de barre longue, et des échantillons en forme de dalle carré.

Pour les essais de dessiccation libre, les barres d'argile reposent sur un support en Téflon traité avec une graisse hydrophobe afin d'éviter les contraintes mécaniques dues à l'effet de frottement entre l'échantillon et le support pendant le retrait de dessiccation (Fig. I.29 a).

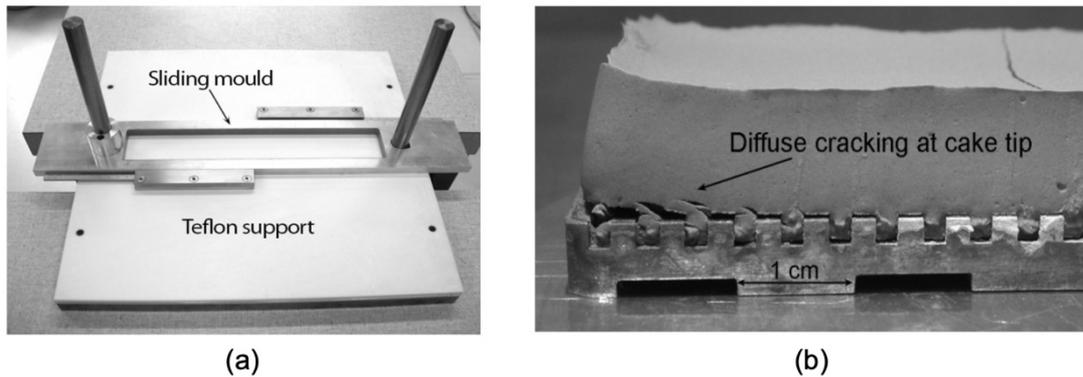


Figure I.29 : L'utilisation de différents supports d'échantillon permet de contrôler les conditions aux limites au niveau du contact entre l'échantillon et le support (Péron, 2008) :

- (a) Moule d'échantillon et support en Téflon traité avec graisse ;
- (b) Support en métal avec des encoches parallèles espacées de 2mm pour générer une forte contrainte axiale.

Pour les essais de dessiccation contrainte, ces barres d'argile reposent sur un support en métal, avec des encoches parallèles espacées de 2mm, comme présenté sur la figure I.29 (b). Ce support spécial génère une forte contrainte axiale et évite les déplacements entre le support et l'échantillon pendant le retrait de dessiccation.

Au cours des essais, le retrait, la fissuration de dessiccation, la teneur en eau, le degré de saturation et la succion sont mesurés.

Dans ce cas-là de retrait contrarié, au début de dessiccation l'échantillon est en état du retrait par séchage, aucune fissure est observée. Après 17 h de séchage, 6 à 8 fissures se produisent dans le sens parallèle aux encoches (Fig. I.30). Ici, la déformation axiale due au retrait pendant le séchage est limitée par les encoches parallèles. L'échantillon subit des déformations en extension qui peuvent atteindre, en traction, le critère de rupture quand la teneur en eau est égale à 24 %. La première fissure apparaît alors que l'échantillon est toujours saturé Péron (2008).

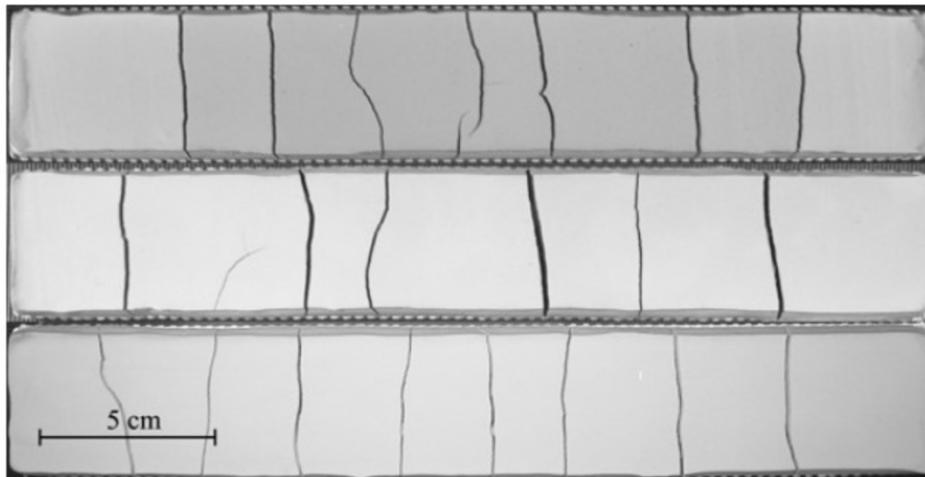


Figure I.30 : Fissures observées par Péron (2008).

Les essais de Péron et al. (2009b) sur des échantillons d'argile en forme de dalle carrée, ont été réalisés avec deux épaisseurs différentes. Les échantillons reposent sur un support qui peut provoquer une contrainte biaxiale à cause de l'adhérence entre le support et l'argile initialement saturée.

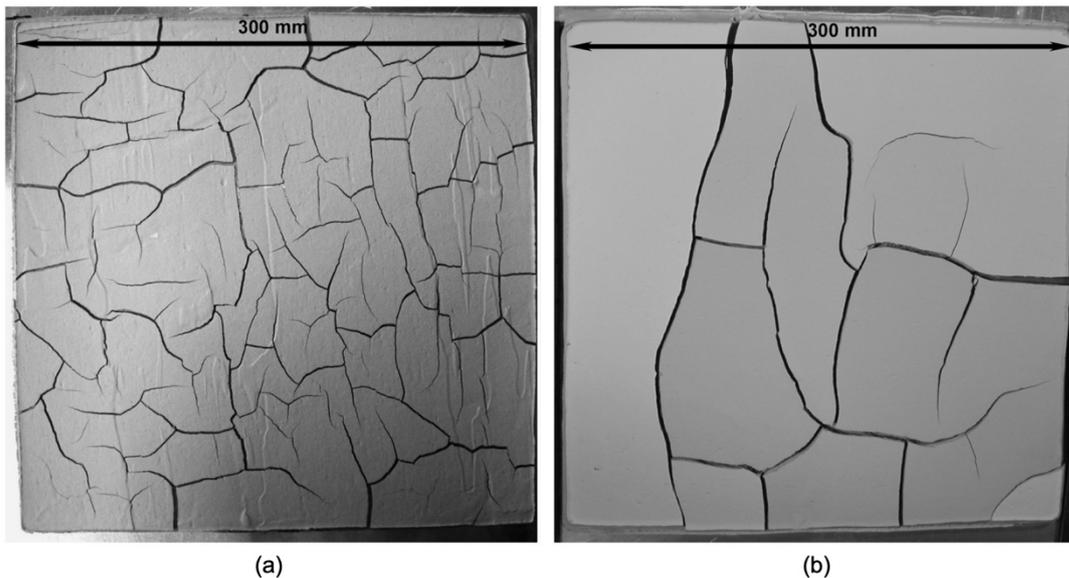


Figure I.31 : Fissurations observées dans les échantillons avec différentes épaisseurs :
 (a) Échantillon de 4 mm d'épaisseur ;
 (b) Échantillon de 12 mm d'épaisseur (Péron et al. 2009a).

Des photos de la surface supérieure de l'échantillon sont enregistrées au cours des essais et les informations géométriques de la fissuration ont été systématiquement mesurées. Tous les échantillons ont été fissurés à la fin du séchage, et des réseaux 2D de fissures se sont formés. Les résultats sur deux échantillons avec différentes épaisseurs sont présentés sur la figure I.31, et montrent différentes formes du réseau.

L'application du traitement d'images a apporté une avancée considérable dans la compréhension du phénomène. [Tang et al. \(2010, 2011\)](#) ont étudié les caractéristiques morphologiques de la fissuration liées au retrait et au comportement du sol en faisant varier la température. L'argile de Romainville a été utilisée dans ces études expérimentales. Les échantillons sont fabriqués à partir de la boue d'argile saturée avec une teneur en eau d'environ 170%. Une caméra a été fixée au-dessus d'échantillon pour enregistrer le développement de la fissuration, le schéma de principe est présenté sur la figure I.32.

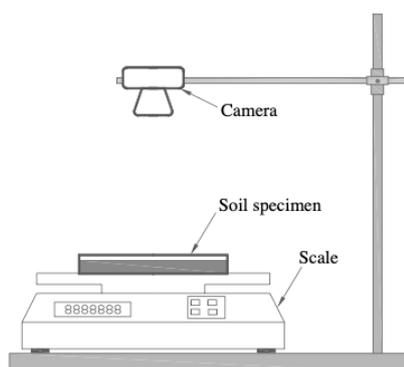


Figure I.32 : Schéma de dispositif expérimental pour surveiller le développement de la fissuration ([Tang et al., 2010](#)).

Un exemple de traitement d'une image numérique est illustré à la figure I.33. Tout d'abord, la photo est transformée en une image en niveau de gris (Fig. I.33 a). Cette image est ensuite segmentée, les fissures sont traitées par la binarisation (Fig. I.33 b). Le ratio *RSC* (Surface crack ratio), correspondant à la surface totale des fissures divisée par la surface totale d'échantillon, permet de quantifier le développement des fissures.

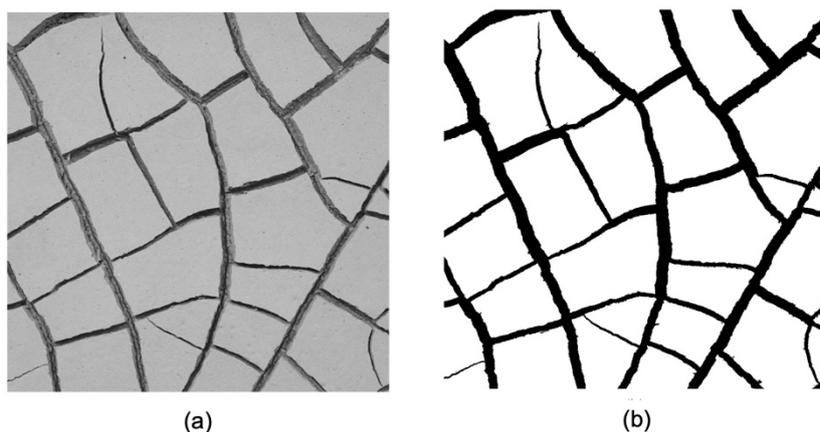


Figure I.33 : Procédure de traitement d'image numérique :
 (a) Image originale en niveau de gris des fissures ;
 (b) l'image binaire noire et blanc des fissures après traitement ([Tang et al., 2010](#)).

Une deuxième caméra fixée sur un côté d'échantillon permet de surveiller les changements d'épaisseur d'échantillon pendant la dessiccation (Fig. I.34).

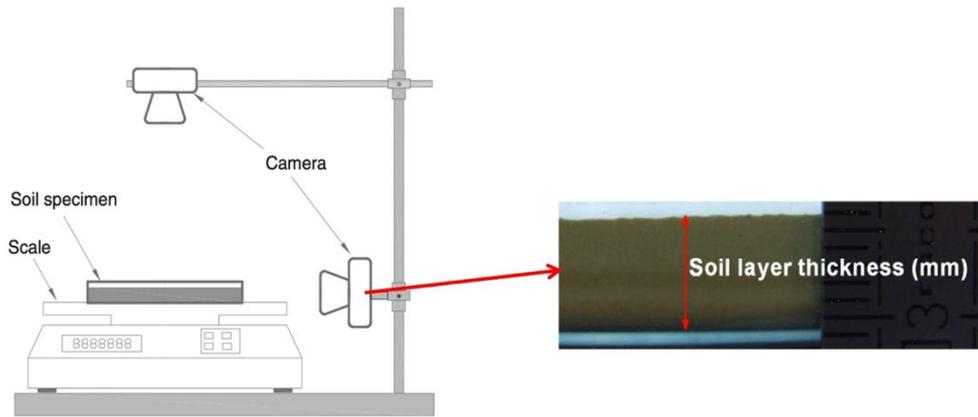


Figure I.34 : Schéma du dispositif expérimental équipé de deux caméras - photo montrant l'épaisseur de l'échantillon pendant le séchage (Tang et al., 2011).

Wei (2014) a analysé l'amorçage et la propagation des fissures liées à la dessiccation de différentes argiles constituées de différentes proportions en kaolinite (*Kaolinite P300*) et montmorillonite. Des analyses morphologiques du phénomène de fissuration en séchage ont été couplées avec une investigation approfondie des mécanismes de fissuration au moyen de la méthode CIN (Corrélation d'Images Numériques).

L'échantillon est préparé à partir d'une boue d'argile avec une teneur en eau initiale égale à la limite de liquidité ($w_0 = w_L$) (Fig. I.35).



(a)

(b)

Figure I.35 : Échantillon d'argile rectangulaire (Wei, 2014), (a) État initial ; (b) Fissures dans l'échantillon après 23 heures de séchage.

Le dispositif expérimental utilisé par Wei (2014) est présenté sur la figure I.36. Pendant l'essai de dessiccation libre, les photos de la surface supérieure de l'échantillon sont prises par une caméra digitale à intervalles du temps réguliers et traitées par le logiciel VIC-2D, afin d'identifier le mécanisme de fissuration à travers la variation des champs des déplacements et des déformations.

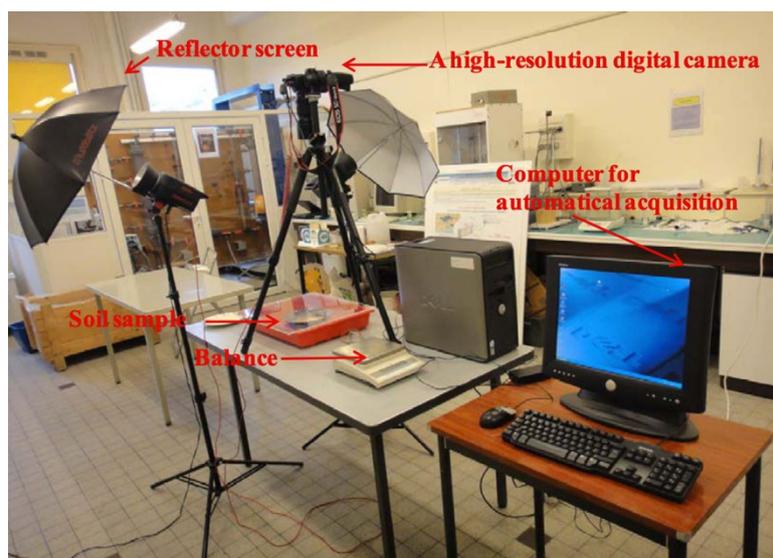


Figure I.36 : Dispositif expérimental pour la corrélation d'images numériques (Wei, 2014).

Dans ces essais Wei (2014) a analysé l'effet du frottement entre la support et l'échantillon qui peut être considéré comme une condition aux limites 2D.

Ighil Ameur (2016) a amélioré le dispositif expérimental de Wei (2014) pour étudier l'effet de différents chemins de séchage sur le phénomène de la fissuration. L'auteur a utilisé la technique d'équilibre de vapeur lui permettant de réaliser une série d'essai de dessiccation contrôlée.

La figure I.37 montre un schéma du dispositif expérimental. Dans la chambre à atmosphère contrôlée une solution saline et un hygromètre permettant de mesurer l'humidité relative et la température imposées. Trois sels ont été choisis pour imposer différentes succions ; NaCl pour une valeur de la succion faible égale à 38 MPa, K_2CO_3 pour une valeur de la succion moyenne égale à 110 MPa et KOH pour une valeur de la succion forte égale à 361 MPa.

L'échantillon utilisé est confectionné à partir d'une boue d'argile (*Kaolin K13*) avec une teneur en eau initiale égale à 1,2 fois sa limite de liquidité ($w_0 = 1,2 w_L$). Les dimensions de l'échantillon sont de 190 mm de longueur, 130 mm de largeur et 4 mm d'épaisseur, comme le montre la figure I.38 ci-dessous.

Un seul support en téflon a été utilisé dans ces essais de dessiccation contrôlée. L'influence de différents chemins de dessiccation contrôlée sur l'initiation et la propagation de la fissuration a été étudiée par méthode de CIN. Les résultats donnés par logiciel VIC-2D ont permis de suivre les déplacements et les déformations à l'échelle globale de l'échantillon et à l'échelle locale.

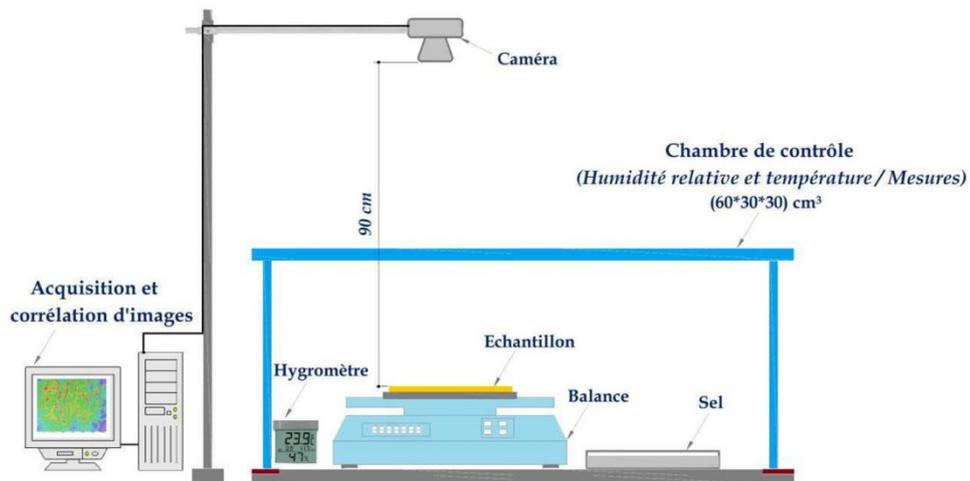


Figure I.37 : Schéma du dispositif expérimental pour essais de dessiccation contrôlée (Ighil Ameur, 2016).

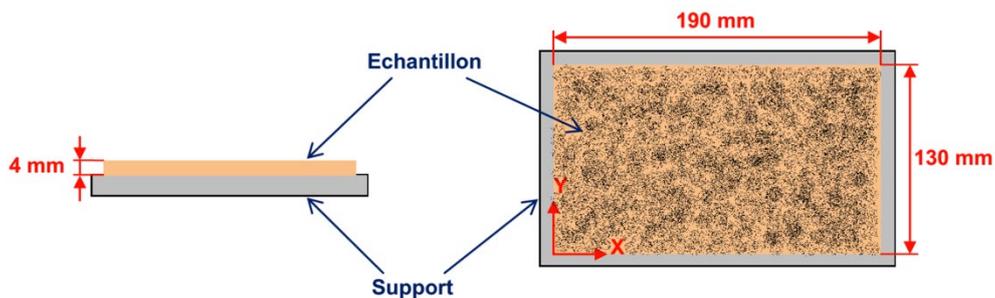


Figure I.38 : Représentation de l'échantillons sur le support (Ighil Ameur, 2016).

3.2 L'effet de la fissuration sur les performances du sol

La formation des fissures dans un sol soumis à un séchage influence certaines propriétés comme la compressibilité, la perméabilité et la résistance du sol (Morris et al., 1992). Dans les terres irriguées les fissures permettent à l'eau et aux solutés de s'écouler rapidement dans le sol créant des voies d'écoulement préférentielles pour le transport et la diffusion de certains contaminants et polluants (Bronswijk, 1991 ; Drumm et al., 1997). Dans les résidus miniers, les fissures induisent des changements de perméabilité et peuvent aboutir à des conséquences environnementales graves en raison de la diffusion des polluants (Rodríguez-Cruz et al., 2007). Albrecht et Benson (2001) ont réalisé des essais de dessiccation sur des échantillons d'argile compactée, utilisés comme barrière. Leurs résultats indiquent que les fissures peuvent augmenter jusqu'à 500 fois la conductivité hydrique du sol (Fig. I.39).

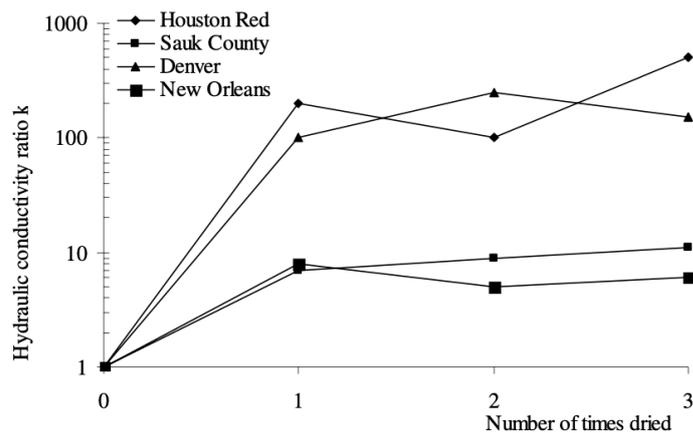


Figure 1.39 : Conductivité hydraulique en fonction du nombre de cycles de séchage pour les différents sols argileux étudiés (Albrecht et Benson, 2001).

Les études expérimentales de Boynton et Daniel (1985) et Rayhani et al. (2007) vont dans le même sens et montrent que la fissuration augmente la conductivité hydraulique de plusieurs ordres de grandeur. L'amorçage de la fissuration réduit la résistance mécanique globale du sol et entraîne souvent les endommagements des pentes (Tang et al., 2008). Ainsi la fissuration des sols due au séchage réduit les performances mécaniques et hydrauliques.

3.3 Comportement mécanique et analyse à la rupture

3.3.1 Mesure de la résistance à la traction d'un sol sous succion

Comparée avec la résistance à la compression la résistance à la traction des sols est plus faible. L'apparition et la propagation des fissures est fortement liée à la résistance à la traction du sol. Par conséquent comprendre la relation entre la contrainte et la déformation d'une argile non saturée soumise à une traction est une démarche importante pour maîtriser le phénomène de création des fissures.

De nombreux travaux ont été menés pour caractériser la traction des sols argileux. Les essais réalisés peuvent être classés dans deux catégories : 1) Essais de traction directe ; 2) Essais de traction indirecte.

- Méthode de Traction directe

La méthode d'essai de traction directe du sol consiste à appliquer une force de tension uniaxiale sur l'axe longitudinal d'échantillon, la valeur de la force est utilisée pour mesurer la résistance à la traction d'échantillon (Leavell et Peters, 1987 ; Avila, 2004 ; Nahlawi et al., 2004 ; Wei, 2014)

Nahlawi et al. (2004) ont développé un système expérimental qui utilise la technique de LVDT pour réaliser un essai de traction directe. Le schéma de principe de ce dispositif expérimental entièrement motorisé est illustré à la figure I.40. Les auteurs ont réalisé sept essais de traction directe sur l'argile *Werribee*, les résultats sont présentés dans la figure I.41 qui montre les courbes de traction en fonction du déplacement. La contrainte de traction a été calculée en divisant la force de traction par la section transversale de l'échantillon, et la déformation en divisant simplement le déplacement par la longueur de l'échantillon.

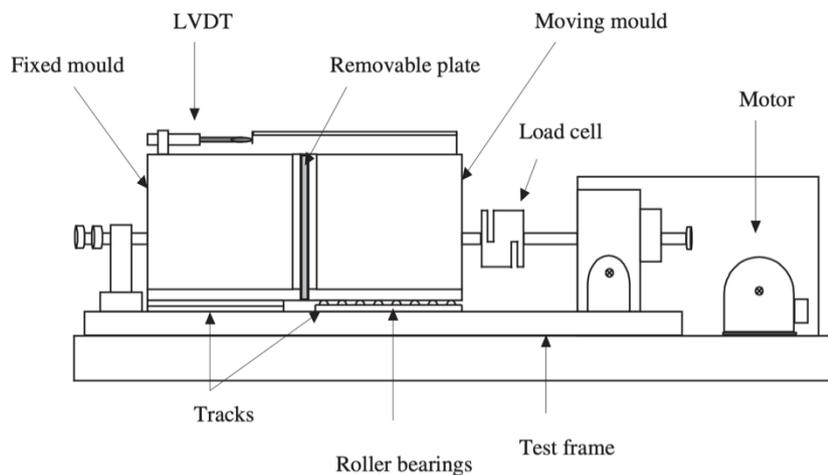


Figure I.40 : Schéma d'équipement de LVDT pour essai traction directe (Nahlawi et al., 2004).

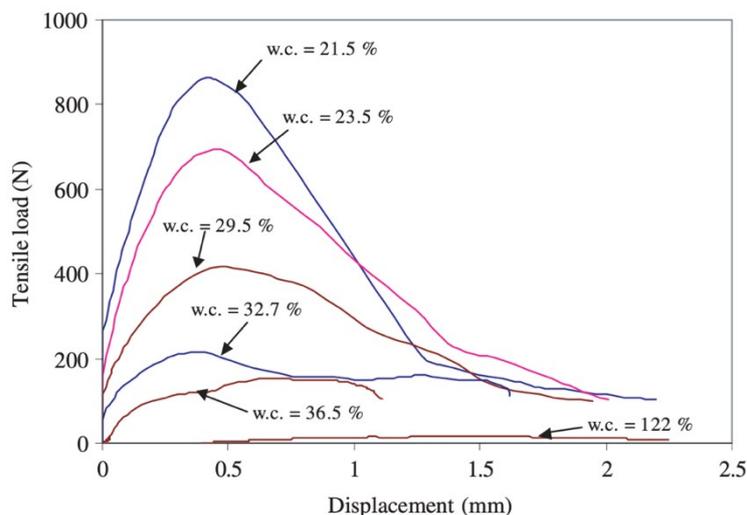


Figure I.41 : La relation entre la force de traction et le déplacement de l'argile *Werribee* avec différentes teneurs en eau (Nahlawi et al., 2004).

Nahlawi et al. (2004) ont également effectué des essais à différentes valeurs de teneur en eau afin d'étudier l'effet sur la résistance à la traction du sol. Les résultats de la résistance à la traction et de déformation à la rupture sont montrés à la figure I.42. Ils montrent que la teneur en eau est un facteur principal qui influence la résistance à la traction. Lorsque la teneur en eau augmente, la résistance à la traction diminue et la déformation à la rupture augmente.

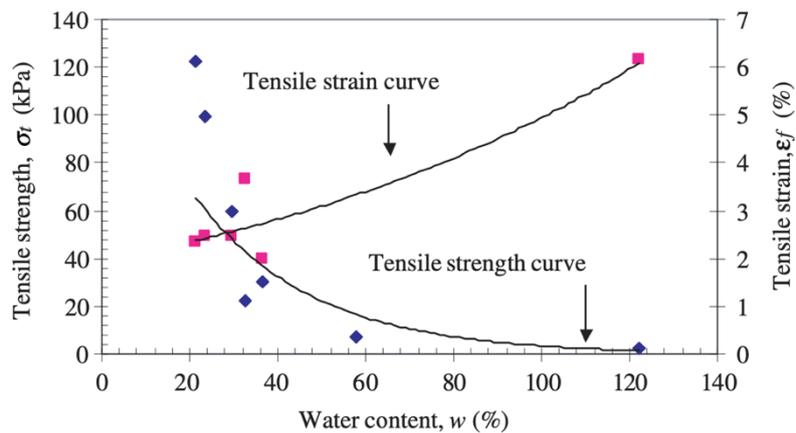


Figure I.42 : Résistance à la traction et déformation à la rupture en fonction de la teneur en eau pour l'argile de *Werribee* (Nahlawi et al., 2004).

Avila (2004) a aussi proposé un dispositif expérimental pour réaliser des essais de traction de sols argileux. Les échantillons sont placés dans un moule métallique tel que illustré dans la figure I.43. Le moule se sépare au milieu où le déplacement est mesuré. Les essais sont effectués soit avec une charge contrôlée, soit avec une déformation contrôlée.

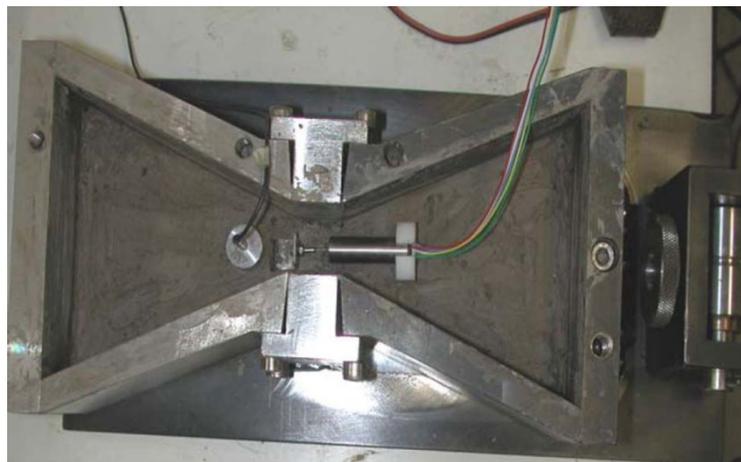


Figure I.43 : Dispositif expérimental pour mesurer la résistance à la traction des sols (Avila, 2004).

Wei (2014) a utilisé un dispositif expérimental d'essai traction directe, basé sur le même principe que le dispositif d'Avila (2004). Le but est d'analyser la relation entre la contrainte de traction et la déformation à différentes teneurs en eau et pour différents matériaux (*Kaolinite P300*, M35 et montmorillonite). Le moule en double triangle présenté dans la figure I.44 comprend une partie centrale de section uniforme rectangulaire où le déplacement est mesuré par un capteur LVDT. La partie à droite est fixée et la partie à gauche peut se déplacer sur les rouleaux. Pendant l'essai, la force est mesurée par un capteur de force.

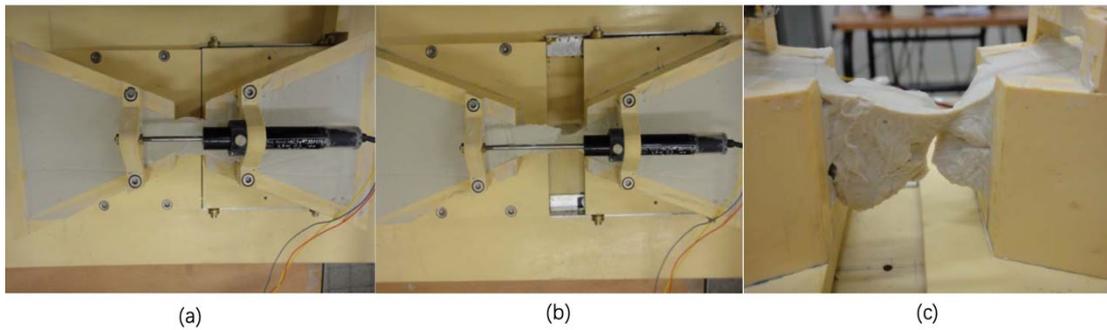


Figure I.44 : Dispositif expérimental pour essais de traction : (a) échantillon avant traction ; (b) échantillon après traction ; (c) rupture d'échantillon (Wei, 2014).

Les trois courbes présentées dans la figure I.45 montrent les résultats de Wei (2014) des essais de traction sur de la *Kaolinite P300* à différentes valeurs de teneur en eau. Au début des essais, les valeurs de la déformation sont proches de 0, puis elles augmentent en fonction de la charge pour que progressivement les courbes se dirigent vers un palier. L'auteur souligne que lorsque la teneur en eau diminue, la contrainte de traction maximale augmente et la résistance à la traction augmente.

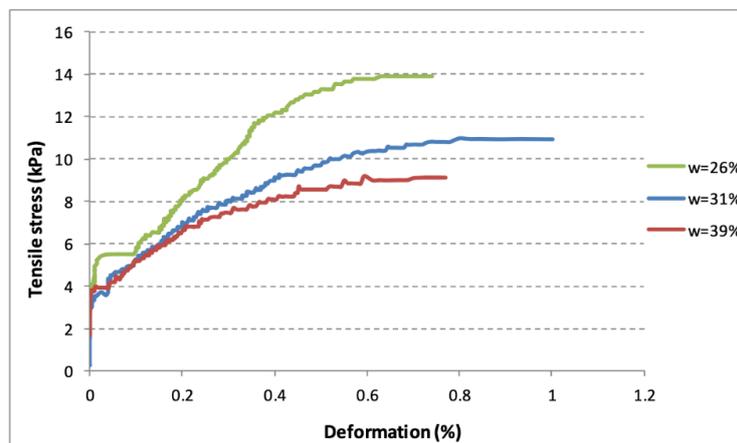


Figure I.45 : Relation entre contrainte de traction et déformation pour *Kaolinite P300* avec différentes teneurs en l'eau (Wei, 2014).

- Méthode de traction indirecte

La méthode d'essais de traction indirecte est basée sur la réalisation de corrélation empirique de différents paramètres du sol pour calculer la résistance à la traction (Tang et al., 2015). En général, cette méthode implique l'application d'une charge ponctuelle ou linéaire pour produire une contrainte de traction sur le plan de rupture. En raison des difficultés et des limites liées aux essais directs, la méthode indirecte a été présentée comme une technique alternative pour mesurer la résistance à la traction des sols (Win, 2006). On présente ici deux types d'essai : l'essai de flexion et l'essai de double poinçon.

L'essai de double poinçon est une méthode indirecte développée par Fang et Chen (1971) pour mesurer la résistance à la traction des sols. Le dispositif utilisé est représenté sur la figure I.46, il est composé de deux poinçons centrés et placés dans les parties supérieure et inférieure de l'échantillon. L'échantillon est ainsi soumis à une force de compression par les deux poinçons.

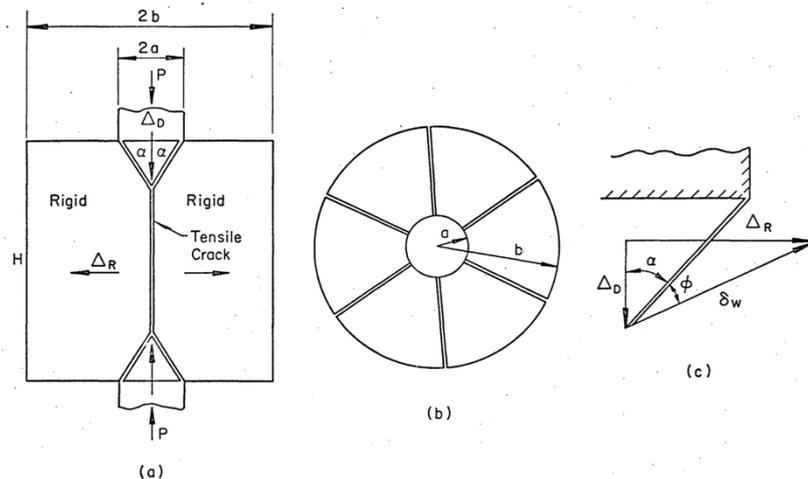


Figure I.46 : Schéma du dispositif expérimental pour l'essai de double poinçon (Fang et Chen, 1971).

L'essai de flexion est une méthode indirecte pour étudier le comportement en traction du sol et autres matériaux comme les roches. La charge de flexion peut être appliquée au centre de la poutre de sol (essai de flexion trois point, Fig. I.47 a, ou à partir de deux charges de flexion égales placées à une distance égale à L/3 des extrémités de la poutre (essai de flexion quatre points Fig. I.47 b).

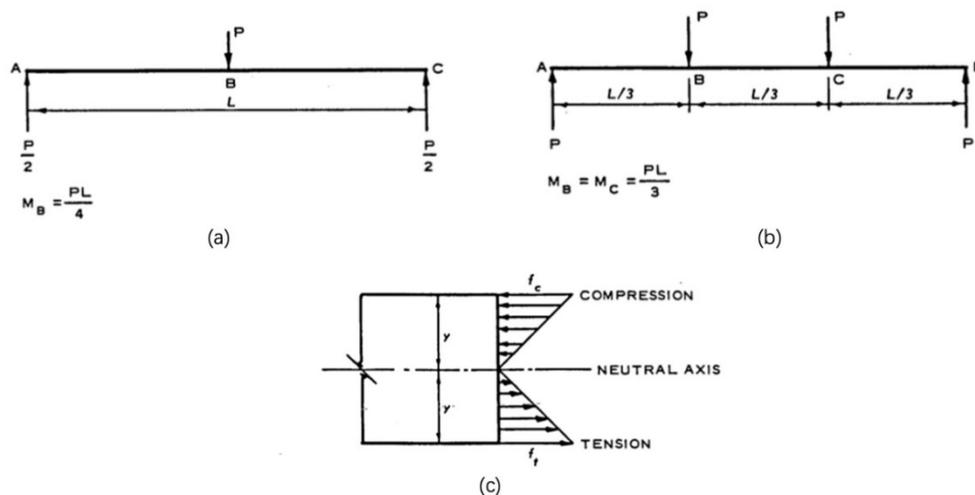


Figure I.47 : Charges et distribution des contraintes dans les essais de flexion d'après Al-Hussaini et Townsend (1973).

En se basant sur la théorie de l'élasticité linéaire du matériau, avec un module de Young constant à la traction et à la compression (Al-Hussaini and Townsend, 1973). La contrainte de traction peut être déterminée par l'équation suivante :

$$\sigma_t = \frac{M\bar{y}}{I} \quad \text{Eq. I. 9}$$

Avec :

σ_t : contrainte de traction

M : moment fléchissant

\bar{y} : distance entre l'axe neutre et le point étudié

I : moment d'inertie.

Par ailleurs, [Ajaz et Parry \(1975\)](#) présentent deux hypothèses pour la distribution de contrainte et déformation, elles sont représentées sur la figure I.48.

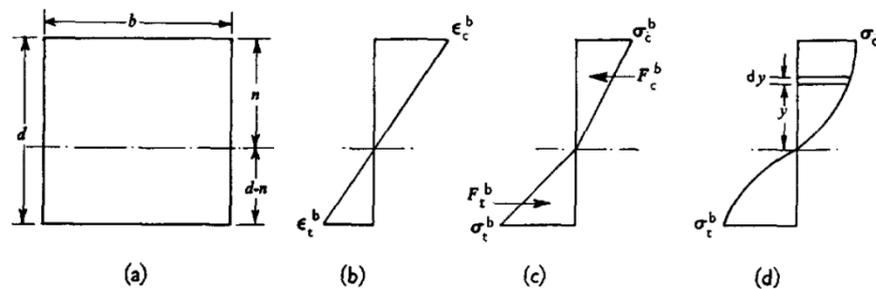


Figure I.48 : Diagrammes de distribution des contraintes et déformations dans un essai de flexion ([Ajaz et Parry, 1975](#)).

Lors d'un essai de flexion, les contraintes peuvent être déterminées par trois méthodes : La méthode dite directe, la méthode dite différentielle et la méthode dite de la flexion élastique.

Les deux premières méthodes permettent de calculer la contrainte à partir du moment fléchissant et les déformations mesurées. La troisième méthode calcule les contraintes et déformations à partir du moment fléchissant et des flexions observées de la poutre en utilisant la théorie de la flexion élastique ([Ajaz et Parry, 1975](#)). Les différentes méthodes sont présentées ci-dessous

- Méthode directe :

Dans cette méthode, les sections planes restent planes après flexion, la contrainte est linéaire et proportionnelle à la déformation. La valeur du module de Young en traction peut différer de celle en compression et il n'y a pas de fluage pendant l'essai.

Avec les conditions d'équilibre statique de la poutre, les expressions des contraintes en compression σ_c^b et en traction σ_t^b deviennent :

$$\sigma_c^b = \frac{3M}{bd^2} \frac{\varepsilon_c^b + \varepsilon_t^b}{\varepsilon_c^b} \quad \text{Eq. I. 10}$$

$$\sigma_t^b = \frac{3M}{bd^2} \frac{\varepsilon_c^b + \varepsilon_t^b}{\varepsilon_t^b} \quad \text{Eq. I. 11}$$

Ici, les dimensions b et d sont la largeur et la hauteur de la poutre. M est le moment fléchissant.

- Méthode différentielle :

La relation entre contrainte et déformation est représentée par la relation suivante :

$$\sigma^b = f(\varepsilon^b) \quad \text{Eq. I. 12}$$

Avec les distributions de la contrainte et de la déformation (Fig. I.48), les forces de traction F_t^b et de compression F_c^b peuvent être obtenues par :

$$F_t^b = \int_{n-d}^0 b\sigma^b dy = \frac{b(d-n)}{\varepsilon_t^b} \int_{\varepsilon_t^b}^0 f(\varepsilon^b) d\varepsilon^b \quad \text{Eq. I. 13}$$

$$F_c^b = \int_0^n b\sigma^b dy = \frac{bn}{\varepsilon_c^b} \int_0^{\varepsilon_c^b} f(\varepsilon^b) d\varepsilon^b \quad \text{Eq. I. 14}$$

Où n est la hauteur de la partie compression de la poutre.

$$n = \frac{\varepsilon_c^b}{\varepsilon_t^b + \varepsilon_c^b} d \quad \text{Eq. I. 15}$$

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

$$M = d_m F_c^b = \frac{bd^2}{(\varepsilon_t^b + \varepsilon_c^b)^2} \int_{\varepsilon_t^b}^{\varepsilon_c^b} f(\varepsilon^b) \varepsilon^b d\varepsilon^b \quad \text{Eq. I. 16}$$

En dérivant l'équation précédente par rapport à la déformation de traction ε_t^b et compression ε_c^b , les contraintes de traction σ_t^b et de compression σ_c^b sont obtenues par les deux équations différentielles suivantes :

$$\sigma_t^b = \frac{1}{\varepsilon_c^b + \varepsilon_t^b} \frac{\delta}{\delta \varepsilon_t^b} \left\{ \frac{M(\varepsilon_c^b + \varepsilon_t^b)^2}{bd^2} \right\} \quad \text{Eq. I. 17}$$

$$\sigma_c^b = \frac{1}{\varepsilon_c^b + \varepsilon_t^b} \frac{\delta}{\delta \varepsilon_c^b} \left(\frac{M(\varepsilon_c^b + \varepsilon_t^b)^2}{bd^2} \right) \quad \text{Eq. I. 18}$$

- Méthode de la flexion élastique

Les hypothèses considérées dans cette méthode sont quasi-équivalentes aux deux méthodes décrites ci-dessus, hormis le fait que le module de Young prend la même valeur en traction et en compression. Cette hypothèse est la même que celle de [Al-Hussaini et Townsend \(1973\)](#). Les contraintes de traction et compression au niveau des fibres extrêmes sont alors obtenues par l'équation suivante :

$$\sigma_{c,t}^b = \frac{6M}{bd^2} \quad \text{Eq. I. 19}$$

Dans ce cas, les déformations de traction et de compression sont les mêmes ($\varepsilon_t^b = \varepsilon_c^b$).

La comparaison entre les résultats des trois méthodes effectuées par [Ajaz et Parry \(1975\)](#) montre que la méthode différentielle et la méthode directe donnent une même forme de courbes en termes de contrainte-déformation. La méthode de flexion élastique et la méthode directe sont plus simples à appliquer et souvent utilisées pour analyser la résistance du matériau dans les essais de flexion.

[Ighil Ameur et Hattab \(2017\)](#) ont réalisé les essais de flexion sur des petites poutres (poutrelles) d'argile soumises à différents niveaux de succion initiale imposée. Les auteurs ont utilisé un appareil d'essai de traction indirecte développé au laboratoire (Fig. I.49).

Le système expérimental est spécialement adapté pour intégrer la technique de corrélation d'images numériques (CIN). La figure I.49 présente le montage et le principe de fonctionnement du système de l'essai. La succion est imposée aux échantillons avant l'essai de flexion au moyen de différentes solutions salines saturées.

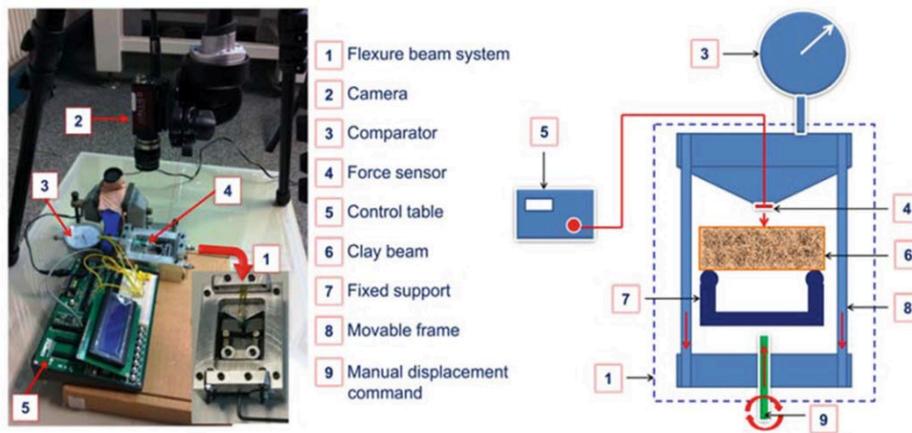


Figure 1.49 : Dispositif expérimental des essais de flexion pour petites poutrelles d'argile (Ighil Ameer et Hattab, 2017).

Les auteurs observent l'évolution de la déformation en flexion représentée sous forme de cartographies. L'exemple de la figure 1.50 retrace l'évolution de la déformation longitudinale obtenue par le CIN. L'initiation de la fissure peut-être ainsi capturée.

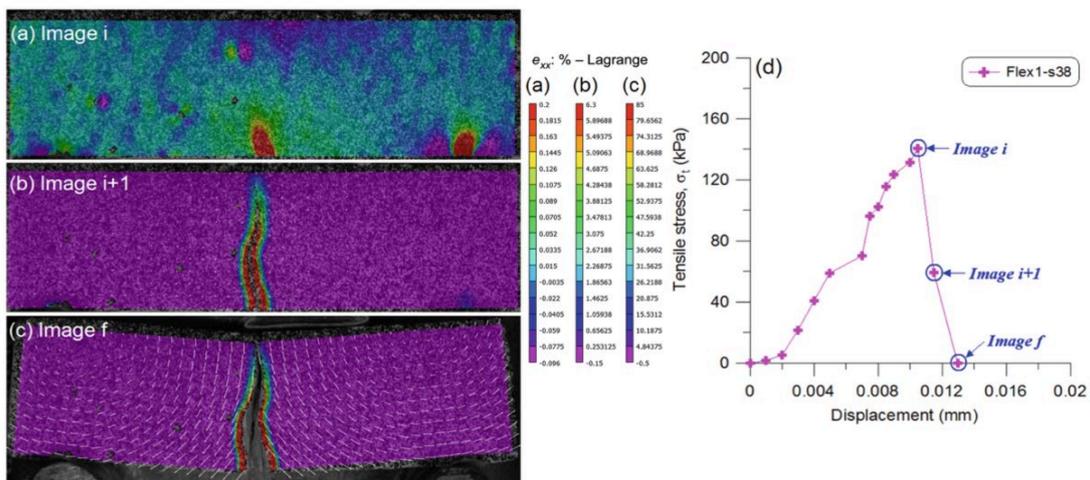


Figure 1.50 : Déformation locale longitudinale ε_{xx} en (a) image i ; (b) image $i + 1$; (c) image f et (d) leurs positions sur la courbe de contrainte de traction (Ighil Ameer et Hattab, 2017).

Les trois images sélectionnées (Image i , Image $i + 1$ et Image f) dans la figure 1.50 montrent les différentes étapes du développement de la fissure (Ighil Ameer et Hattab, 2017). La contrainte de traction maximal est atteinte à l'instant i (image i sur la figure 1.50 a), la zone de traction au milieu de la poutre est représentée par la couleur rouge où la déformation moyenne est égale à 0,2 %. Cette étape définit l'initiation de la fissure. Lorsque la contrainte de traction diminue, l'image $i + 1$ (Fig. 1.50 b) montre la propagation de la fissure. La déformation de traction augmente jusqu'à 6,3 %. A la fin de l'essai (Image f sur la figure 1.50 c), les directions des vecteurs de déplacement (vecteurs blancs) représentent le mécanisme en ouverture de la fissure.

Les résultats indiquent que la résistance à la traction augmente à mesure que la succion initiale est élevée. Il existe une relation non linéaire entre la succion initiale et la résistance à la traction (Ighil Ameer, 2016). Des tendances similaires ont été observées par certains auteurs, par exemple Tang et Graham (2000) sur des mélanges de bentonite et de sable ; Taïbi et al. (2008), Wei et al. (2016) sur des sols argileux.

3.3.2 Critères de rupture et comportement

La prédiction de la fissuration dépend du choix d'un critère de rupture. Newmark (1960) a souligné que la rupture est définie au début de la perte de contrainte de cisaillement dans les sols cohésifs. Alors pour les sols, le critère de rupture le plus utilisé est le critère de Mohr-Coulomb dont le principe est illustré sur la figure I.51.

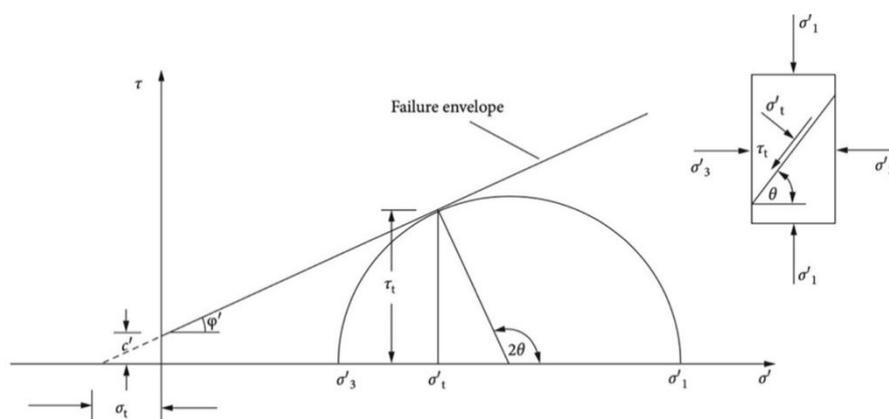


Figure I.51 : Critère de rupture de Mohr-Coulomb cité par Wei et al. (2020b).

La contrainte de cisaillement d'un sol en un point sur un plan particulier en termes de contraintes effectives peut être exprimée comme une équation linéaire de la contrainte normale effective.

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \tan \varphi' \quad \text{Eq. I. 20}$$

Avec :

τ_f : contrainte de cisaillement

c' : cohésion

σ'_n : contrainte normale effective

φ' : angle de frottement.

Le critère de Mohr-Coulomb illustré sur la figure I.51 permet de définir des relations entre les contraintes principales effectives et les paramètres intrinsèques du sol (la cohésion et l'angle de frottement) :

$$\sin \varphi' = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2}{c' \cot \varphi' + (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2} \quad \text{Eq. I. 21}$$

$$(\sigma'_1 - \sigma'_3) = 2c' \cos \varphi' + (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \varphi' \quad \text{Eq. I. 22}$$

Avec σ'_1 et σ'_3 sont les contraintes principales effectives.

L'équation Eq. I.23 fait référence au critère de rupture de Mohr-Coulomb, qui peut être exprimé par un rapport entre une résistance à la compression non-confinée q_u et la résistance à la traction σ_t :

$$\frac{q_u}{\sigma_t} = \frac{2 \sin \varphi'}{1 - \sin \varphi'} \quad \text{Eq. I. 23}$$

Le critère de rupture de Mohr-Coulomb est largement utilisé pour décrire le comportement des sols sous compression. Cependant, il existe des limites pour interpréter le comportement du sol en traction car les conditions en termes de contraintes de traction (partie négative de la contrainte) sont pour la plupart non linéaires (Brace, 1960, Frydman, 1967).

D'autres critères de rupture, tels que les critères de Griffith (Brace, 1960, Lee et Ingles, 1968), Griffith modifié (Brace, 1960), et Mohr-Coulomb modifié (Fang et Chen, 1971, 1972) ont également été proposés pour décrire le comportement du sol sous traction.

Pour un matériau fissuré, le critère de Griffith stipule que la rupture se propage lorsque la contrainte de traction locale maximale, au niveau de la fissure la plus longue, atteint la résistance à la traction du matériau sain non fissuré (Lee et Ingles, 1968). D'après la théorie de Mohr-Coulomb, la formulation de la théorie de Griffith est définie par l'équation suivante (Brace, 1960) :

$$\tau^2 + 4K\sigma - 4K^2 = 0 \quad \text{Eq. I. 24}$$

Avec :

τ : contrainte de cisaillement

σ : contrainte normale

K : résistance à la traction.

Dans le cas du critère Griffith, la résistance à la traction obtenue est égale à la moitié de la cohésion apparente. La théorie de Griffith suppose un ratio de la résistance à la compression sur la résistance à la traction constant égal à 8. L'évolution des deux parties décrivant la compression et la traction est non-linéaire (Fig. I.52).

Le critère Griffith modifié a été proposée par Brace (1960), il représente une combinaison des deux critères Mohr-Coulomb et Griffith. La partie représentant la compression avec le critère de Griffith modifié est linéaire, comme le critère de Mohr-Coulomb, tandis que la

partie traction est non-linéaire comme le critère de Griffith (Fig. I.52). L'équation de la théorie de Griffith modifiée est donnée par la relation suivante :

$$\pm\tau = 2K - \mu\sigma \quad \text{Eq. I. 25}$$

Avec :

τ : contrainte de cisaillement

σ : contrainte normale

K : résistance à la traction

μ : coefficient de frottement.

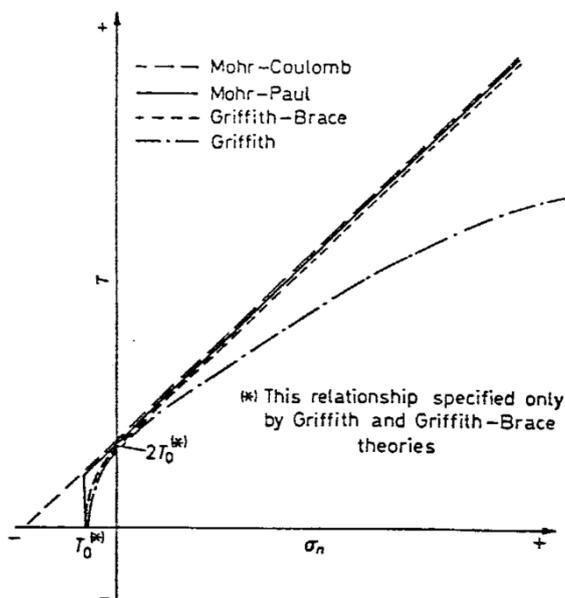


Figure I.52 : Enveloppes de rupture selon différents critères (Lee et Ingles, 1968).

Le critère de Mohr-Coulomb modifié a été proposé par Fang et Chen (1971,1972) (Fig. I.53). Il ne nécessite aucune condition concernant la cohésion apparente ni de ratio entre la résistance à la compression et la résistance à la traction.

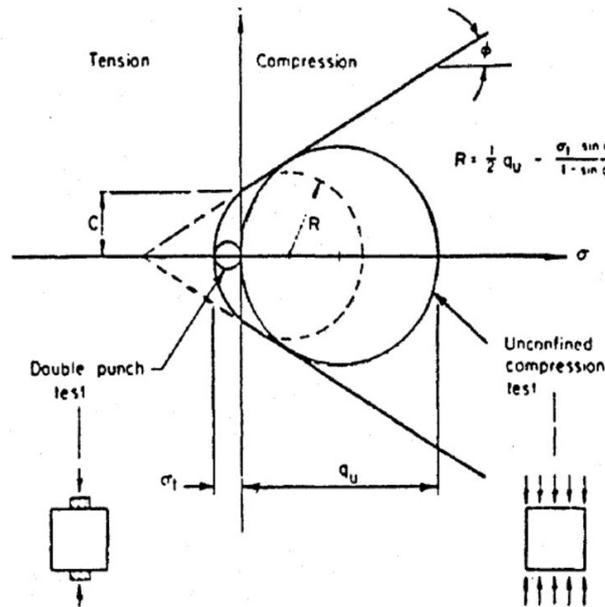


Figure I.53 : Critère de Mohr-Coulomb modifié Fang et Chen (1972).

Tous ces critères décrivent le comportement du sol sous traction. La théorie de Griffith modifiée ou les critères de Mohr-Coulomb modifiés sont cependant rattachés à des limitations dues au manque de données expérimentales pour définir la partie non linéaire du critère (Senior, 1981).

3.3.3 Mécanique de la rupture liée à la fissuration de dessiccation

On s'accorde généralement à penser que la théorie de la rupture est développée sur la base de la théorie classique de Griffith (Griffith, 1921), le concept de base de la propagation de la fissure a été proposé par Griffith en 1921. Griffith (1921, 1924) a indiqué que la rupture se produira si, grâce à l'extension de fissure, une quantité suffisante d'énergie est restituée pour égaler l'énergie nécessaire pour la création d'une nouvelle surface de rupture.

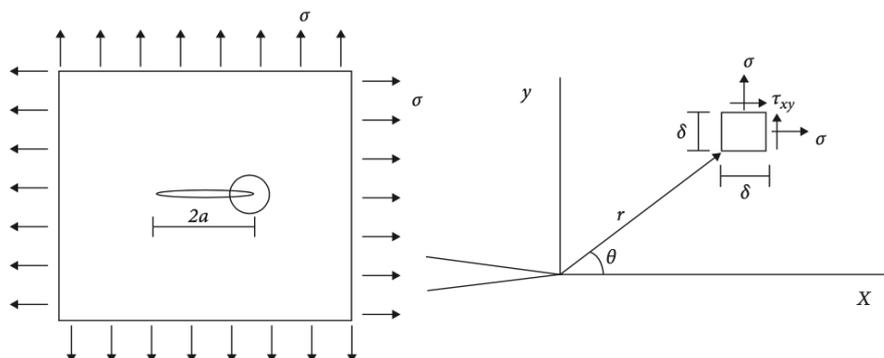


Figure I.54 : Fissure dans une plaque finie, cité par Wei (2020b).

La figure I.54 illustre une fissure dans un champ de contrainte de traction uniforme. Si cette fissure se propage d'une distance δa , sous l'effet des forces externes, alors les équations suivantes peuvent être obtenues (Griffith, 1924) :

$$\frac{\delta U}{\delta a} = \frac{\delta W}{\delta a} \quad \text{Eq. I. 26}$$

$$\frac{\delta U}{\delta a} = G \quad \text{Eq. I. 27}$$

$$\frac{\delta W}{\delta a} = R \quad \text{Eq. I. 28}$$

Avec :

U : énergie élastique

W : énergie nécessaire à la propagation de fissure

R : résistance à la rupture

G : taux de restitution d'énergie.

Ici, le paramètre G dépend du coefficient de Poisson ν , du module de Young E et du facteur d'intensité de contrainte K .

Du point de vue de la théorie classique de Griffith, la rupture entraîne une libération de l'énergie élastique stockée sous forme d'énergie cinétique et d'énergie de rupture. Les équations ci-dessus expriment une condition énergétique dans laquelle G doit atteindre la valeur de R avant l'amorçage d'une fissure. Si R est constante, cela signifie que G doit dépasser une certaine valeur critique G_{ic} . Pour un matériau donné, on admet l'existence d'un taux de restitution de l'énergie G_{ic} à partir duquel la propagation a lieu :

$$\begin{cases} G < G_{ic} & \text{pas de propagation de la fissure} \\ G = G_{ic} & \text{propagation de la fissure} \end{cases} \quad \text{Eq. I. 29}$$

L'énergie de rupture G_{ic} est une propriété caractéristique de chaque matériau et représente l'énergie nécessaire pour la séparation de la matière.

Afin de comprendre les mécanismes de propagation, en front de fissure, l'état de contrainte et le champ des déplacements au voisinage de la fissure sont analysés. Les équations exprimant les distributions de la contrainte (σ_x , σ_y et σ_{xy}) et des déplacements (u , v) sont développées par Zienkiewicz (1977) :

$$\sigma_x = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad \text{Eq. I. 30}$$

$$\sigma_y = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad \text{Eq. I. 31}$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \left(\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad \text{Eq. I. 32}$$

$$u = \frac{K_1}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2\kappa - 1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right] \quad \text{Eq. I. 33}$$

$$v = \frac{K_1}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2\kappa - 1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad \text{Eq. I. 34}$$

$$\text{avec } \begin{cases} \kappa = 3 - 4\nu & \text{en déformations planes} \\ \kappa = \frac{3 - \nu}{1 + \nu} & \text{en contraintes planes} \end{cases}$$

Avec le paramètre K ou K_1 (en Mode I), le facteur d'intensité de contrainte dépend du mode de fissuration, de l'orientation, et des dimensions des fissures. Dans les problèmes 3D, la propagation d'une fissure peut se décomposer en trois modes de fissuration illustrés sur la figure I.55 :

- Mode I – mode d'ouverture (Fig. I.55 a) ;
- Mode II – mode de glissement (Fig. I.55 b) ;
- Mode III – mode de déchirement (Fig. I.55 c).

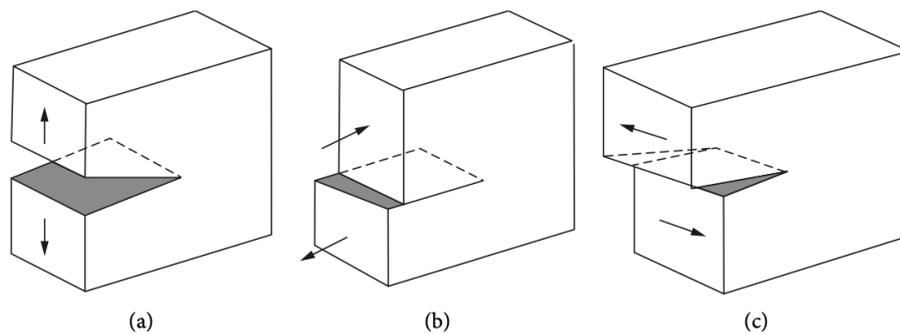


Figure I.55 : Modes de fissuration dans un problème 3D : (a) Mode I mode d'ouverture ; (b) Mode II mode de glissement ; (c) Mode III mode de déchirement d'après [Degarmo et al. \(2003\)](#) ; cités par [Ighil Ameur \(2016\)](#).

En conséquence, le facteur K peut être approché par une valeur critique qui est la ténacité à la rupture, notée souvent K_{Ic} . [Irwin \(1957\)](#) propose un critère de propagation basé sur ce facteur d'intensité des contraintes. Le critère est formulé pour le mode I. Pour une fissure de longueur l dans un milieu élastique idéalisé, sous condition de

déformations planes, le facteur d'intensité de la contrainte pour le mode I est exprimé comme suit :

$$K_1 = \sqrt{\frac{EG}{1-\nu^2}} \quad \text{Eq. I. 35}$$

Avec :

E : module de Young

ν : coefficient de Poisson

G : taux de restitution d'énergie.

On peut formuler le critère ainsi :

$$\begin{cases} K_1 < K_{ic}, \Delta l = 0 & \text{Fissure stable} \\ K_1 = K_{ic}, \Delta l > 0 & \text{Propagation de la fissure} \end{cases}$$

La ténacité K_{ic} est une constante du matériau, comme le module d'Young ou le coefficient du Poisson. [Broek \(1984\)](#) indique que les matériaux à haute résistance ont généralement une faible ténacité à la rupture. Les problèmes de rupture dans un cas de contraintes planes peuvent être résolus avec la mécanique de la rupture. Les matériaux à faible résistance ont généralement une ténacité élevée et la zone plastique à la rupture peut être plus grande. D'où la difficulté de traiter les fissures dans des matériaux à haute ténacité.

Dans le domaine de la mécanique de la rupture, le problème de la fissuration est généralement étudié comme un processus mécanique, et les critères de rupture sont basés sur le champ des contraintes critiques.

[Corte et Higashi \(1960\)](#) ont souligné que la fissuration due au séchage est différente de la fissuration sous sollicitations mécaniques, car le matériau perd de la masse au cours du processus de séchage. Pour cela, la théorie de mécanique à la rupture a des difficultés de reproduire l'initiation de la fissuration dans un sol qui sèche. Cependant, elle peut traiter la propagation de la fissuration et prévoir le début d'amorçage des fissures secondaires et leur propagation. Notons que plusieurs travaux ([Konrad et Ayad, 1997](#) ; [Chertkov, 2002](#) ; [Nahlawi et al., 2004](#) ; [Ighil Ameur, 2016](#)) ont montré que le sol peut se fissurer alors qu'il est à l'état de saturation.

3.3.4 Initiation et propagation de la fissuration en mode ouverture (Mode I).

[Wei et al \(2016\)](#) ont effectué une analyse des mécanismes d'initiation et de propagation des fissures dans les argiles sous dessiccation (partie 1.3.2.2 de ce chapitre). A la fin du séchage, le réseau de fissures est formé. Les trois modes de fissuration décrits par la

figure I.55 ont été observés. Cependant, le mode d'ouverture I est toujours présent, soit seul soit combiné avec les deux autres modes. La figure I.56 (a) montre une zone de fissuration qui se développe dans la cartographie de la déformation longitudinale ε_{xx} obtenue par la CIN. Ce résultat est obtenu après 37,33 h de séchage, dans le cas du mélange M35 sur un support lisse. Dans cette zone, au voisinage de la pointe de fissure, des déformations en extension sont observées (en gris foncé Fig.I.56 a).

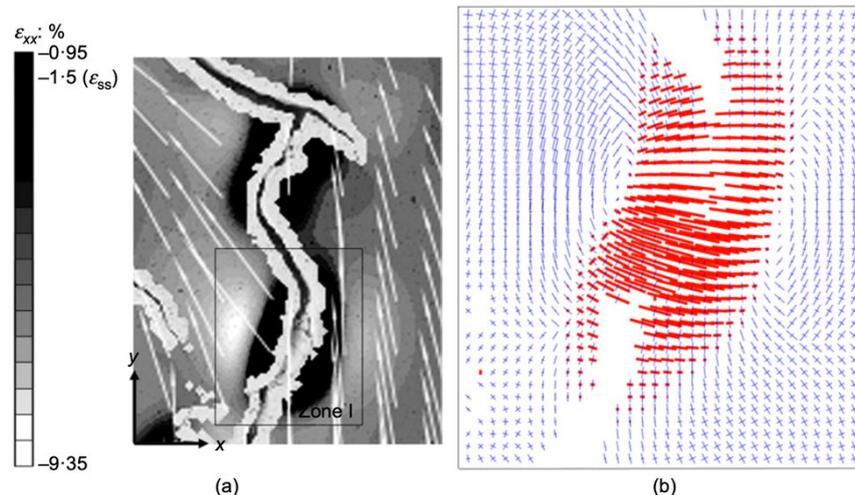


Figure I.56 : Fissure en mode ouverture : (a) cartographie de la déformation longitudinale ε_{xx} ; (b) schéma de la déformation principale dans la zone I (Wei et al., 2016).

Afin d'identifier plus précisément le mécanisme de fissuration, les auteurs ont tracé la distribution des déformations principales dans la zone de fissure (Fig. I.56 b). Les vecteurs bleus (fins) représentent la compression et les vecteurs rouges (épais) indiquent une traction. Les résultats montrent clairement que la direction de la fissure est perpendiculaire à celle de traction (direction des vecteurs rouges). Ainsi, les auteurs ont conclu que la fissure dans cette zone est provoquée par la traction et correspond à un mécanisme en mode d'ouverture (mode I).

Ighil Ameur (2016) a étudié la fissuration sur des chemins de dessiccation contrôlée. La méthode proposée consiste à traiter les zones critiques obtenues en analysant les déformations locales via la CIN sur les chemins effectués à faible, moyenne et forte succions imposées.

Des fissures ont été identifiées au cours de la dessiccation contrôlée. La figure I.57 montre une cartographie de déformation principale majeure ε_1 à la fin du séchage à forte succion imposée. Dans cette cartographie trois zones critiques apparaissent. Il s'agit de fissures où les zones ont été à forte extension (couleur rouge dans la cartographie) en fin d'essai.

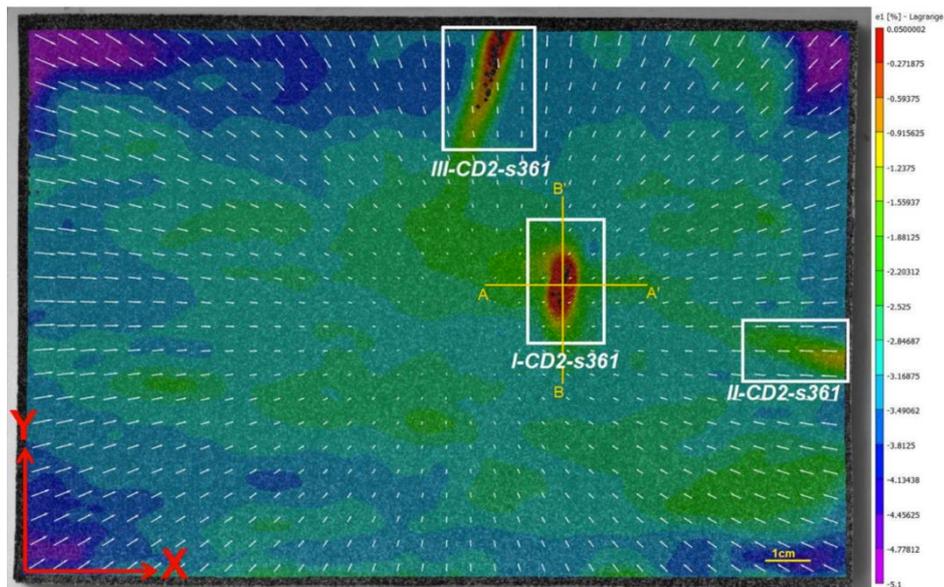


Figure I.57 : Cartographie de déformation principale majeure ε_1 à la fin du séchage ($\sigma = 361$ MPa, $w = 2,2$ %) Ighil Ameur (2016).

Dans l'analyse par la CIN, les cartographies des déformations rendent souvent difficile l'observation de la zone d'extension car la déformation liée au retrait est très importante.

Afin d'identifier le mécanisme de la fissuration, l'auteur a calculé les déformations principales ainsi que la direction de celles-ci dans les zones critiques en s'affranchissant des déformations de retrait dans cette zone. L'orientation de ces déformations principales de la zone II-CD2-s361 et la zone III-CD2-s361 est présentée sur la figure I.58. Dans la zone II-CD2-s361 (Fig. I.58 a1) toute la zone autour de la fissure présente des déformations sans le retrait (auxquelles le retrait a été retranché) en extension (Fig. I.58 a2). Il en est de même pour la zone III-CD2-s361 où une fissure s'est propagée. L'auteur a constaté que, dans les deux zones, la direction de la fissure est perpendiculaire aux directions des extensions principales où la déformation calculée ne tient pas compte du retrait (Fig. I.58 a2 et Fig. I.58 b2). L'auteur conclut que ces fissures correspondent au mécanisme d'ouverture par extension (mode I).

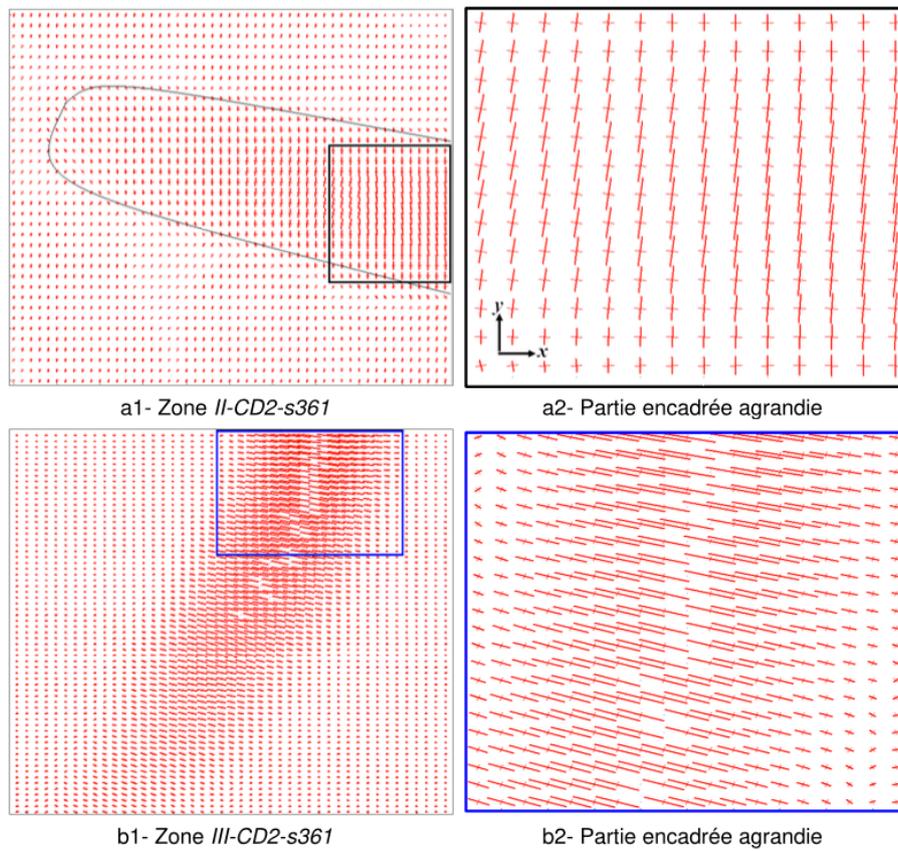


Figure I.58 : Déformations principales locales calculées à la fin du séchage dans deux zones Ighil Aneur (2016).

Conclusion

Ce chapitre est consacré à une synthèse bibliographique générale sur diverses problématiques qui concernent le comportement du sol argileux au séchage, le retrait de séchage et la fissuration hydrique des sols argileux, ainsi que les notions théoriques liées aux sols argileux non saturés.

L'étude effectuée nous a permis de souligner les conclusions suivantes :

- Les propriétés physico-chimiques et la composition minéralogique des minéraux argileux jouent un rôle important lors de la désaturation de l'argile sous sollicitations hydriques.

- L'apport de la microstructure de l'argile, est déterminant pour la compréhension des propriétés macroscopiques et la maîtrise du comportement hydromécanique du matériau.

- La succion est un facteur important qui affecte le comportement mécanique des argiles notamment le retrait de séchage et la fissuration. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour la mesure et le contrôle de la succion, la méthode des solutions salines peut être sélectionnée pour la suite comme la principale méthode de contrôle de la succion.

- La courbe de rétention d'eau et la courbe de retrait permettent de mieux décrire le processus de séchage de l'argile ainsi que la variation des paramètres hydriques au cours de son retrait. Les modèles de Fredlund et de Van Genuchten permettent d'ajuster et de reproduire la courbe caractéristique de l'argile étudiée.

- La fissuration des sols argileux au cours du séchage intervient généralement lorsque la contrainte de traction développée dans le sol, due à la succion, dépasse sa résistance à la traction. Deux types de rupture peuvent se manifester, les ruptures induites par des contraintes de traction (la direction de la rupture est perpendiculaire à la contrainte principale maximale), et les ruptures dues à des contraintes de cisaillement.

- En distinguant les différentes méthodes expérimentales d'étude de la fissuration au cours du séchage, la méthode de CIN a été choisie pour étudier l'initiation et la propagation des fissures dans les échantillons de sols d'argile sous dessiccation contrôlée. Les mécanismes d'initiation de fissures dans les échantillons d'argile sous dessiccation contrôlée sont dominés par le mode I (ouverture).

- Les méthodes expérimentales d'essais de traction directe et indirecte ont permis d'étudier la fissuration des échantillons sous tension et la résistance à la traction des argiles. Les essais réalisés dans la littérature fournissent une base théorique et les techniques expérimentales nécessaires à notre étude du comportement mécanique en fissuration des argiles en utilisant les essais de flexion trois points.

Chapitre II

La Méthode de Corrélation d'Images
Numériques – principe – calibration –
interprétation des données

Chapitre II. La Méthode de Corrélation d'Images Numériques – principe – calibration – interprétation des données

Sommaire :

Introduction

1. Technique et fonctionnement de la Corrélation d'Images Numériques (CIN)

1.1. Technique de CIN

1.2. Principe et fonctionnement

1.3. Restitution des données - approche lagrangienne

2. Erreurs de mesure et calibration

2.1. Maitrise des paramètres influençant la mesure

2.2. Étalonnage pour l'utilisation de *VIC-2D* et de *VIC-3D*

3. Organigramme et calcul des déformations

3.1. Calcul des déformations globales

3.2. Calcul des déformations locales

3.3. Méthode pour la détermination des directions principales de la déformation

Conclusion

Introduction

Dans ce chapitre, la technique de traitement d'image comme principal moyen de mesure expérimental a été particulièrement étudiée. Le principe et les méthodes de calcul, l'étalonnage du dispositif expérimental et la précision des mesures, ainsi que le traitement des résultats de mesure de la technique de traitement d'image sont expliqués en détail dans ce chapitre.

- La technique de CIN utilisée dans les essais de dessiccation contrôlée sert principalement à obtenir les champs de déplacement et de déformation de l'échantillon et donc à étudier le retrait et la fissuration de l'échantillon dus à la dessiccation.

- Pour les techniques de CIN-2D et CIN-3D, les calculs de corrélation des images reposent sur le choix de deux paramètres de calcul : *Subset* (le taille d'imagette) et *Step* (le pas de calcul). Des paramètres de calcul appropriés permettent d'améliorer la précision du calcul et de réduire le temps de traitement.

- Les résultats de la CIN sont affichés sous forme de cartographie (2D) et topographie (3D) et peuvent être exportés pour calculer la déformation globale de l'échantillon et déterminer les déformations locales (déformations verticales et déformations volumique locales).

- La qualité du mouchetis, l'uniformité de l'éclairage, l'influence de la vitre et d'autres influences sur la précision de mesure ont été optimisées par des essais de calibration. De même, des erreurs de mesure plus faibles ont été obtenues.

- À partir des résultats de déformations locales obtenus par la CIN, la valeur et la direction des déformations principales ont été calculées et traitées par le programme Matlab qui a permis de tracer la cartographie de la distribution des déformations principales, cette dernière ayant été utilisée pour déterminer le mécanisme d'initiation et de propagation des fissures.

1 Technique et fonctionnement de la Corrélation d'Images Numériques (CIN)

La technique de corrélation d'images numériques est une technique optique qui permet de quantifier et mesurer les déplacements d'objets en mouvement à partir d'images. Cette technique est de plus en plus employée en sciences des matériaux pour déterminer des champs de déformations, et détecter des fissures éventuelles. Cette technique permet également d'établir une moyenne de mesures sans contact, qui peut fournir des cartographies (2D ou 3D) des déplacements et des déformations locales.

1.1 Technique de CIN

Avec le développement des ordinateurs, de plus en plus puissants, et de l'acquisition d'images numériques, la technique CIN a fait son apparition dans les années 1980. Le groupe de chercheurs de *University of South Carolina* (Sutton et al., 1983, 1986) a été parmi les pionniers à utiliser la technique CIN dans le contexte de la mécanique des matériaux. Théoriquement, la technique CIN peut être étendue à tous les domaines de la mécanique des matériaux, et adaptée à beaucoup de matériaux à condition que les images enregistrées aient des variations d'intensité suffisantes et stables, et des correspondances uniques avec les points physiques sur la surface de l'échantillon (Pan, 2018).

Les techniques CIN qui ont émergé ces dernières années peuvent être classées en trois catégories principales : CIN bidimensionnelle (CIN-2D), CIN tridimensionnelle (CIN-3D) et Corrélation Volumique Numérique (en l'anglais : *Digital Volume Corrélation DVC*). Dans les études de cette thèse, les techniques CIN-2D et CIN-3D sont utilisées comme principales méthodes de mesure des champs des déplacements et des déformations.

Comme le montre la figure II.1, le système d'imagerie de la technique CIN-2D utilise une seule caméra numérique dont l'axe optique est perpendiculaire à la surface d'objet. Cela permet de mesurer la déformation sur le plan. L'éclairage doit fournir un champ de lumière uniforme, et adapté à la CIN car celle-ci est essentiellement une technique optique. L'acquisition des données et l'enregistrement d'images sont exécutés au moyen de programmes d'algorithme CIN. Lorsque la surface d'objet n'est pas plane, ou qu'une déformation 3D est obtenue après chargement, la technique CIN-2D a de fortes limitations. La technique CIN-3D permet dans une certaine mesure de palier à ces limitations.

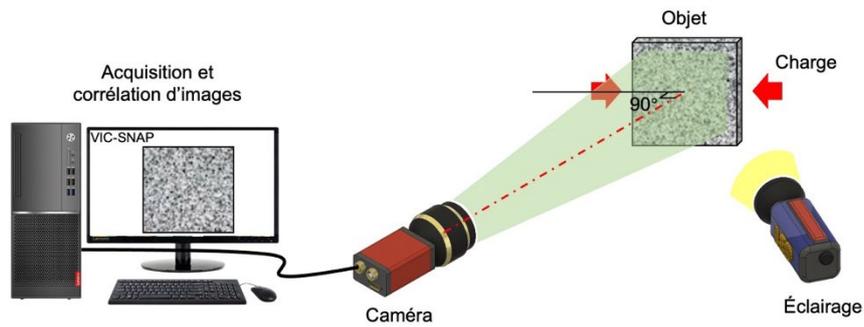


Figure II.1 : Schéma du système d'imagerie de CIN-2D.

Le système d'imagerie lié à la CIN-3D utilise deux caméras synchronisées (voir la figure II.2). La CIN-3D peut mesurer précisément la forme et la déformation plein champ des surfaces plane ou courbée, ce qui la rend plus utile et assez pratique dans certaines expériences délicates. En raison d'une deuxième caméra dans le système expérimental, il est nécessaire de maîtriser la position relative à respecter entre les deux caméras (par exemple la distance entre les caméras, l'angle entre les axes optiques etc.). Cette donnée est obtenue par une calibration rigoureuse du système, comme cela sera expliqué plus loin.

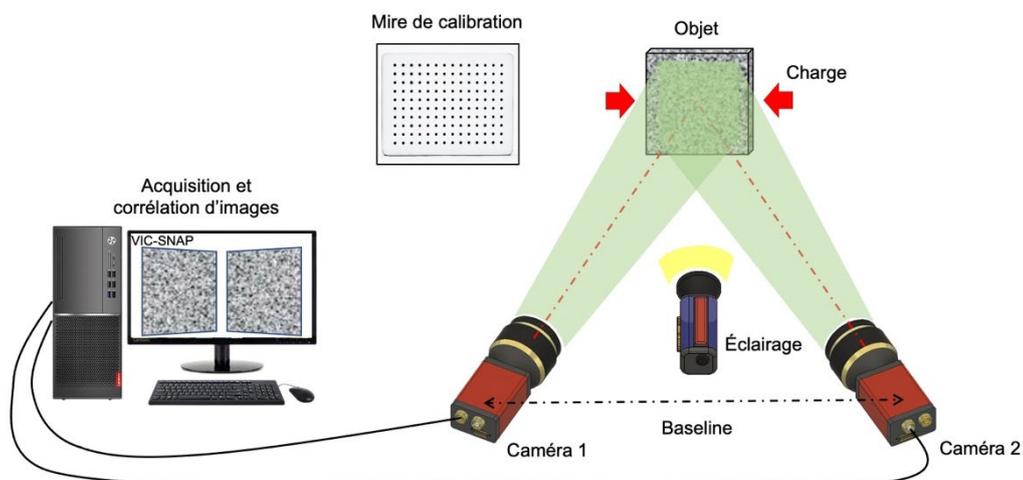


Figure II.2 : Schéma du système d'imagerie de CIN-3D.

En prenant comme exemple la CIN-2D, on peut décrire la mise en œuvre en quatre étapes : i) la calibration de la caméra ; ii) l'acquisition d'images ; iii) la corrélation d'images, vi) l'affichage des données. On trouvera dans la figure II.3 un schéma représentant les différentes étapes de la CIN-2D.

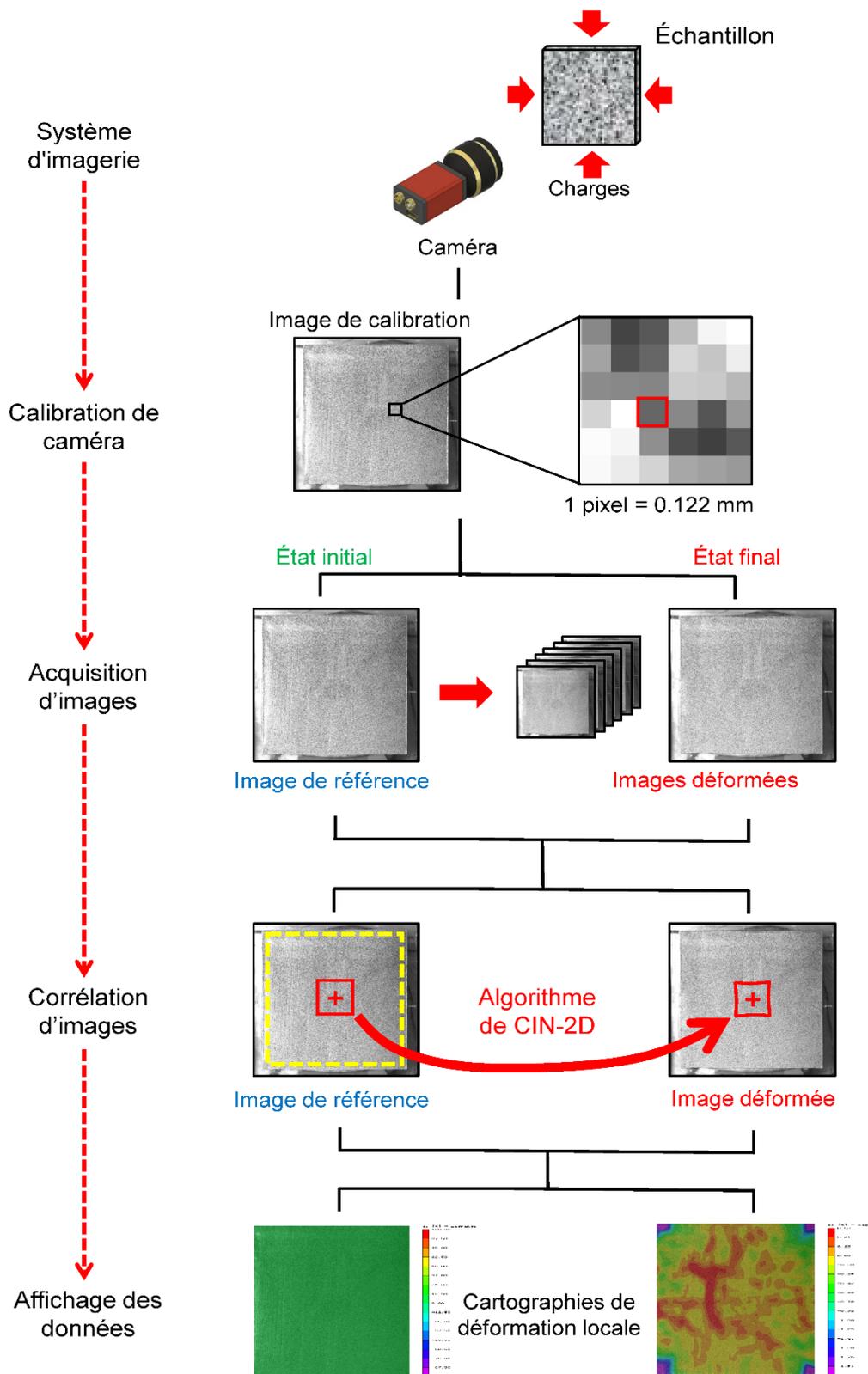


Figure II.3 : Procédure de mise en œuvre de la technique CIN-2D.

Dans la figure II.3 on présente un essai de CIN-2D issu d'une caméra dont la résolution (pixels effectifs) est de 4000X4000 pixels. La taille du domaine de la CIN sur la surface

supérieure de l'échantillon est de 1470X1470 pixels. Ainsi, on peut déterminer la taille (en mm) de chaque pixel en comparant la dimension de tout l'échantillon (en mm) avec sa taille en pixels sur l'image de référence (image 0). Par exemple, dans les essais réalisés pour les travaux de la thèse, l'unité d'un pixel est de 0,122 mm.

Afin d'obtenir les déplacements et les déformations pendant l'essai de dessiccation, un intervalle régulier du temps d'acquisition d'image doit être déterminé. La caméra prend une image de l'échantillon toutes les deux minutes, celle-ci est contrôlée par le logiciel d'acquisition d'images (*Vic-Snap*). Compte tenu de la faible vitesse de séchage de l'échantillon, quatre à six milles images sont acquises pour chaque essai.

La figure II.4 montre les étapes de la technique CIN-3D, similaires à la technique CIN-2D. Par rapport à la CIN-2D, la calibration des caméras est plus complexe. Un nombre important d'images est possible à acquérir, ce qui permet de stocker un grand nombre d'informations sur les déplacements en 3D, puis les exprimer sur des cartographies tridimensionnelles.

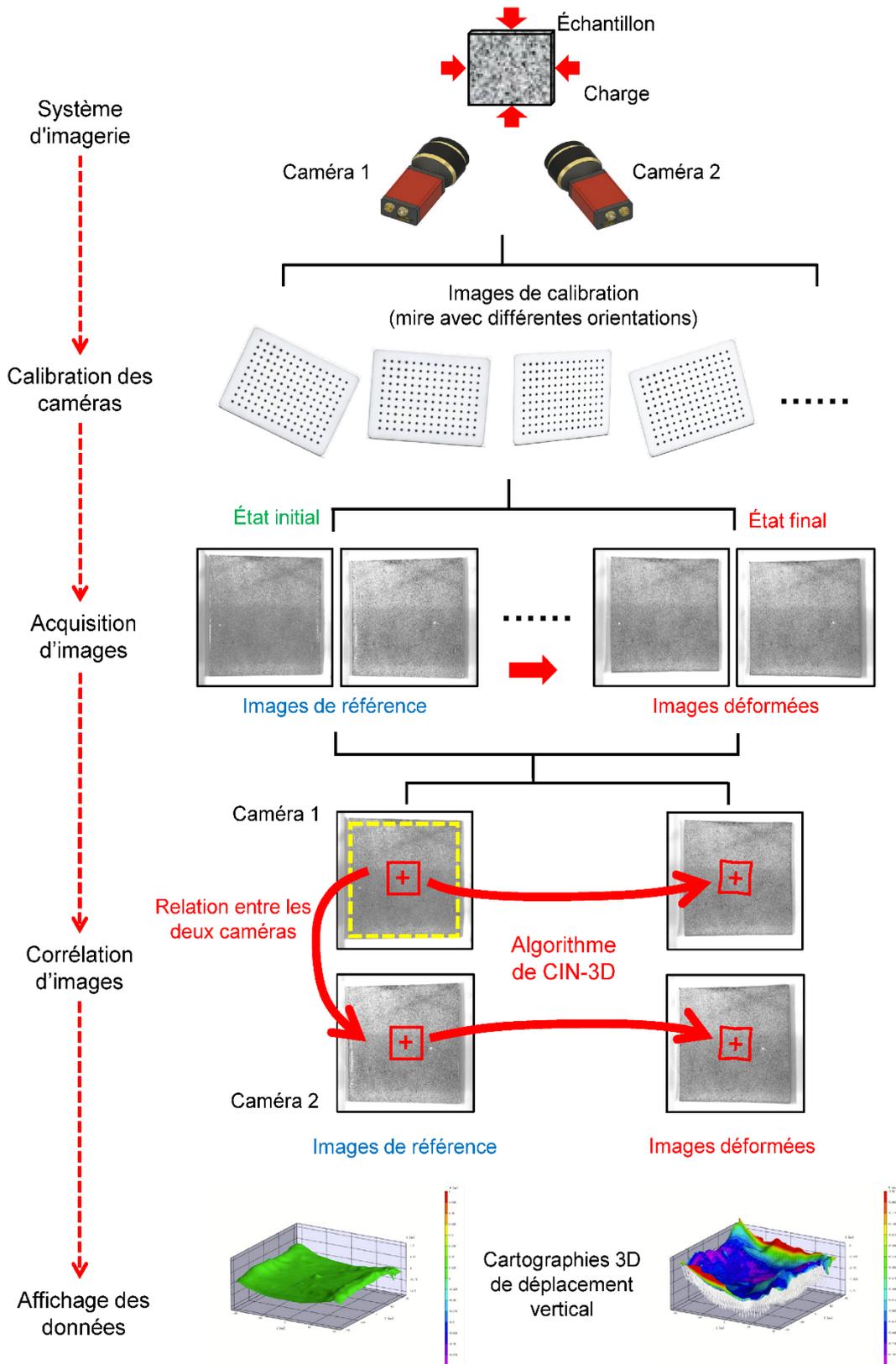


Figure II.4 : Procédures de mise en œuvre de la technique CIN-3D.

- Dispositif expérimental de CIN-2D

Dans les essais la CIN-2D est utilisée pour une mesure sans contact pour suivre le séchage contrôlé de l'argile. Le dispositif expérimental est représenté sur la figure II.5. Il est composé d'une caméra positionnée à la verticale de l'échantillon (ce qui permet de prendre des photos à intervalle de temps régulier), d'un éclairage photo LED, d'un PC pour sauvegarder puis traiter les données, et d'une enceinte hermétique (chambre de contrôle) pour réaliser la dessiccation.

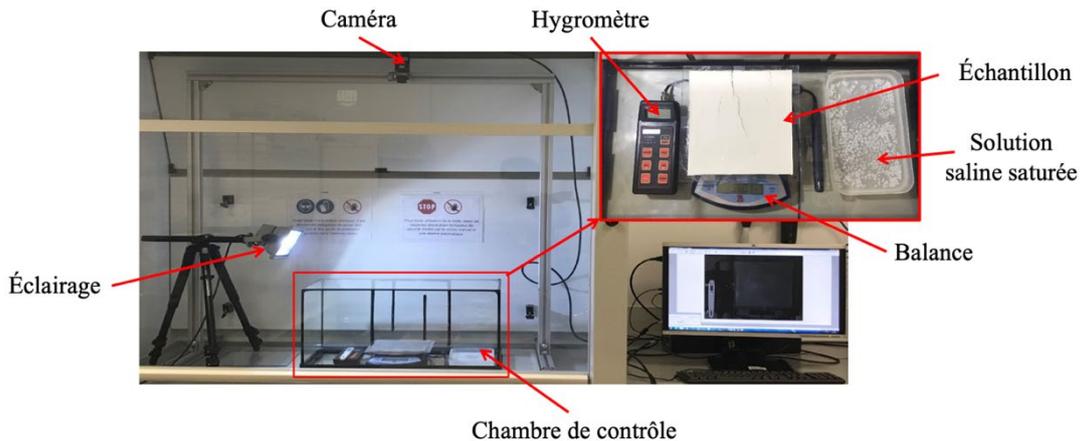


Figure II.5 : Système expérimental de la dessiccation contrôlée utilisant la technique CIN-2D.

L'échantillon d'argile est déposé à l'intérieur de l'enceinte, sur une balance numérique, en présence d'une solution saline qui permet de contrôler l'humidité relative et la succion. La masse de l'échantillon est mesurée d'une manière continue, l'humidité relative au sein de l'enceinte ainsi que la température sont également mesurées en continu.

- Dispositif expérimental de CIN-3D

Sur la base du dispositif expérimental 2D existant, le dispositif expérimental CIN-3D a été développé en ajoutant la deuxième caméra et améliorant le système d'éclairage. Cette installation vise à observer le déplacement dans la direction verticale. La figure II.6 présente le système expérimental CIN-3D utilisé dans les essais à dessiccation contrôlée.

Le développement du système expérimental présenté dans la figure II.6 consiste en :

- Un système d'imagerie de deux caméras positionnées à la verticale de l'échantillon, ce qui permet de prendre deux images simultanément et à intervalle de temps régulier.
- Un système d'éclairage photos, installé de part et d'autre de l'échantillon assurant un champ uniforme de lumière et adapté aux deux caméras.

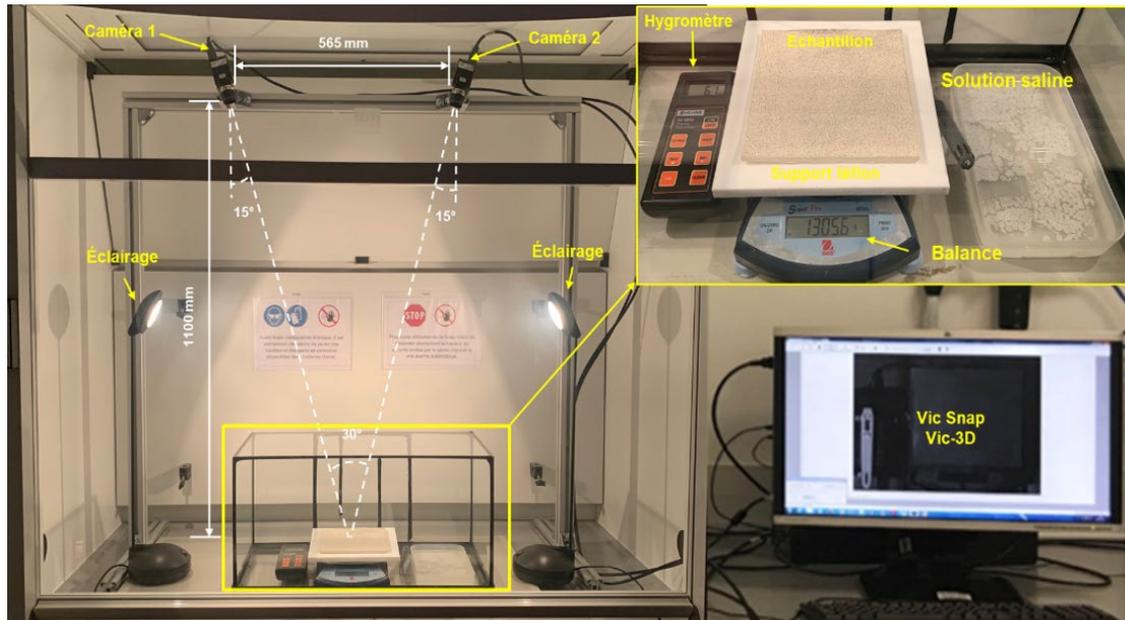


Figure II.6 : Dispositif expérimental de la technique CIN-3D.

1.2 Principe et fonctionnement

La technique CIN comporte deux parties, une partie liée à la technique de mesure et qui concerne l'acquisition des images décrite précédemment, et une partie liée à la méthode de calcul de la corrélation appliquée dans cette thèse.

Le calcul de la corrélation est réalisé par des algorithmes de la CIN permettant de quantifier les déplacements observés dans les images stockées. Il existe différents algorithmes plus ou moins adaptés selon les matériaux à tester et selon l'exigence de l'expérimentation (aspects multi-échelle de la déformation, vitesse de déformation, exigence en haute précision etc.). Aujourd'hui des algorithmes en open-source existent, ainsi que des logiciels commerciaux tels que *VIC-2D* et *VIC-3D* utilisés dans le cadre de cette thèse.

Tous ces algorithmes suivent le même principe qui consiste à sauvegarder les images numériques de la surface d'échantillon avant et après déformation. Il est ensuite possible de calculer le mouvement de chaque point détecté, en comparant les images dans deux états de déformation différents. Dans ce qui suit, la CIN-2D sera utilisée comme exemple pour introduire les principes de la technique CIN.

- Le mouchetis (Speckle Pattern)

La CIN peut calculer le champ des déplacements entre deux images en exploitant leur texture (Sutton et al., 1983). La texture doit faire apparaître des niveaux de gris suffisamment contrastés pour que la CIN puisse être réalisée. L'objet peut être observé sans traitement si sa texture naturelle est discernable par des niveaux de gris évidents, et

bien distribués. Si l'objet ne présente pas de texture contrastée, ou possède une texture non-adaptée à la CIN, un traitement est nécessaire par l'application d'un mouchetis sur la surface à observer. Le mouchetis permet alors à la CIN de détecter les mouvements de cette surface. L'argile utilisée nécessite le traitement par un mouchetis. La peinture aérosol apparaît comme un traitement efficace et bien adapté à ce genre de matériau.

Nous savons que la densité et la taille des taches formant le mouchetis influencent l'analyse. Il est donc nécessaire de procéder à une calibration de nos essais, liée aux propriétés du mouchetis. On peut voir dans la figure II.7 un exemple d'échantillon d'argile sans mouchetis et avec mouchetis.

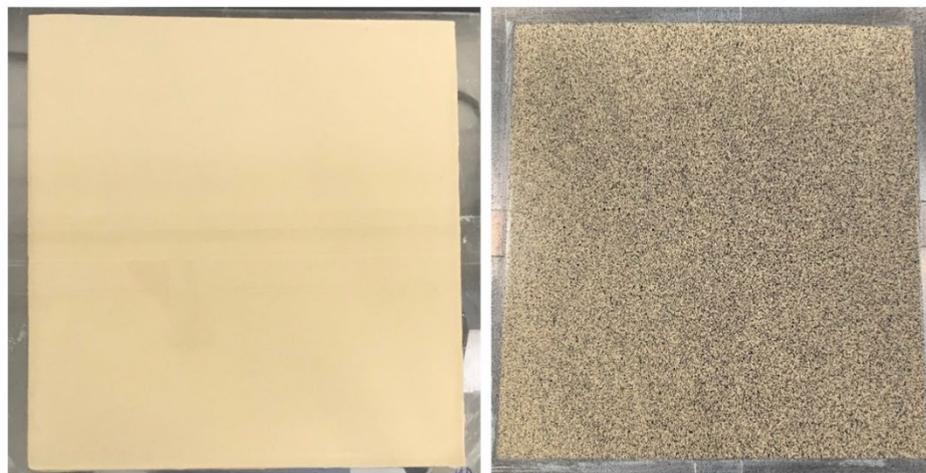


Figure II.7 : Échantillon d'argile sans et avec mouchetis.

- Détection de mouvement dans les images

En CIN-2D la méthode repose sur un algorithme qui consiste à appairer des points dans deux images successives en procédant point par point. L'une des deux images sera considérée comme l'image de référence, elle est stockée comme un zéro de l'échantillon. La seconde image est appelée image déformée, et sert à approcher l'état déformé de l'échantillon entre l'état zéro et l'état déformé.

Dans le principe d'imagerie par les capteurs d'images CCD ou CMOS, les images numériques sont composées de pixels, chaque pixel a un niveau de gris donné évoluant par exemple entre 0 et 255 (image noire et blanc encodée 8bit). Afin de retrouver un point dans une image, [Horn et Schunck \(1981\)](#) ont proposé une hypothèse appelée conservation des niveaux de gris, qui considère que les niveaux de gris autour d'un point ne varient pas entre deux prises de vue. Ce principe de base de la technique de CIN, est illustré dans la figure II.8 qui montre la détection et le suivi d'un point dans une image.

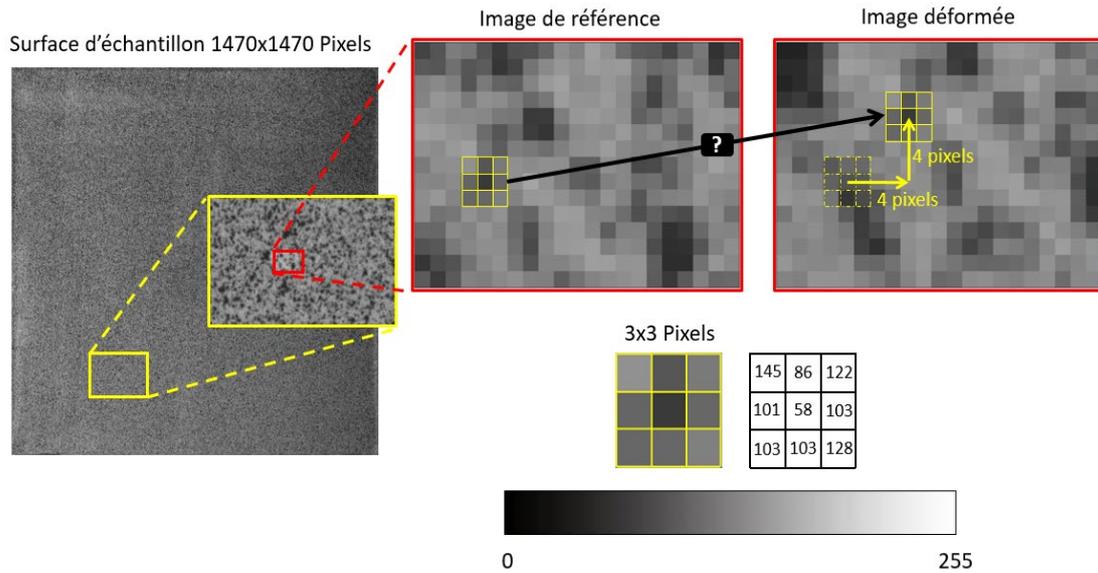


Figure II.8 : Détection et suivi du mouvement des pixels et des niveaux de gris.

Le niveau de gris de chaque pixel peut être lu par l'algorithme de corrélation. Une zone en taille de 3 x 3 pixels autour du point considéré est sélectionnée. Cette zone se distingue par les niveaux de gris de tous les pixels qu'elle contient. L'algorithme de corrélation suivra alors cette zone, et le mouvement de cette zone sera considéré comme le déplacement du point au centre de la zone. L'illustration de la figure II.8 montre que le point détecté s'est déplacé de 4 pixels vers la gauche et de 4 pixels vers le haut dans l'image déformée. Le calcul des déplacements est basé sur cette méthode de détection des pixels ; le principe sera décrit dans la section suivante.

- L'imagerie (Subset) et le pas (Step)

Dans l'image de référence, une zone d'analyse doit être sélectionnée dans un premier temps sur la surface à observer. Cette zone d'analyse doit autant que possible couvrir toute la surface mouchetée, pour acquérir le plus d'informations possibles permettant de calculer les déplacements. Les points de mesure dans la zone d'analyse forment une grille virtuelle sur l'image de référence comme représentée dans la figure II.9. Les déplacements sont alors calculés en chaque point de grille.

En chaque point de mesure, un sous-ensemble de l'image centrée au point de mesure est choisi dans l'image de référence. Ce sous-ensemble comprend une variation plus large de niveaux de gris se distinguant des autres sous-ensembles et peut être identifié uniquement dans l'image déformée. Ces sous-ensembles de forme carrée sont appelés imagerie (cadre rouge dans la Fig.II.9). Le point de mesure, qui est aussi le point central de l'imagerie, est représenté par des coordonnées dans le repère de l'image de référence. L'algorithme de la CIN cherchera à retrouver la position de chaque point sur l'image de l'état déformé, en confrontant leurs niveaux de gris.

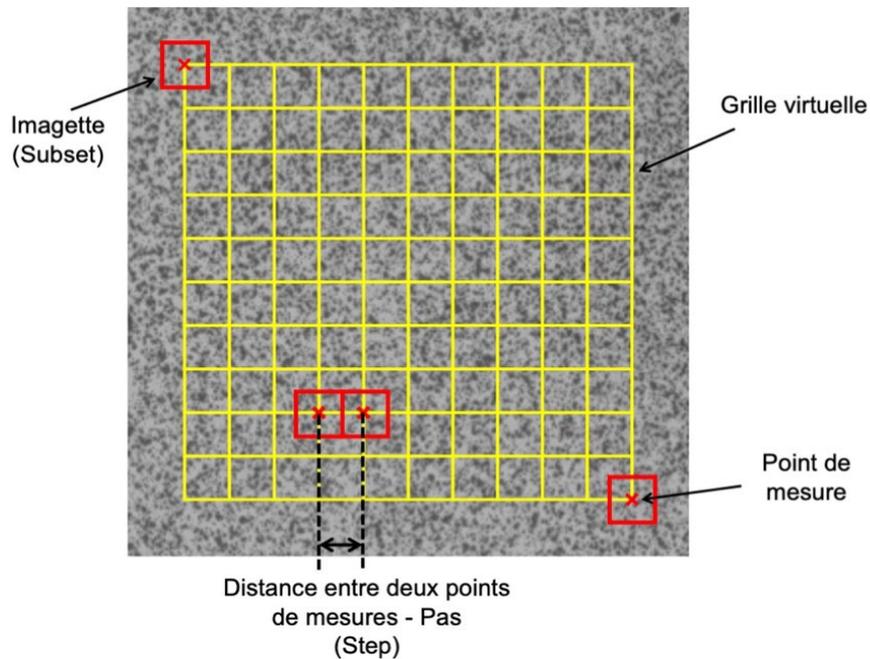


Figure II.9 : Image de référence - Le carré rouge est l'imagette utilisée pour suivre le mouvement du point de mesure, les points d'intersection sur la grille jaune sont les points de mesure.

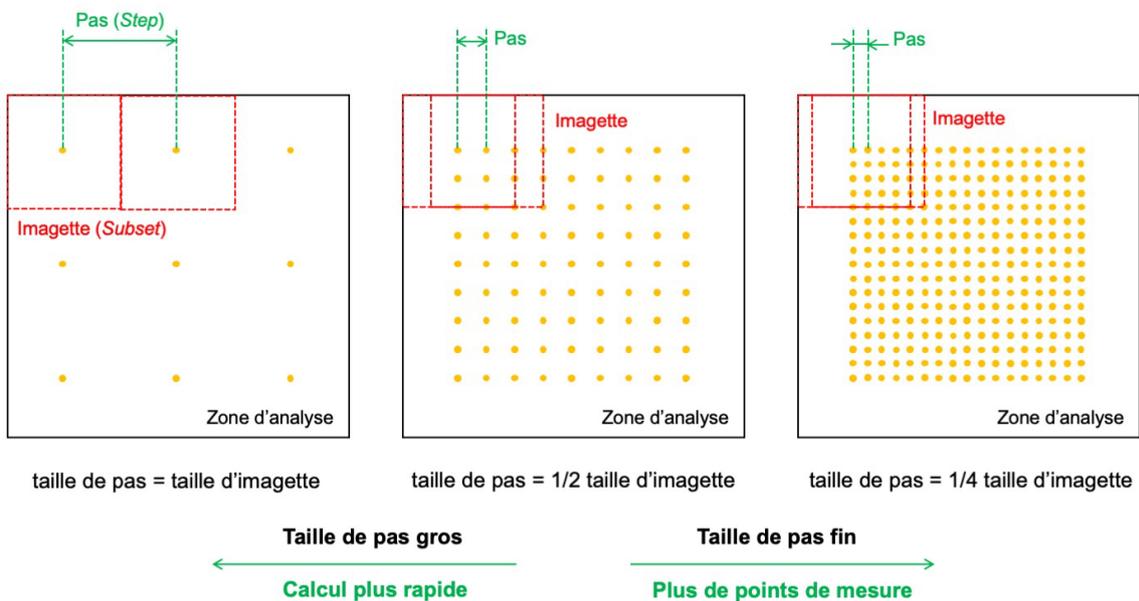


Figure II.10 : Taille de pas et résolution spatiale.

Le pas (en anglais : *Step*) est le deuxième paramètre important à introduire pour le calcul dans la CIN. Le *Step* représente la distance en pixels entre les centres de l'imagette (Fig. II.10). Plus le *Step* est petit plus il génère de points de mesure, et donc une résolution spatiale plus élevée. La figure II.10 montre une gamme possible de *Step* pour la même

zone d'analyse et la même taille d'imagette.

- Formulation du problème de CIN

On considère qu'un domaine (zone d'analyse) Ω a subi une déformation $y : \Omega \subset \mathbb{R}^n, (n = 2, 3)$. X représente la position référence de l'image non déformée et $y(X)$ représente la position de l'image déformée. Le mouchetis a des niveaux de gris $f(X)$ dans l'image référence et niveaux de gris $g(y)$ dans l'image déformée (Fig. II.11). Si la déformation conserve les niveaux de gris alors la relation suivante est valable :

$$f(X) = g(y(X)) \quad \text{Eq. II. 1}$$

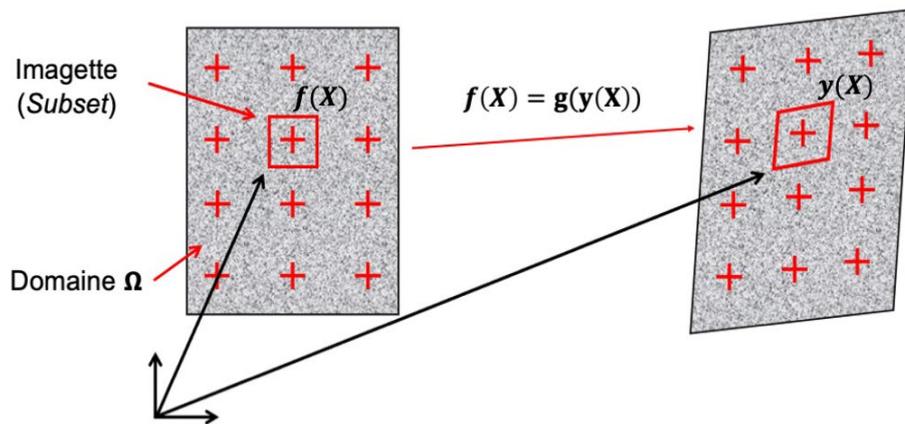


Figure II.11 : Représentation schématique du principe de la CIN.

Le problème de la CIN est un problème inverse qui consiste à trouver la déformation $y(X)$ qui correspond aux niveaux de gris $f(X)$ et $g(X)$. Le principe de la CIN consiste à minimiser un coefficient de corrélation C représentant la corrélation du niveau de gris dans le domaine observé avant et après la déformation. Lorsque C atteint la valeur minimale, on considère que la déformation correspondante est la déformation du domaine y . L'expression Eq. II.2 donne le coefficient C qui est sous la forme :

$$C = \int_{\Omega} |f(X) - g(y(X))|^2 dX \quad \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n \quad \text{Eq. II. 2}$$

Les images à corrélérer doivent être normalisées en raison d'éventuels problèmes liés aux essais tels que l'éclairage etc. Un exemple simple de normalisation des images consiste à faire en sorte que les deux images du traitement aient la même moyenne et la même déviation standard :

$$f(X) \mapsto \frac{f(X) - \bar{f}}{\sigma_f}, \quad g(y) \mapsto \frac{g(y) - \bar{g}}{\sigma_g} \quad \text{Eq. II. 3}$$

D'où \bar{f} , \bar{g} sont les valeurs moyennes et σ_f , σ_g sont les déviations standards (Pan et al., 2010). Grace à la normalisation des images, la minimisation du coefficient de corrélation C est équivalent à la maximisation de la corrélation croisée :

$$\int_{\Omega} f(X)g(y(X))dX \quad \text{Eq. II. 4}$$

En pratique, il existe différentes manières d'effectuer la corrélation. On peut prendre une série d'images au fur et à mesure de la déformation et faire la corrélation entre des images successives, ou bien corréler la première image (image de référence) à chaque image déformée devant être traitée. Dans le cas de petites déformations, la corrélation incrément entre les images facilite la convergence des résultats et réduit les erreurs individuelles, mais il peut conduire à l'accumulation d'erreurs systémiques et augmenter le temps de calcul.

- La CIN pour l'analyse locale basée sur les imagerie

La méthode de la CIN locale basée sur des imagerie est l'algorithme le plus utilisé dans les programmes de la CIN, par exemple VIC-2D. La méthode consiste à diviser la surface à observer, qui est une image, en imagerie locales, puis procéder à la corrélation dans chaque imagerie (voir la figure II.11). Ainsi, on divise la zone d'analyse en un nombre fini d'imagerie $\Omega = \cup_i D_i$, puis on prend comme hypothèse que la déformation est une translation rigide \square ou une translation affine \square de l'imagerie.

$$y(X) = X + u(X) = X + \sum_i (u_i) \chi_i(X) \quad (\text{Translation rigide } \square) \quad \text{Eq. II. 5}$$

$$y(X) = X + u(X) = X + \sum_i (u_i + F_i(X - X_{i0})) \chi_i(X) \quad (\text{Translation affine } \square) \quad \text{Eq. II. 6}$$

D'où D_i représente l'imagerie (sous forme d'un domaine); u_i est le vecteur de translation du centre d'imagerie D_i ; F_i est le tenseur de déformation affine; X_{i0} sont les coordonnées du centre de chaque imagerie Ω_i ; χ_i est la fonction caractéristique.

$$\chi_i = \begin{cases} 1 & X \in \Omega_i \\ 0 & X \notin \Omega_i \end{cases} \quad \text{Eq. II. 7}$$

Dans l'hypothèse de translation affine le problème est de minimiser C_i (Eq. II.8) de chaque imagerie D_i . Ainsi C_i peut être décrit par l'expression suivante :

$$C_i = \int_{D_i} \left(f(X) - g \left(X + u_i + (F_i(X - X_{i0})) \right) \right)^2 dX \quad \text{Eq. II.8}$$

Le problème sera ensuite de trouver la déplacement u_i et la déformation F_i de chaque imagerie. Il existe des méthodes mathématiques pour résoudre ce problème, notamment la méthode Gauss-Newton (Besnard et al., 2012) et la méthode Levenberg-Marquardt (Cheng et al., 2002). Étant donné que les problèmes ici sont découplés, c'est-à-dire que le calcul peut être réalisé dans chaque imagerie D_i indépendamment, la CIN locale basée sur les images devient rapide et facilement parallélisé.

En pratique, les images peuvent se chevaucher. Vu que chaque image est calculée indépendamment, on peut obtenir des résultats avec une certaine marge d'erreur. De ce fait, le résultat de la corrélation devient sensible à la taille des images et à la distance entre les points centraux des images voisines.

- Le traitement par la CIN globale basé sur les éléments finis

Contrairement à la méthode CIN locale expliquée précédemment la méthode CIN globale est basée sur les éléments finis. Dans cette méthode, on représente la déformation globale à l'aide d'un ensemble d'éléments ; la compatibilité et la continuité de déformation sont par conséquent automatiquement pris en compte. Le schéma (Fig. II.12) montre la différence entre la CIN locale et la CIN globale.

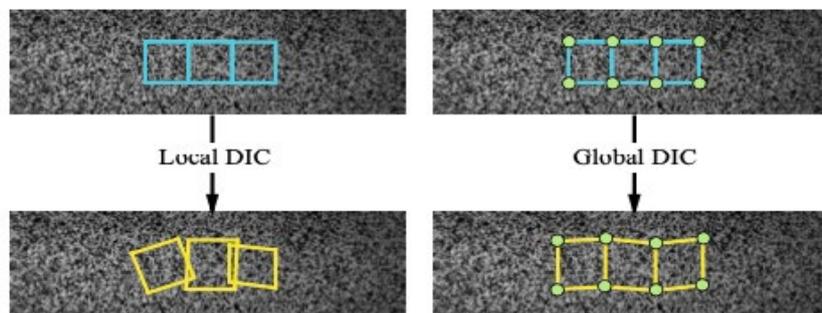


Figure II.12 : Les principes de la CIN locale et de la CIN globale par Yang et Bhattacharya (2019)

En admettant que le champ des déplacements est continu dans le domaine Ω , Besnard et al. (2012) proposent de décomposer le champ des déplacements noté $u(X)$ en utilisant des fonctions de base de la méthode d'éléments finis :

$$y(X) = X + u(X) = X + \sum_p u_p N_p(X) \quad \text{Eq. II.9}$$

$N_i(X)$ représente les fonctions de forme des éléments finis (exemple des éléments

quadrilatères Q4), u_p sont les degrés de liberté associés. Le problème de corrélation s'exprime par Eq. II.10 et devient :

$$C_{glob} = \int_{\Omega} \left(f(X) - g \left(X + \sum_p u_p N_p(X) \right) \right)^2 dX \quad \text{Eq. II. 10}$$

La méthode itérative de Newton est appliquée pour résoudre ce problème numériquement :

$$\delta u = u^{k+1} - u^k \quad \text{Eq. II. 11}$$

Où δu représente la différence entre le résultat du déplacement u^i (itération actuelle) et celui de u^{i+1} (itération suivante). Avec l'approximation de développement de Taylor du premier ordre :

$$g(y(X)) = g(X + u^k(X) + \delta u) \approx g(X + u^k(X)) + \nabla g \cdot \delta u(X) \quad \text{Eq. II. 12}$$

Donc

$$C_{glob} \approx \int_{\Omega} \left(f(X) - g(X + u^k(X)) - \left(\sum_p \delta u_p N_p(X) \right) \cdot \nabla g(X) \right)^2 dX \quad \text{Eq. II. 13}$$

Pour calculer itérativement le déplacement, la CIN globale (Eq. II.14), s'écrit de la manière suivante :

$$M_{pq} \delta u_q = b_p \quad \text{Eq. II. 14}$$

M_{pq} est la matrice de corrélation, δu_q sont les déplacements nodaux et b_p le vecteur du second membre.

D'où

$$M_{pq} = \int_{\Omega} N_p^T(X) (\nabla g) (\nabla g)^T N_q(X) dX \quad \text{Eq. II. 15}$$

$$b_p = \int_{\Omega} \left(f(X) - g(X + u^k(X)) \right) N_p^T(X) \nabla g(X) dX \quad \text{Eq. II. 16}$$

Notons que le calcul (Eq. II.16) est lié à la fonction de forme des éléments et à la taille de la discrétisation par éléments. Pour une précision élevée de la mesure, le temps de calcul devient important.

1.3 Restitution des données- approche lagrangienne

Le logiciel *VIC-2D* capture une série d'images de la surface de l'échantillon au cours de la déformation par séchage de l'échantillon d'argile. La surface de l'échantillon est au préalable traitée par un mouchetis.

L'image de référence est prise avant le séchage à l'état initial de l'échantillon (Fig. II.13). Tous les déplacements et les déformations sont calculés par rapport à cette image de référence (appelée image-0000).



Figure II.13 : Image de référence, zone AOI et le système de coordonnées de Lagrange dans le logiciel *VIC-2D*.

Les paramètres sélectionnés pour notre calcul de la CIN sont : i- la taille de l'imagette (de 11 pixels) et ii- la taille du pas (de 5 pixels). Grâce à ces deux paramètres 82369 points de mesure sont calculés.

Tous les points à observer sont précisés par leurs coordonnées uniques, dans le système de coordonnées (x-y) comme on peut le voir sur la figure II.13. Le centre de l'échantillon représente l'origine (0,0) du repère. On peut noter que l'unité des coordonnées est le pixel, mais avec la calibration de *VIC-2D* on peut passer du pixel au système métrique (avec par exemple 1 pixel = 0,122 mm dans nos cas d'essais).

Ainsi, les coordonnées exprimées en mm sont attribuées à chaque point à observer, et

enregistrées dans les colonnes A et B d'un fichier *Excel* exporté.

La figure II.14 montre un exemple de données stockées dans un fichier *Excel* concernant les déplacements d'un axe transversal noté V . Les deux premières colonnes A et B du tableau stockent les coordonnées suivant les axes x et y de chaque point. La colonne C est l'image de référence notée v0000.

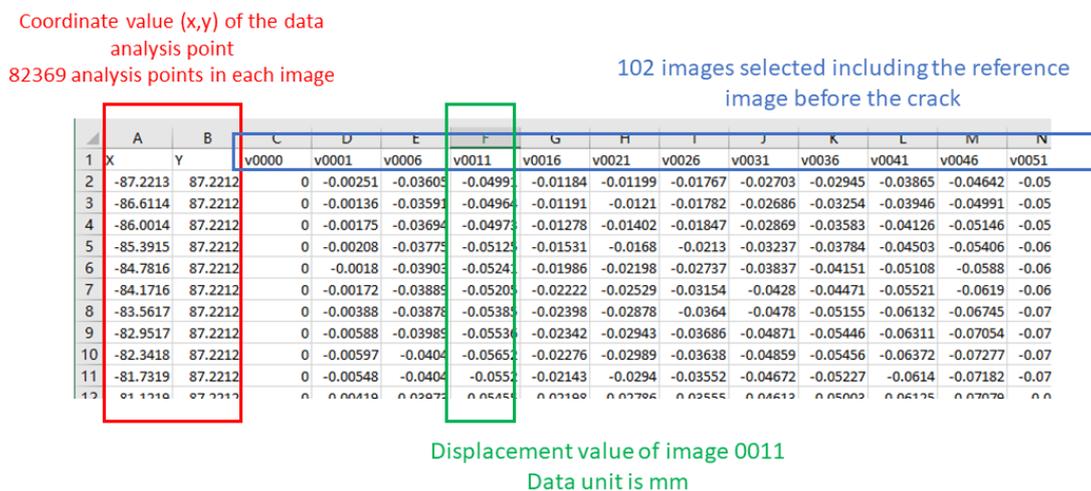


Figure II.14 : Exemple de données sous forme fichier *Excel* exportées par logiciel *VIC-2D*.

A partir de la colonne C, chaque colonne de données enregistre la valeur du déplacement v correspondant à chaque point de mesure dans chaque image sélectionnée. Par exemple, l'image encadrée en vert sur la figure II.4, notée v0011, stocke les déplacements des points de coordonnées correspondantes aux valeurs sur les colonnes A et B.

Dans cet exemple, nous avons 102 images représentatives, dont l'image de référence, qui permettent l'analyse des données.

Dans le logiciel *VIC-3D*, tous les déplacements sont obtenus dans un système de coordonnées lagrangiennes. On utilise l'option *AUTO-PLANT FIT* pour créer automatiquement ce système de coordonnées basé sur la forme de la zone à analyser prise sur l'image de référence. L'origine du repère sera prise au centre de la zone.

Il est possible de représenter la topographie 3D de la surface à analyser, à partir des coordonnées de tous les points de la surface. La représentation de l'état initial (image de référence 0000) est faite par rapport à un plan horizontal ($Z = 0$ Plan XY) comme on peut le voir sur figure II.15. Dans cet exemple les couleurs expriment l'altitude des points de la surface supérieure de l'échantillon. Les points supérieurs du plan ($Z = 0$ Plan XY) sont représentés par des valeurs de Z positives (par exemple le point $P1$ sur la figure II.15 avec $Z = 0,43 \text{ mm}$), les points inférieurs du plan ($Z = 0$ Plan XY) sont représentés par des valeurs de Z négatives (par exemple le point $P2$ sur la figure avec $Z = -0,22 \text{ mm}$).

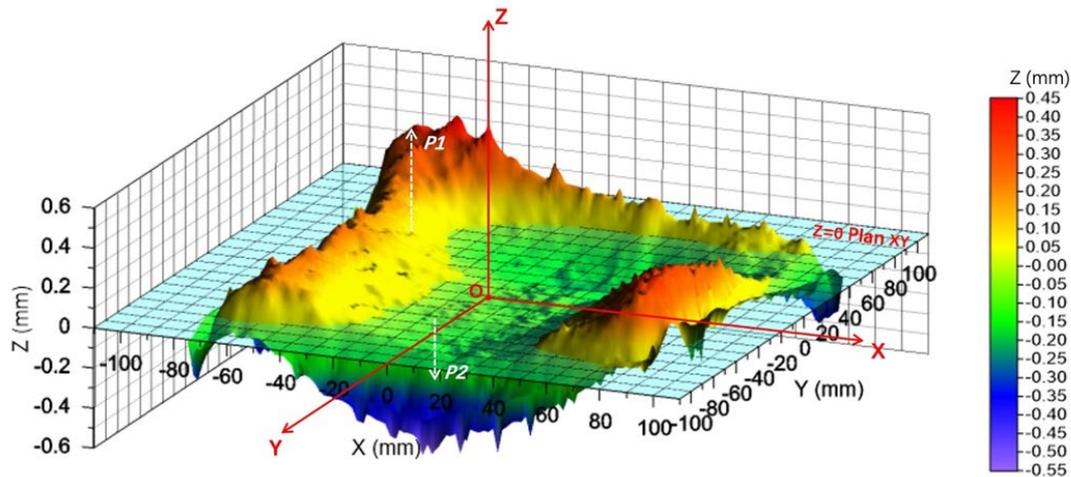


Figure II.15 : Système de coordonnées et plan adapté pour la représentation des données VIC-3D.

2 Erreurs de mesure et calibration

Comme expliqué précédemment, la méthode de la CIN s'attache à retrouver des motifs entre l'image référence et l'image déformée. Le mouchetis, appelé aussi texture, en surface de l'objet joue un rôle majeur pour la corrélation, mais il est aussi rattaché à une incertitude de mesure. On peut aussi noter que d'autres aspects liés au dispositif expérimental et l'algorithme de CIN sont également des sources d'erreurs pour la mesure.

En résumé, les principaux paramètres qui influencent la précision de mesure, et génèrent des erreurs de mesures sont les suivants : i- la qualité du mouchetis, ii- la taille de l'imagette, iii- la calibration des caméras, vi- le bruit numérique du capteur et l'algorithme de CIN.

2.1 Maitrise des paramètres influençant la mesure

2.1.1 Choix du mouchetis

Pour qu'un point soit reconnu sur la surface à observer, il faut une texture qui permet de reconnaître la zone autour du point de mesure. Les deux paramètres permettant cela sont le mouchetis et la zone qui est ici sous forme d'imagette. Un mouchetis de bonne qualité doit être aléatoire, avec des taches dont la taille est adaptée à la mesure à réaliser.

Afin de trouver le mouchetis le plus approprié, on a utilisé les échantillons avec différentes densités de mouchetis, et imposé des déplacements et rotations maîtrisés à l'ensemble au moyen d'une platine de positionnement (voir Figure II.16).

Les quatre configurations des mouvements imposés sont présentées dans la figure II.17. Ainsi, le déplacement du bloc est imposé par la platine d'une part, et d'autre part mesuré au moyen de la CIN. La déformation locale peut être déduite des données de CIN. La déformation du bloc devant être nulle, le meilleur mouchetis doit correspondre à des déformations locales les plus proches possibles de 0.



Figure II.16 : Platine de positionnement.

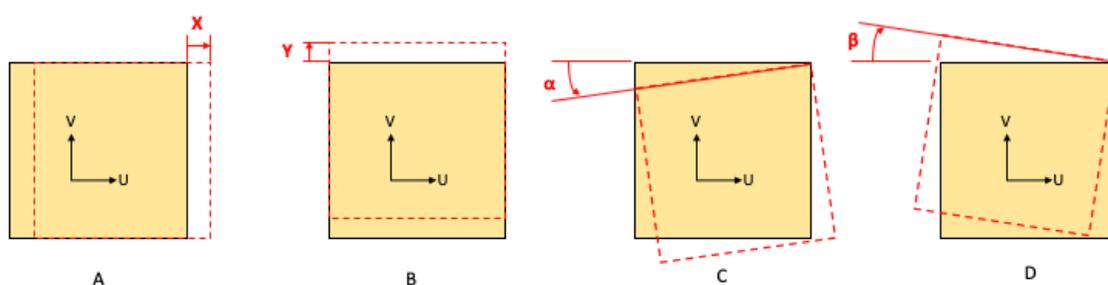


Figure II.17 : Déplacement et rotation imposés à l'ensemble de l'échantillon.

Dans notre calibration des mouchetis, quatre types ont été testés. La figure II.18 présente quatre images en noir et blanc d'échantillons avec des mouchetis de différentes densités. Les échantillons testés pour ces calibrations ont les mêmes propriétés que les essais de séchage analysés dans cette thèse (même taille ...).

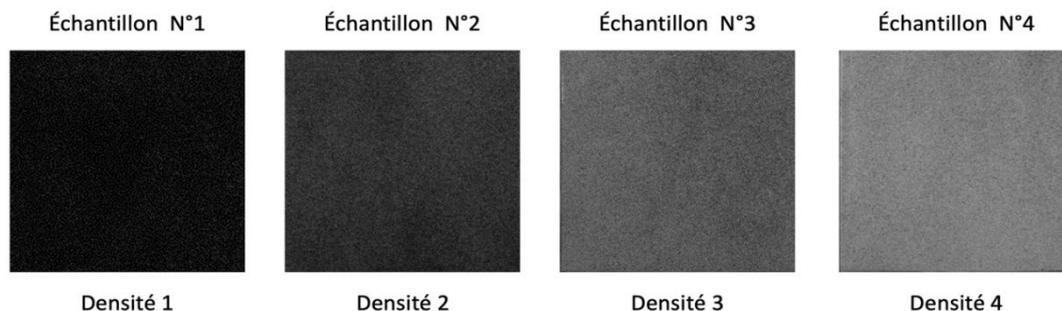


Figure II.18 : Échantillons avec différentes densités de mouchetis.

Le tableau II.1 présente les résultats sous forme de valeurs maximales et minimales des déplacements et des déformations mesurés par le logiciel VIC-2D.

Tableau II.1 : Mesures de déplacements et déformations locaux avec différentes densités de mouchetis.

Configuration	Densité	Déplacements imposés		Rotations imposées		Déplacements mesurés		Déformations mesurées		
		X (mm)	Y (mm)	α (°)	β (°)	U (mm)	V (mm)	ϵ_{xx} (%)	ϵ_{yy} (%)	ϵ_{xy} (%)
A	1	2	0	/	/	1,81	0,04	0,14	0,14	0,09
						1,75	-0,03	-0,16	-0,13	-0,12
	2	2	0	/	/	1,98	0	0,06	0,05	0,04
						1,95	-0,03	-0,04	-0,04	-0,04
	3	2	0	/	/	1,73	0,02	0,12	0,1	0,08
						1,77	-0,02	-0,09	-0,09	-0,07
	4	2	0	/	/	2,1	0,03	0,1	0,09	0,07
						2,04	-0,03	-0,12	-0,12	-0,08
B	1	0	2	/	/	0	2,18	0,13	0,17	0,09
						-0,01	2,18	-0,15	-0,13	-0,11
	2	0	2	/	/	0	1,89	0,09	0,06	0,05
						0	1,88	-0,05	-0,05	-0,04
	3	0	2	/	/	0	2,06	0,08	0,08	0,05
						-0,01	2,07	-0,08	-0,07	-0,06
	4	0	2	/	/	0	1,76	0,11	0,09	0,08
						0	1,76	-0,12	-0,13	-0,09
C	1	/	/	3	/	/	/	0,17	0,17	0,12
								-0,16	-0,13	-0,11
	2	/	/	3	/	/	/	0,08	0,07	0,04
								-0,06	-0,05	-0,05
	3	/	/	3	/	/	/	0,07	0,08	0,08
								-0,19	-0,18	-0,09
	4	/	/	3	/	/	/	0,12	0,11	0,09
								-0,12	-0,11	-0,1
D	1	/	/	/	3	/	/	0,15	0,16	0,1
								-0,15	-0,15	-0,1
	2	/	/	/	3	/	/	0,06	0,05	0,04
								-0,07	-0,07	-0,05
	3	/	/	/	3	/	/	0,08	0,08	0,05
								-0,08	-0,11	-0,06
	4	/	/	/	3	/	/	0,12	0,15	0,09
								-0,17	-0,1	-0,1

Les résultats montrent que les déformations ε_{xx} , ε_{yy} et ε_{xy} avec le mouchetis de densité 2 sont les plus faibles quelle que soit la configuration, ces valeurs sont représentées en rouge dans le tableau II.1. Les différentes configurations *A*, *B*, *C* et *D* sont liées aux mouvements imposés par la platine.

Les déplacements de la platine dans les deux directions transversale ($X = 2$ mm, pour la configuration *A* en figure II.17) et longitudinale ($Y = 2$ mm, pour la configuration *B* en figure II.17) sont très proches de ceux mesurés par le logiciel *VIC-2D*. Nous pouvons voir, en comparant le mouvement de la platine et les déplacements restitués par *VIC-2D*, que l'erreur est inférieure à 0,05 mm. (voir les valeurs en bleu dans le tableau II.1).

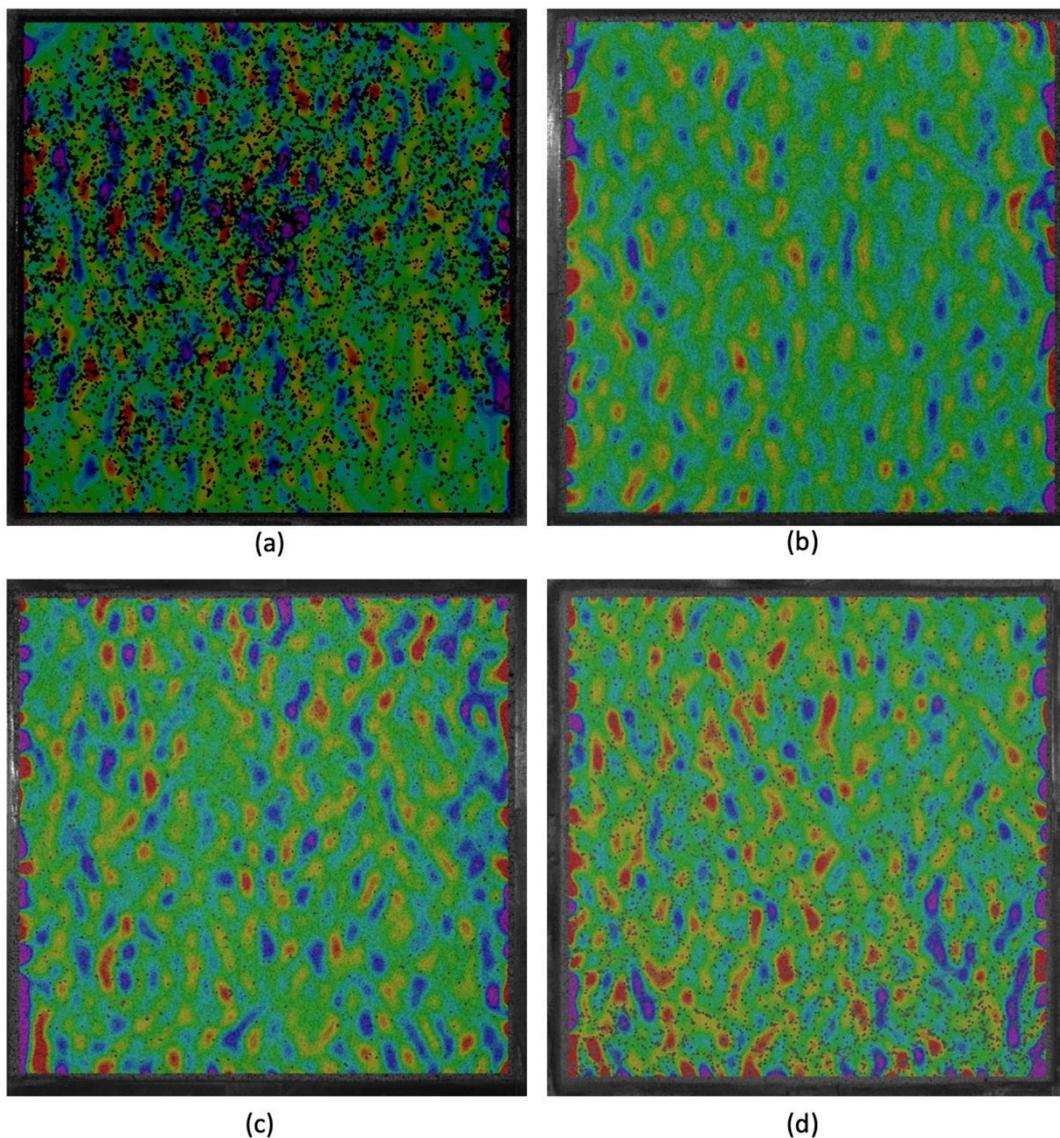


Figure II.19 : Exemples de champ de déformations ε_{xx} avec différents types de mouchetis.

La figure II.19 montre sur le champ de déformations longitudinales ε_{xx} les cartographies par différents types de mouchetis. Ces images ont été traitées avec *VIC-2D* avec un *Subset* de 11 pixels et un *Step* de 5 pixels. Les résultats montrent que la densité de

mouchetis la plus forte (Fig. II.19 a), et celle qui est la plus faible (Fig. II.19 d) toutes deux mènent à des points non-corrélés (points noirs) sur la cartographie. Une bonne densité de mouchetis permet de minimiser l'apparition des points non-corrélés (Fig. II.19 b).

Cette étude a permis de montrer que le mouchetis de densité 2 est le plus approprié à la taille de l'échantillon et au dispositif expérimental utilisés pour nos essais.

2.1.2 Taille de l'imagette (*Subset*) et taille de pas (*Step*)

Nous avons vu précédemment que la taille des imagettes agit sur l'incertitude de la mesure du déplacement des points par exemple. Le nombre de points à observer dans l'image est lui-même fonction de la taille des imagettes. Ainsi, plus l'imagette est grande plus elle va contenir d'informations sur lesquelles le calcul s'appuiera pour déterminer le déplacement moyen. Dans ce cas, l'erreur de discrétisation augmente. Inversement, plus l'imagette est petite plus le champ possède une résolution spatiale fine, mais on augmente l'erreur sur le déplacement des imagettes. Il y a donc à optimiser les propriétés de l'imagette, celles qui devront permettre de minimiser au mieux l'erreur et d'obtenir la meilleure résolution possible.

Le logiciel *VIC-2D* contient deux paramètres liés aux propriétés de l'imagette, le *Subset* et le *Step*. La paramètre *Subset* concerne la taille de l'imagette qui permet de suivre le déplacement entre les images. La paramètre *Step* contrôle le pas entre les points de mesure dans la zone d'analyse. La figure II.20 illustre ces deux paramètres dans le logiciel.

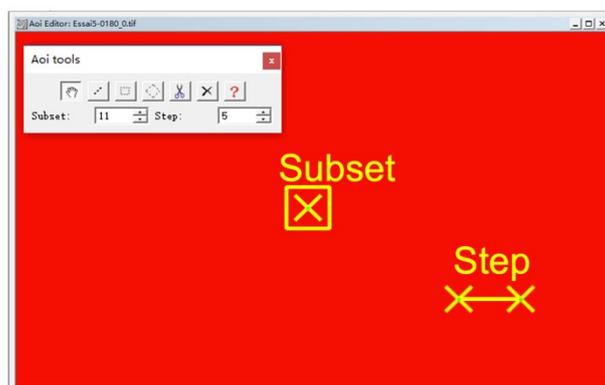


Figure II.20 : Choix des paramètres de calcul avec *VIC-2D*

Le logiciel commence par générer ces deux paramètres par défaut selon la taille de la zone d'analyse. Pour nos échantillons par exemple les valeurs par défaut sont : *Subset* = 9 et *Step* = 1.

Une étude de l'influence de ces deux paramètres sur la qualité des résultats a ensuite été réalisée. Ainsi, pour un même échantillon, et une même image, la figure II.21 montre comment les deux paramètres influencent la déformation ε_{xx} .

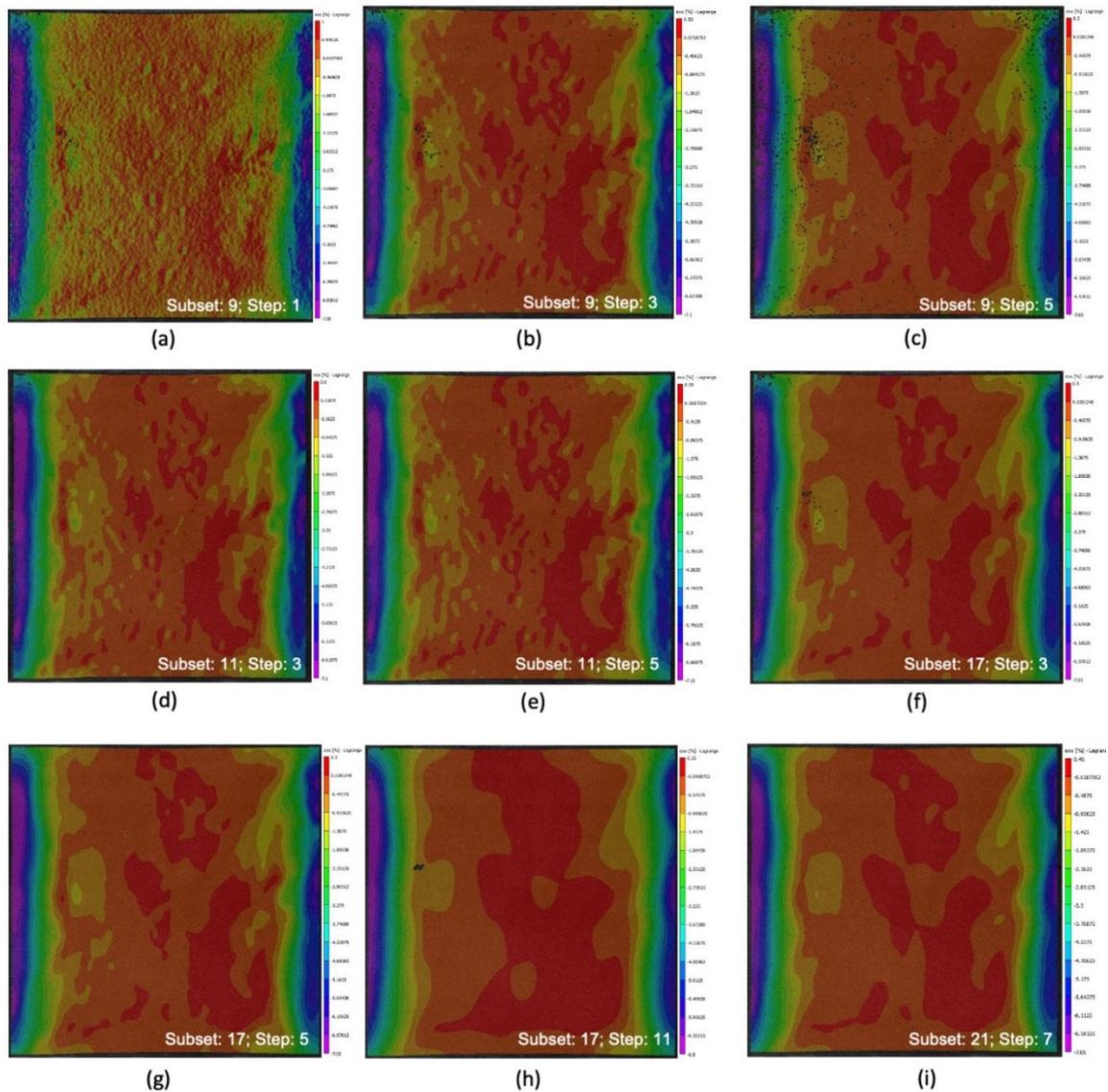


Figure II.21 : Cartographies de la déformation ε_{xx} avec différentes valeurs du *Subset* et du *Step*

On peut constater que lorsque le *Subset* et le *Step* augmentent, la quantité de données diminue et la cartographie devient plus fluide (Fig. II.21 i). Le temps de calcul diminue aussi. Au vu des résultats obtenus dans cette analyse, on constate que la meilleure combinaison est donnée par un *Subset* de 11 et un *Step* de 5 (Fig. II.21 e).

2.1.3 Transparence de l'enceinte de contrôle et influence de la vitre

Dans les essais de dessiccation contrôlée, l'échantillon est placé dans une enceinte de contrôle, la caméra prend des images à travers la vitre supérieure de l'enceinte (Fig. II.6). Il s'agit de vérifier que la vitre n'influence pas le calcul de la CIN.

Pour cela nous avons réalisé deux séries de mesures, avec et sans vitre, en considérant

le même échantillon, et le mouchetis fixé dans l'étude précédente. Le principe de l'essai ici est similaire à l'étude du mouchetis.

Quatre configurations de mouvements imposés sont prises en compte :

- Un déplacement de la platine de $X = 2$ mm dans le sens transversal (Fig. II.17 a)
- Un déplacement de la platine de $Y = 2$ mm dans le sens longitudinal (Fig. II.17 b)
- Une rotation de la platine de $\alpha = 3^\circ$ par rapport à l'axe U (Fig. II.17 c)
- Une rotation de la platine de $\beta = 3^\circ$ par rapport à l'axe U (Fig. II.17 d)

Ces mouvements sont ensuite confrontés aux données restituées par la CIN.

Les valeurs absolues maximales des déplacements et des déformations mesurés par CIN sont présentées dans le tableau II.2.

Tableau II.2 : Déplacements et déformations locaux avec et sans vitre.

Configurations	Déplacements imposés		Rotations imposées	Vitre	Déplacements mesurés		Déformations mesurées		
	X (mm)	Y (mm)	α ou β (°)		U (mm)	V (mm)	ϵ_{xx} (%)	ϵ_{yy} (%)	ϵ_{xy} (%)
A	2	0	/	Avec vitre	2,08	0,03	0,05	0,03	0,02
				Sans vitre	2,06	0,02	0,02	0,02	0,02
B	0	2	/	Avec vitre	0,02	1,94	0,02	0,06	0,02
				Sans vitre	0,01	1,89	0,03	0,02	0,03
C	/	/	3	Avec vitre	/	/	0,02	0,01	0,04
				Sans vitre	/	/	0,01	0,01	0,02
D	/	/	3	Avec vitre	/	/	0,01	0,01	0,02
				Sans vitre	/	/	0,01	0	0,02

Les résultats montrent clairement que la vitre n'affecte pas d'une manière significative les mesures du champ des déplacements. Les déplacements mesurés par la CIN sont très

proches des déplacements imposés par la platine et ce dans les deux directions transversale et longitudinale. On peut observer que la présence de la vitre provoque un effet plutôt léger sur la déformation longitudinale ε_{xx} de la configuration A (Fig. II.17 a), et sur la déformation transversale ε_{yy} dans la configuration B (Fig. II.17 b).

2.1.4 Point de mire et distance focale- réglages CIN-3D

Dans la technique CIN-3D, les paramètres liés à la caméra doivent être calibrés pour déduire la transformation projective de points d'objet (3D) en points d'image (2D). Ces paramètres de base importants sont directement impliqués dans les calculs du déplacement et de la déformation. Généralement, les deux caméras peuvent être calibrées à partir d'un ensemble de correspondances entre des points de contrôle 3D connus et leurs points projectifs d'images 2D en utilisant les algorithmes de calibration. Les informations des points de contrôle connus sont obtenues à partir des images de la mire de calibration avec différentes orientations (Fig. II.22).

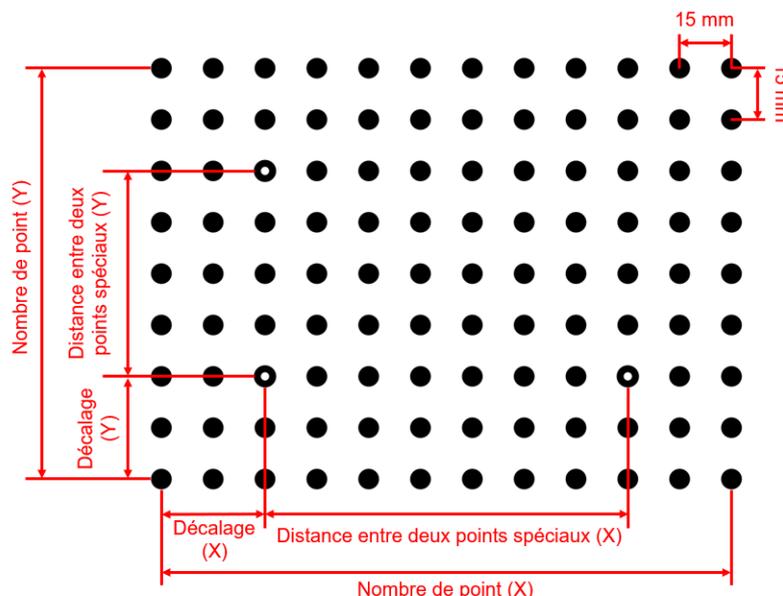


Figure II.22 : Mire de calibration de VIC-3D.

2.1.5 Remarque concernant le système d'éclairage

En photographie, le bruit numérique est un phénomène causé par l'éclairage lors de la prise de vue. Il se caractérise par l'apparition de pixels brillants ou colorés particulièrement visibles dans les zones sombres. Généralement, les images avec des niveaux de gris (photos en noir et blanc) sont utilisées dans les techniques CIN. Le bruit blanc dans les images peut affecter la mesure, car il a tendance à réduire le niveau de gris des pixels pour identifier l'imagette. Du point de vue des résultats de mesure, l'influence du bruit de l'image sur une CIN peut entraîner la non-corrélation des imagettes, ou une corrélation incertaine ce celles-ci.

2.1.6 Les algorithmes de CIN

Un algorithme de la CIN s'articule autour de trois fonctions : 1) la fonction de comparaison, 2) la fonction d'interpolation des niveaux de gris et 3) la fonction de forme décrivant la déformation de l'imatette. Les sources d'erreurs commises par les algorithmes CIN sont principalement concentrées dans la fonction de forme, dans les erreurs d'interpolation et dans la profondeur d'encodage des images (1 bit, 4 bits ou 16 bits). L'erreur de mesure peut être réduite en améliorant l'algorithme, par exemple en utilisant des fonctions de forme d'ordre supérieur.

2.2 Étalonnage pour l'utilisation de VIC-2D et de VIC-3D

Différentes configurations d'essais de validation ont été utilisées. Les mouvements imposés par la platine consistent en des déplacements dans trois directions, et des rotations. Ces essais sont réalisés sur le même échantillon avec un mouchetis homogène fixé par l'étude de validation. Les valeurs obtenues par la VIC-3D sont comparées aux mouvements imposés par la platine. 6 configurations sont analysées, en imposant 2 mm de déplacement selon chaque l'axe, et deux rotations autour l'axe z (voir la Figure II.23).

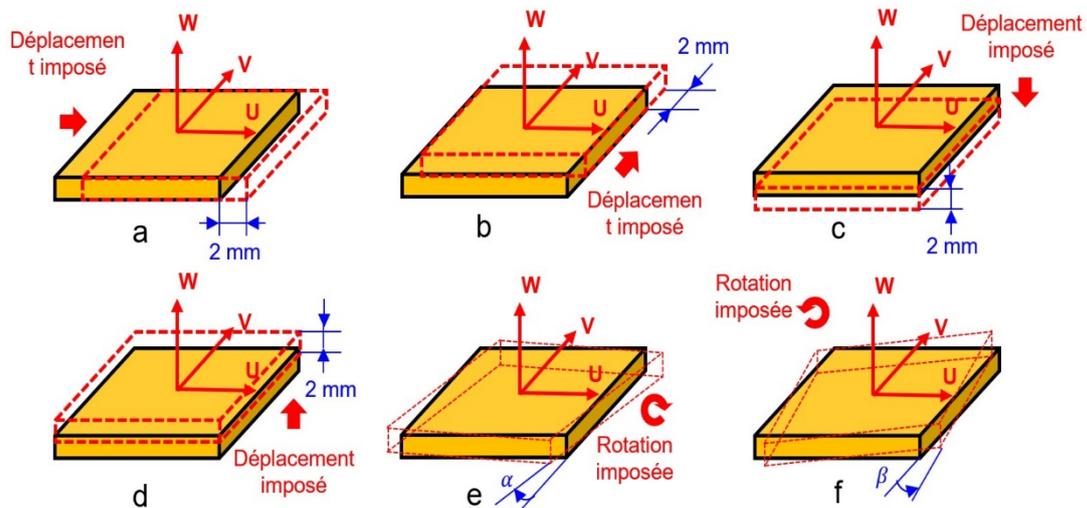


Figure II.23 : Schéma des différentes configurations de mouvements imposés à l'échantillon.

Dans le Tableau II.3 on trouve que la tolérance dans la mesure du champ de déplacement longitudinal est toujours inférieure aux autres champs de déplacements. Les erreurs entre le mouvement imposé et les valeurs de la CIN sont inférieures à 0,16 mm.

Tableau II.3: Sensibilité des déplacements mesurés avec et sans vitre.

Déplacements	Selon l'axe X (longitudinal)			Selon l'axe Y (transversal)			Selon l'axe Z (vertical)		
	U imposé (mm)	ΔU (mm)	$\Delta U/U$ (%)	V imposé (mm)	ΔV (mm)	$\Delta V/V$ (%)	W imposé (mm)	ΔW (mm)	$\Delta W/W$ (%)
VIC-3D sans vitre	2	0,08	4	2	0,11	6	1,91	0,15	8
VIC-3D avec vitre	2	0,09	5	2	0,12	6	1,91	0,16	9

Les résultats des déformations locales fournies par VIC-3D (Tableau II.4) montrent que les déformations longitudinales, transversales et en cisaillement sont plus proches de zéro par rapport aux déformations mesurées selon la verticale. La vitre supérieure de la chambre de contrôle peut en effet influencer la mesure de VIC-3D, mais l'erreur obtenue est relativement faible. Connaissant l'incertitude de mesure, il est maintenant possible de confronter les résultats de nos essais à ces incertitudes, et suivre les déformations locales au cours du séchage.

Tableau II.4: Sensibilité de déformations mesurées avec et sans vitre.

Déformations	ϵ_{xx} (%)	ϵ_{yy} (%)	ϵ_{zz} (%)	ϵ_{xy} (%)
VIC-3D sans vitre	$\pm 0,04$	$\pm 0,04$	$\pm 0,76$	$\pm 0,04$
VIC-3D avec vitre	$\pm 0,10$	$\pm 0,18$	$\pm 1,26$	$\pm 0,06$

3 Organigramme et calcul des déformations

3.1 Calcul des déformations globales

Les déformations globales sont représentées par les trois composantes axiales de la déformation volumique au cours du séchage. Le retrait de l'échantillon peut ainsi être approché. Soit :

- La déformation longitudinale selon l'axe X , notée ε_x
- La déformation transversale selon l'axe Y , notée ε_y
- La déformation verticale selon l'axe Z , notée ε_z

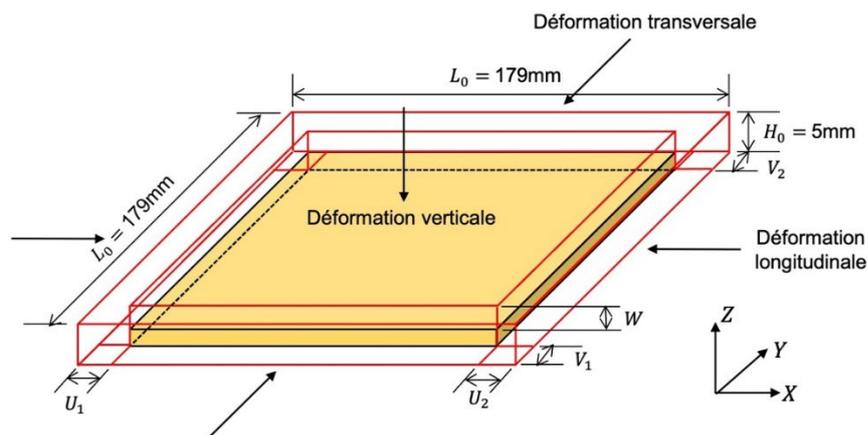


Figure II.24 : Schéma de l'échantillon et calcul de la déformation globale.

Les équations suivantes ont été utilisées pour calculer les déformations globales :

$$\varepsilon_x = \frac{U_1 + U_2}{L_0} \quad \text{Eq. II. 17}$$

$$\varepsilon_y = \frac{V_1 + V_2}{L_0} \quad \text{Eq. II. 18}$$

$$\varepsilon_z = \frac{W}{H_0} \quad \text{Eq. II. 19}$$

D'où, U_1 et U_2 sont des variations de la longueur d'échantillon ; V_1 et V_2 sont des variations de la largeur d'échantillon ; W est la variation de hauteur d'échantillon.

La figure II.25 présente l'organigramme adopté pour calculer les déformations globales de l'échantillon par la CIN au cours d'un essai de séchage.

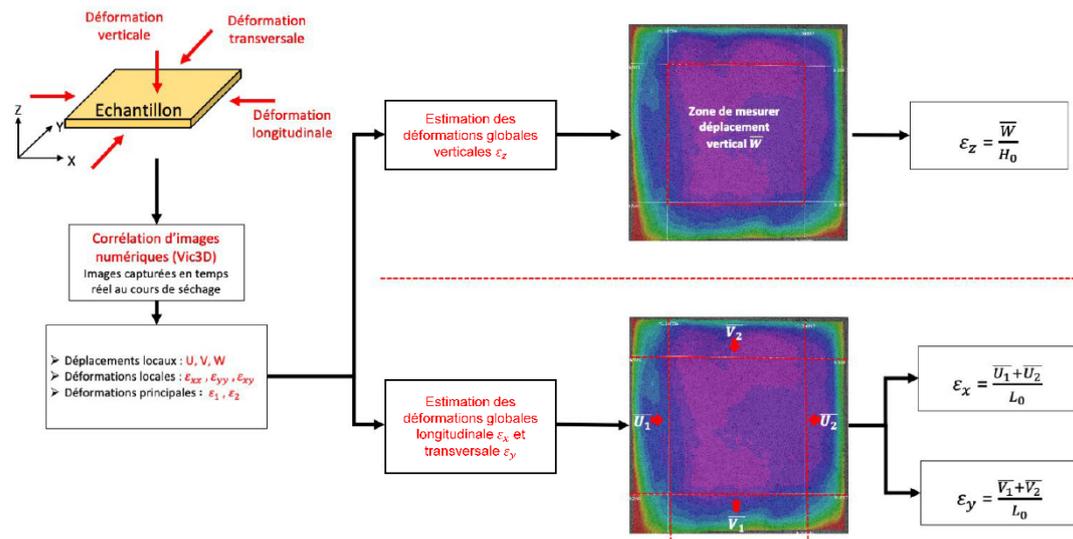


Figure II.25 : Organigramme de calcul des déformations globales via la CIN.

Les déformations observées sont décomposées en deux types : les déformations horizontales ε_x et ε_y et les déformations verticales ε_z . En utilisant les données locales obtenues par la CIN, il est possible de déterminer les déformations globales.

3.1.1 La déformation verticale ε_z

Les données des déplacements locaux suivant la direction verticale de la CIN-3D permettent de déduire les déformations globales notées ε_z se produisant dans le sens vertical de l'échantillon. Dans la figure II.25, \bar{W} est déterminé à partir des valeurs moyennes des déplacements locaux de tous les points de mesures dans la zone sélectionnée (la zone délimitée par la ligne rouge dans la figure II.25). Cette zone est fixée de façon à éliminer les effets de bords liés au soulèvement (même très petit) des quatre coins de l'échantillon, qui perturbent la mesure du déplacement vertical. En supposant que l'épaisseur initiale de l'échantillon est uniforme, alors la déformation globale ε_z peut être obtenue par l'équation Eq. II.19.

3.1.2 Les déformations horizontales ε_x et ε_y

Le calcul des déformations globales ε_x et ε_y est effectué aux bords de la zone de mesure sélectionnée à partir des déplacements locaux obtenus par la corrélation d'images numériques. Les déplacements \bar{U}_1 et \bar{U}_2 suivant X et \bar{V}_1 et \bar{V}_2 suivant Y représentent les valeurs moyennées des déplacements locaux sur les lignes proches des bords (Fig. II.25). Ces lignes ont été fixées afin de s'affranchir des effets de bords. Avec la longueur initiale L_0 de l'échantillon, les déformations globales ε_x et ε_y peuvent être calculées par les relations Eq. II.17 et Eq. II.18 respectivement.

3.1.3 La déformation volumique globale ε_v

La méthodologie de calcul des déformations globales permet de déduire la déformation volumique de l'échantillon par l'équation Eq. II.20 :

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad \text{Eq. II. 20}$$

Le retrait est défini par la déformation volumique de l'échantillon au cours du séchage. A l'aide de la déformation globale calculée ainsi, nous pouvons étudier l'influence des chemins de séchage et des conditions aux limites sur le retrait à l'échelle de l'échantillon.

3.2 Calcul des déformations locales

Les déformations locales représentent le phénomène de retrait à l'échelle locale de l'échantillon. Grâce à la CIN qui permet d'obtenir les champs des déformations horizontales (sur x et sur y) et du déplacement vertical de tous les points de la zone de mesure, toutes les déformations locales pourront être établies.

Les déformations longitudinales locales ε_{xx} et les déformations transversales locales ε_{yy} sont des données de la CIN. Dans le sens vertical, la CIN réalisée avec le logiciel *VIC-3D* transmet le déplacement vertical en chaque point de la surface à observer. En supposant que l'épaisseur initiale de l'échantillon est uniforme, alors la déformation globale ε_{zz} peut être obtenue par l'équation suivante :

$$\varepsilon_{zz} = \frac{W^{loc}}{H_0} \quad \text{Eq. II. 21}$$

W^{loc} est le déplacement vertical local exporté par logiciel *VIC-3D* ; H_0 est l'épaisseur initiale.

Une fois la déformation verticale locale déterminée, il est possible de calculer la déformation volumique locale :

$$\varepsilon_v^{loc} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \quad \text{Eq. II. 22}$$

La méthode de calcul de la déformation locale est illustrée par l'organigramme de la figure II.26.

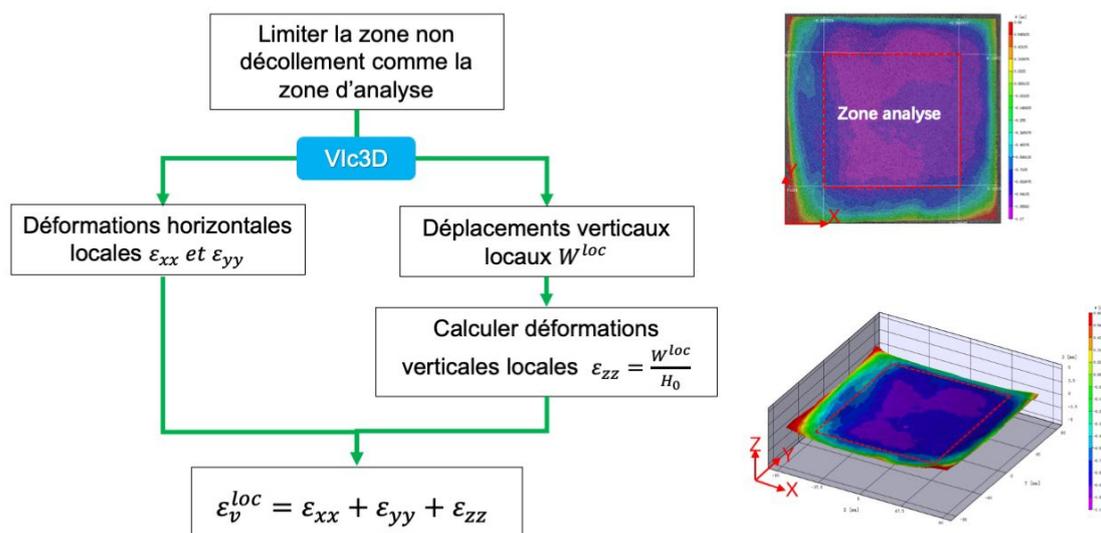


Figure II.26 : Calcul des déformations locales via la CIN.

L'effet de bord principalement lié au soulèvement des quatre coins de l'échantillon perturbe le calcul de la déformation locale en particulier de la déformation verticale. L'analyse de la déformation locale sera donc effectuée dans la zone d'échantillonnage où cet effet est minimisé voire éliminé (voir Fig. II.26).

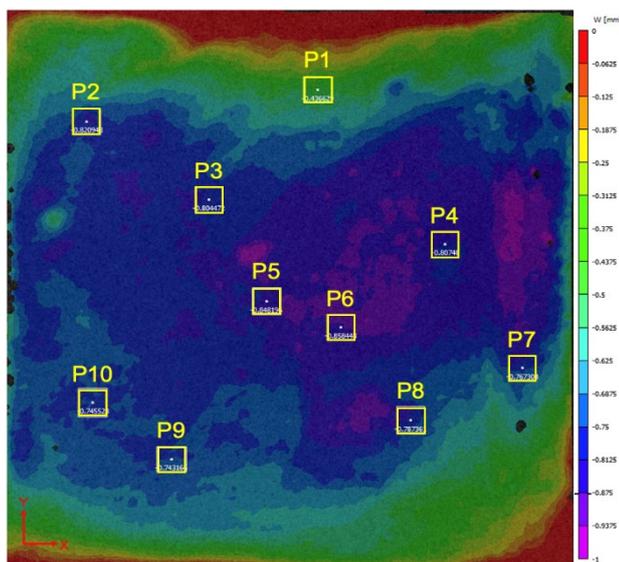


Figure II.27 : Petites zones P_i pour le calcul des déformations locales – cartographie du déplacement vertical W .

Afin de suivre l'évolution des déformations locales, et d'analyser leur loi de distribution, le calcul des déformations locales sera effectué dans de petites zones de forme carrée notées P_i ($i = 1$ à 10), comme illustré dans la figure II.27 présentant la cartographie du

déplacement W . La déformation locale de chaque petite zone sera la valeur moyenne de la déformation de tous les points de mesure contenus dans cette zone.

A partir de la déformation volumique estimée dans ces zones, il sera possible de remonter à la teneur en eau locale, à la succion et à l'indice des vides local.

3.3 Méthode pour la détermination des directions principales de la déformation

Cette méthode avait été proposée par [Wei \(2014\)](#) pour étudier l'apparition et la propagation de la fissuration de l'échantillon lors du retrait. Nous allons utiliser cette méthode qui s'intéresse aux déformations principales majeure ε_1 et mineure ε_2 à l'échelle locale notamment autour de la fissuration.

Notons que les cartographies générées par logiciel *VIC-2D* et *VIC-3D* ne permettent pas de connaître précisément la direction, ni le signe, de la déformation principale.

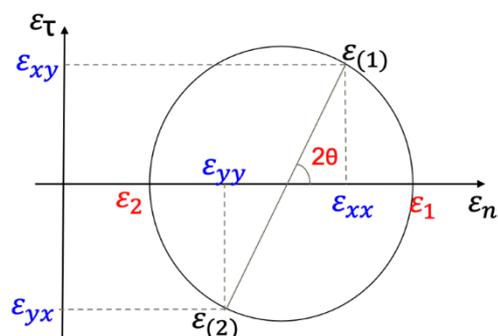


Figure II.28 : État des déformations via le plan de Mohr.

Avec les résultats de la CIN les déformations locales sont connues. La déformation majeure ε_1 et la déformation mineure ε_2 , et l'angle θ peuvent être calculés avec les équations suivantes en utilisant le cercle de Mohr (Fig. II.28) :

$$\varepsilon_1(x, y) = \frac{\varepsilon_{xx}(x, y) + \varepsilon_{yy}(x, y)}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{xx}(x, y) - \varepsilon_{yy}(x, y)}{2}\right)^2 + \varepsilon_{xy}^2(x, y)} \quad \text{Eq. II. 23}$$

$$\varepsilon_2(x, y) = \frac{\varepsilon_{xx}(x, y) + \varepsilon_{yy}(x, y)}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{xx}(x, y) - \varepsilon_{yy}(x, y)}{2}\right)^2 + \varepsilon_{xy}^2(x, y)} \quad \text{Eq. II. 24}$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{2\varepsilon_{xy}(x, y)}{\varepsilon_{xx}(x, y) - \varepsilon_{yy}(x, y)} \right) \quad \text{Eq. II. 25}$$

Le programme de [Wei \(2014\)](#) a été enrichi avec un calcul sous *Matlab* qui permet de tracer automatiquement les tenseurs des déformations principales à partir des déformations locales obtenues par le CIN.

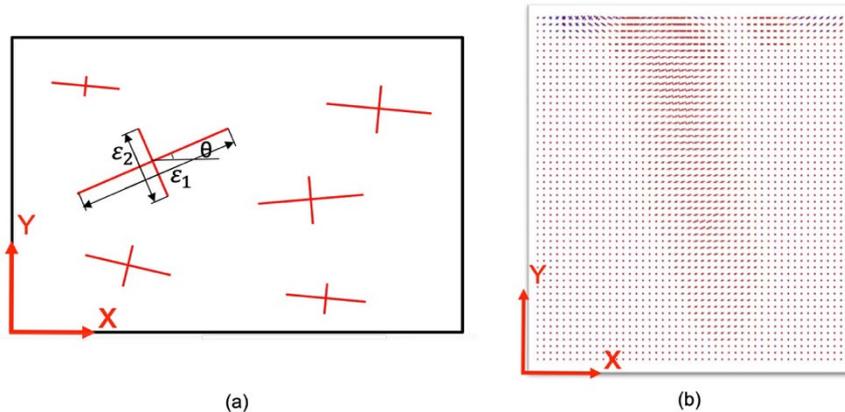


Figure II.29 : Directions des déformations principales (a) schéma de principe, (b) exemple de résultat sous forme de cartographie.

La figure II.29 (a) présente le tracé des directions des déformations principales qui est un résultat du programme *Matlab*, en termes de directions, orientation et valeurs des contraintes principales. La figure II.29 (b) est un exemple de résultat en termes de déformations principales dans une zone en extension. Nous avons attribué la couleur rouge pour une valeur positive (extension) de la déformation principale, et la couleur bleue pour une valeur négative (compression) de la déformation principale. Grâce à ce programme les mécanismes de fissuration peuvent être identifiés.

Conclusion

Dans ce chapitre, la technique de traitement d'image comme principal moyen de mesure expérimentale a été particulièrement étudiée. Le principe et le fonctionnement de la corrélation d'images numériques, l'étalonnage du dispositif expérimental, la précision des mesures, ainsi que le traitement des résultats de mesure et la détermination des déformations ont été présentés.

- La technique de CIN utilisée permet principalement d'obtenir les champs de déplacement et de déformation de l'échantillon et donc d'étudier le retrait et la fissuration de l'échantillon dus à la dessiccation.

- Les calculs de corrélation d'images numériques reposent sur le choix de deux paramètres de calcul : *Subset* (le taille d'imagette) et *Step* (le pas de calcul). Des paramètres de calcul appropriés ont été identifiés de manière à améliorer la précision du calcul tout en réduisant le temps de traitement.

- Les résultats de la CIN sont affichés sous forme de cartographie (2D) et topographie (3D) et peuvent être exportés pour déterminer la déformation globale de l'échantillon mais aussi pour calculer les déformations locales (déformations verticales et déformations volumiques locales).

- La qualité du mouchetis, l'uniformité de l'éclairage, l'influence de la vitre de l'enceinte et l'effet d'autres paramètres sur la précision de mesure ont été optimisés par des essais de calibration. Ceci nous a permis d'obtenir des erreurs de mesure plus faibles.

- À partir des résultats de déformations locales obtenus par la CIN, la valeur et la direction des déformations principales ont été calculées et traitées par le programme Matlab qui nous a permis de tracer la cartographie de la distribution des déformations principales, cette dernière ayant été utilisée pour déterminer le mécanisme d'initiation et de propagation des fissures.

Chapitre III

Matériaux et techniques expérimentales

Chapitre III. Matériaux et techniques expérimentales

Sommaire :

Introduction

1 Propriétés physiques du matériau et préparation des argiles remaniées

1.1 Propriétés physiques et minéralogiques du *Kaolin K13*

1.2 Confection des argiles remaniées en boue d'argile (*Kaolin K13*)

2 Techniques de contrôle de succion par équilibre de vapeur

2.1 Méthode pour le contrôle de l'humidité relative

2.2 Calcul de la succion avec une température et une humidité relative imposées

2.3 Solutions salines utilisées pour les essais de dessiccation contrôlée

3 Mesures des paramètres d'état de l'argile non saturée par la méthode du Kerdane

3.1 Mesure de la variation volumique d'échantillon – Essai au Kerdane

3.2 Préparation de l'échantillon

3.3 Méthode de calcul des paramètres d'état

4 Apparition de la fissuration- Traitement par Image-J

4.1 Traitement de la fissuration

4.2 Zones de déformations

5 Interface support/argile

5.1 Essai de cisaillement direct sur plan support/argile

5.2 Frottement mobilisé à l'interface

Conclusion

Introduction

Ce chapitre présente les propriétés physiques et minéralogiques du matériau étudié ainsi que la fabrication de la boue d'argile, la conception des échantillons et le contrôle de l'humidité relative, ainsi que les techniques de mesures des paramètres d'état. Ainsi :

- La méthode de contrôle de succion par technique équilibre vapeur consiste à contrôler de succion
- L'essai au kerdane permet de déterminer la courbe de rétention d'eau. Les paramètres d'état de l'argile non saturé, notamment l'indice des vides, la teneur en eau et le degré de saturation, sont mesurés.
- Le traitement de la fissuration par le logiciel Image-J pour suivre la morphologie de la fissuration.
- L'essai de cisaillement direct sur le plan support / argile pour déterminer le frottement au niveau de l'interface

1 Propriétés physiques du matériau et préparation des argiles remaniées

1.1 Propriétés physiques et minéralogiques du *Kaolin K13*

1.1.1 Caractéristiques physiques

Le matériau étudié est une argile de laboratoire commercialisée sous le nom *Kaolin K13* par la société *Sibelco* (Paris, France). Cette argile industrielle, est fournie sous forme de poudre déshydratée. Les essais d'Atterberg ont été réalisés dans le passé par [Ighil Ameur, \(2016\)](#) et [Zhao \(2017\)](#). Avec nos valeurs expérimentales, et celles mesurées antérieurement, nous avons pu donner les valeurs moyennes de la limite de liquidité et de la limite de plasticité pour ce matériau. Ces valeurs sont montrées dans le tableau III.1, et comparées aux résultats sur la *Kaolinite P300* ([Hammad, 2010](#)) qui a été utilisée dans de très nombreuses recherches ([Hicher et al. 1994](#) ; [Péron et al., 2009](#) ; [Hattab et Fleureau, 2011](#) et d'autres).

Tableau III.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 $I_P = w_L - w_P$ (%)	Poids volumique des grains γ_s (kg/m ³)
<i>Kaolin K13</i>	41	21	20	26,3
<i>Kaolinite P300</i> (Hammad, 2010)	40	21	19	26,5

On peut voir que les propriétés physiques du *Kaolin K13* et de la *Kaolinite P300* sont très proches.

1.1.2 Minéralogie

Le *Kaolin K13* est un matériau riche de Kaolinite. La fiche technique fournie par *Sibelco* indique que les composants principaux sont la Kaolinite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4 > 90 \%$) et le Quartz Alpha ($SiO_2 < 10 \%$). Les résultats d'essais de la diffraction des rayons X réalisés par [Gao \(2018\)](#) sur le *Kaolin K13*, et par [Hattab et al., \(2010\)](#) sur *Kaolinite P300* sont présentés sur la figure III.1.

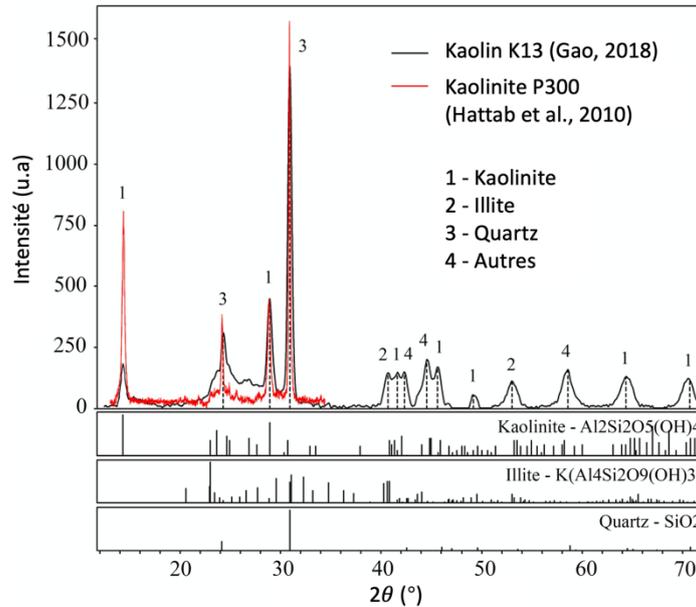


Figure III.1: Composition minéralogique du *Kaolin K13* et de la *Kaolinite P300*.

Les pics de ligne noire (*Kaolin K13*) montrent que ce matériau contient une grande quantité de kaolinite, une partie d'illite et une faible quantité de quartz. En comparant avec les résultats de la *Kaolinite P300* (ligne rouge), on peut supposer que la composition minéralogique de ces deux matériaux est similaire (Kaolinite > 90%).

1.2 Confection des argiles remaniées en boue d'argile (*Kaolin K13*)

L'échantillon est confectionné à partir d'une boue d'argile ayant une teneur en eau égale à 1,2 fois la limite de liquidité ($w_0 = 1,2w_L \approx 48\%$). Pour assurer l'homogénéité du mélange poudre/eau, il est nécessaire de réaliser un nettoyage et un séchage de tous les instruments utilisés avant la préparation. Le mélange est constitué de 2 kg de poudre d'argile et de 960 ml d'eau désaérée ce qui assure une teneur en eau de $w_0 = 48\%$.

La boue d'argile est réalisée en trois étapes :

- Le mélange :

Le mélange est réalisé dans un malaxeur de marque *ControLab* (model : L0031.1) (voir Figure III.2 a). Le malaxeur peut être utilisé à trois différentes vitesses, la vitesse lente 64 tr/min, la vitesse moyenne 140 tr/min et la vitesse rapide 285 tr/min. On utilise un protocole standardisé pour réaliser les mélanges, il est présenté dans le tableau III.2 :

Tableau III.2: Méthodologie du mélange de l'argile poudre et de l'eau.

Opérations	Introduction d'argile	Introduction de l'eau	Mélange		
			1 min	5 min	9 min
Durée	--	--			
État du malaxeur	Arrêt		Arrêt	Vitesse moyenne	Vitesse rapide

- Repos :

Après le malaxage on verse la boue dans un récipient propre (Fig. III.2 b). Et on isole le matériau avec un film en plastique couvert de papier aluminium ce qui assure l'étanchéité de la pâte. Celle-ci est ensuite laissée au repos dans environnement contrôlé en température et humidité, pendant minimum 24 heures. De cette façon l'homogénéité de la teneur en eau est assurée (Fig. III.2 c).

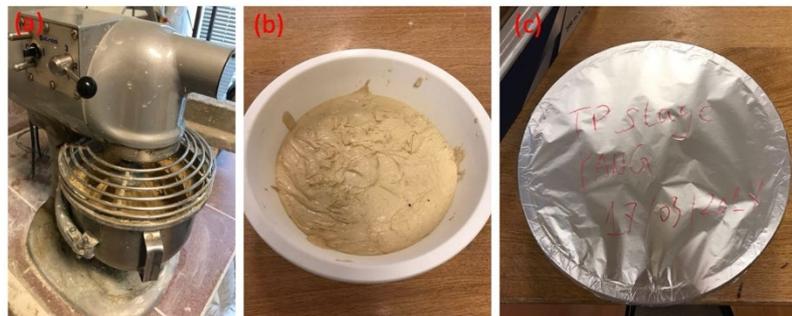


Figure III.2: Préparation de la boue : (a) malaxeur, (b) boue d'argile et (c) conditionnement.

- Vérification de l'homogénéité

Une vérification de la teneur en eau doit être effectuée avant l'utilisation de la boue. On prend trois échantillons au centre et au bord du récipient, et on mesure la teneur en eau de chaque échantillon. La différence en teneur en eau est inférieure à 0.3%.

Après les trois étapes ci-dessus de préparation, la boue sera utilisée pour fabriquer des échantillons destinés aux essais de notre programme expérimental.

2 Techniques de contrôle de succion par équilibre de vapeur

Comme nous l'avons vu dans la revue bibliographique, les phénomènes de capillarité, et de succion, sont à l'origine du comportement de retrait et de fissuration des sols argileux au cours du séchage.

La succion est une pression interstitielle négative ($u_a - u_w$), due à l'interaction entre l'eau, l'air et les particules du sol. La succion est difficile à mesurer, elle peut atteindre plusieurs centaines de MPa lorsque le matériau est très sec. De nombreuses techniques de contrôle de succion, y compris la technique d'équilibre de vapeur, sont décrites et expliquées dans la littérature (Fleureau et al., 1993 ; Delage et Cui, 2000). Dans cette partie, on présente le principe de contrôle de la succion et du calcul utilisé dans notre étude.

2.1 Méthode pour le contrôle de l'humidité relative

La technique d'équilibre de vapeur est basée sur la loi de Kelvin par un contrôle de l'humidité relative dans une enceinte confinée. Le principe de cette technique est illustré dans la figure III.3. L'échantillon d'argile est placé dans un dessiccateur dans une atmosphère confinée contrôlant l'humidité et la température. Les transferts d'eau sous phase vapeur entre échantillon et l'absorbant se poursuit jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint. Deux types d'absorption d'eau peuvent être envisagés, soit une solution saline saturée, soit une solution d'acide sulfurique. La solution saline saturée a été adoptée dans notre étude.

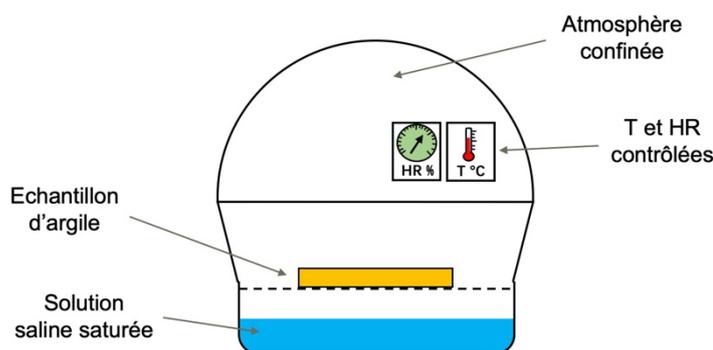


Figure III.3 : Schéma de principe de la technique d'équilibre de vapeur.

Deux types d'enceintes confinées ont été utilisés dans nos essais : Le dessiccateur pour les essais au Kerdane sur petits échantillons (Fig. III.4 a), et une chambre de contrôle de taille de 600 x 300 x 300 mm pour les grands échantillons destinés aux essais de dessiccation contrôlée avec corrélations d'images numériques (Fig. III.4 b).



Figure III.4 : Dispositifs et enceintes utilisés, (a) Dessiccateur ; (b) Chambre de contrôle.

Cette chambre de contrôle a été conçue et fabriquée par [Ighil Ameur \(2016\)](#) dans le cadre de sa thèse au LEM3. Le confinement de cette chambre de contrôle est assuré par une bande d'étanchéité en mousse de haute densité au niveau des jonctions.

2.2 Calcul de la succion à une température et une humidité relative imposées

Dans les enceintes confinées, les valeurs de la température et de l'humidité relative sont mesurées par un thermo-hygromètre. La loi Kelvin relie la succion à l'humidité relative (Eq.III.1).

$$s = \frac{\rho_w RT}{M_w} \ln(HR) \quad \text{Eq. III. 1}$$

Avec :

s : succion (Pa),

ρ_w : masse volumique d'eau (kg/m^3),

M_w : masse molaire d'eau (kg/mol),

R : constante des gaz parfaits ($J/mol \cdot K$),

T : température thermodynamique (K),

HR : humidité relative.

2.3 Solutions salines utilisées pour les essais de dessiccation contrôlée

La technique d'équilibre de vapeur permet de contrôler l'humidité relative par la solution saline saturée. En sélectionnant différents sels pour préparer les solutions salines, il est possible d'imposer une succion de quelque MPa jusqu'à des centaines de MPa dans une chambre confinée. Dans tous les essais de dessiccation contrôlée réalisés, une seule solution saline a été utilisée, afin d'avoir le même chemin de séchage.

2.3.1 Solution saline dans la chambre de contrôle

Pour réaliser les essais dans la chambre de contrôle une faible humidité relative (à 20 °C, HR égale 9 %) est imposée par la solution hydroxyde de potassium (KOH) saturée. La succion imposée à l'environnement est égale 325,5 MPa pour une température de 20 °C. La valeur d'humidité relative pour le KOH a été communiquée par [Delage et al. \(1998\)](#), et la succion a été calculée à partir de l'équation (Eq.III.1).

Le choix de sel KOH est basé sur les deux considérations suivantes :

- Le matériau utilisé est une argile, donc relativement peu perméable. Une succion plus faible imposée au grand échantillon aurait pris plus de temps pour atteindre l'équilibre (plusieurs semaines voire quelques mois). La cinétique du séchage est plus élevée quand le contrôle de l'humidité relative se fait avec le KOH.
- Comme la loi de Kelvin l'exprime, l'humidité relative imposée par la solution saline est très dépendante de la température ambiante. La succion est calculée à partir de l'humidité relative et de la température. Il est judicieux de choisir un sel qui contrôle l'humidité relative tout en étant peu sensible aux fluctuations de température.

Les valeurs issues de la littérature indiquent que l'humidité relative imposée par solution KOH a une plage de variation inférieure à 2 % pour une température qui varie entre 15 °C et 25 °C (ISO R 483 ; NF X 15 014). D'autre part, l'utilisation de solution saline KOH peut limiter la durée de séchage à une dizaine de jours.

Dans nos essais de dessiccation le KOH est utilisé avec toujours le même dosage de la solution saturée. Les caractéristiques chimiques et le dosage sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.3 : Caractéristiques chimiques de solution saline utilisée.

Sel utilisé		KOH
Masse volumique (g/cm ³)		2,04
Masse molaire (g/mol)		56,11
Dosage utilisé	Masse du sel (g)	450
	Volume d'eau (ml)	90
	Concentration (mol/l)	25,824

2.3.2 Vérification de la solution KOH

Comme nos essais dépendent beaucoup de la qualité du sel, nous avons réalisé des vérifications de la solution KOH qui nous a été fournie. Le dosage standard a été utilisé conformément au Tableau III.3. La solution KOH a été introduite seule dans la chambre de contrôle. Un hygromètre et un thermomètre permettent de mesurer la température et l'humidité relative au cours d'essai de vérification.

Avec la valeur expérimentale obtenue par système de mesure, on calcule la succion puis on trace les courbes pour montrer les évolutions de l'humidité relative et de la succion dans la chambre de contrôle. Les données de cette vérification sont représentées dans la (Fig. III.5).

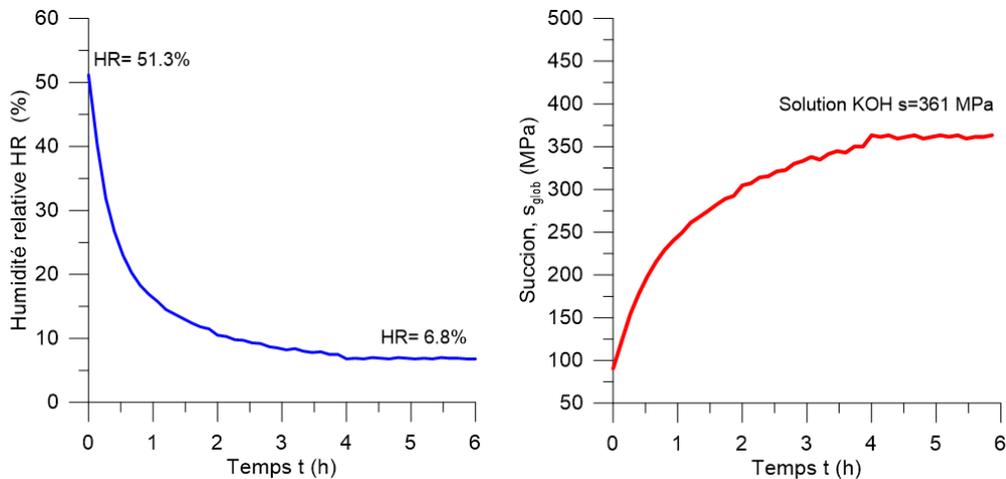


Figure III.5 : La courbe d'humidité relative en fonction du temps, la courbe de succion imposée en fonction du temps.

Comme aucun échantillon d'argile n'est placé dans la chambre de contrôle, la solution saline saturée absorbe directement la vapeur d'eau dans l'atmosphère de la chambre confinée. Par conséquent, sur les courbes de la figure III.5, on observe une diminution de l'humidité relative HR (existante par l'air ambiant), et une augmentation de la succion s . L'évolution des deux paramètres est rapide au début, jusqu'à 6 h de séchage, puis les deux courbes tendent vers une stabilisation. L'humidité relative HR atteint 6,8 % à la stabilisation, et la succion calculée est égale 361 MPa.

Tableau III.4 : Comparaison la succion imposée avec valeur théorique.

Sel utilisé	Type de valeur	Température (°C)	Humidité relative (%)	Succion (MPa)
KOH	Notre vérification	21	6,8	361
	Delage et al. (1998)	20	9	325,5
	Delage et al. (1998)	25	8	343,6

Ces valeurs expérimentales déduites par notre essai de vérification sont compatibles avec celles données par [Delage et al \(1998\)](#) comme on peut le voir dans le tableau III.4. On obtient en effet une différence de succion inférieure ou égale à 10%. La qualité du sel KOH qu'on utilise dans nos essais de dessiccation, ainsi que le dosage sont satisfaisants.

L'installation du système expérimental pour les essais de dessiccation est faite dans un local d'essai à température constante et égale à 21°C. Un système de climatisation permet de contrôler la température.

3 Mesures des paramètres d'état de l'argile non saturée par la méthode du Kerdane

Les paramètres utilisés pour caractériser du sol sur chemin de séchage sont :

- La teneur en eau w ;
- L'indice des vides e ;
- Le degré de saturation S_r .

Dans ce travail, les trois paramètres sont déterminés par les résultats d'essai au kerdane. La méthode est utilisée sur des petits échantillons soumis à une succion donnée. Cet essai a pour but de caractériser la courbe de rétention d'eau et la courbe de retrait qui définissent les lois d'évolution entre les trois paramètres et la succion.

3.1 Mesure de la variation volumique d'échantillon – Essai au Kerdane

Après séchage les échantillons d'argile changent de volume et prennent bien souvent une forme irrégulière. La méthode de mesure volumique conventionnelle par le pied à coulisse n'est pas possible. Le théorème d'Archimède est utilisé pour mesurer la masse d'échantillon immergé dans un produit pétrole : Le kerdane (Fig. III.6) qui est un fluide immiscible avec eau. L'immersion d'un échantillon d'argile ayant une certaine teneur en eau, dans le Kerdane ne peut pas faire varier cette teneur en eau.

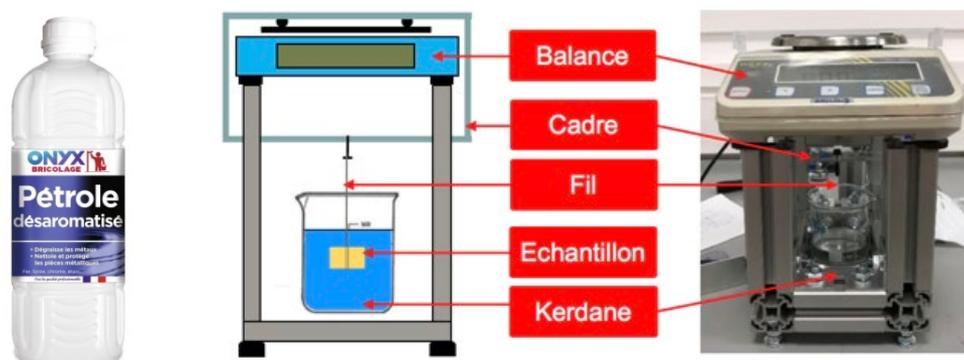


Figure III.6 : Dispositif d'essai au Kerdane.

Le dispositif pour l'essai au kerdane, représenté dans la figure III.6, a été développé au laboratoire. Il se compose d'une balance placée en haut sur le support en aluminium, dont la précision est de 0,001 g, d'un récipient pour le liquide Kerdane, de l'échantillon à tester, celui-ci étant attaché par un fil fixé en haut du dispositif.

3.2 Préparation de l'échantillon

Pour préparer les échantillons à tester au Kerdane, on a fabriqué par impression 3D, un cadre contenant huit petites loges de même dimension. Ces loges permettent de confectionner les échantillons d'essais. Ces derniers sont préparés à partir de la boue d'argile, en état saturé, avec la teneur en eau initiale $w_0 = 48\%$. Les échantillons sont ensuite placés dans les dessiccateurs à l'humidité relative contrôlée par des solutions salines. Contrairement aux essais de dessiccation contrôlée sur grands échantillons, avec utilisation de la technique CIN, où seul le KOH a été utilisé, pour les essais au kerdane sur petits échantillons, différentes solutions salines ont été utilisées (CaSO_4 , Na_2SO_4 , NaCl , K_2CO_3 et KOH). La température et l'humidité relative ont été mesurées par thermo-hygromètre, puis utilisées pour calculer la succion avec l'équation Eq. III.1. Toutes ces valeurs sont indiquées dans le tableau III.5.

Tableau III.5: Les humidités relatives et succions liées aux différentes solutions salines saturées

Solution saline	Humidité relative HR (%)	Succion (MPa)	Température (°C)
CaSO ₄	99,8	0,27	21
Na ₂ SO ₄	92,5	10,5	20
NaCl	75,5	38	21
K ₂ CO ₃	46,5	103,8	20,5
KOH	6,8	363,7	20

Comme illustrée dans le schéma de la figure III.7, l'essai au Kerdane est réalisé en trois étapes. Les trois masses m_1 , m_2 et m_3 dans différents états du matériau sont mesurées.

- Lorsque l'humidité relative dans le dessiccateur est en équilibre, la masse d'échantillon est mesurée immédiatement après sa sortie du dessiccateur. Dans ce cas, **la masse humide de l'échantillon non saturé m_1** est obtenue.
- L'échantillon est mis en place dans le dispositif, et plongé complètement dans le liquide pendant au moins dix minutes, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de bulles d'air à la surface de l'échantillon. **La masse m_2 de l'échantillon immergé dans le liquide** est mesurée. La masse m_2 est inférieure à la masse m_1 . Dans cette étape, l'échantillon ne doit pas toucher les parois de récipient.
- L'échantillon est séché dans l'étuve à température 110°C pendant 48h. Après ce séchage à haute température, le liquide Kerdane et l'eau dans l'échantillon sont complètement éliminés. **La masse sèche de l'échantillon est m_3 .**

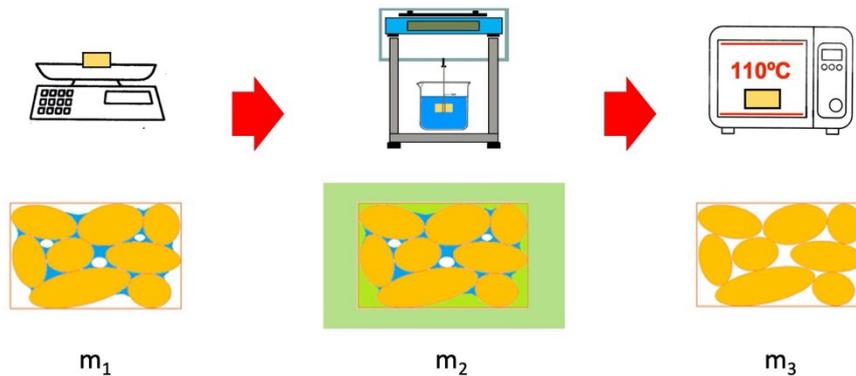


Figure III. 7 : Principe de l'essai au Kerdane.

3.2.1 Méthode de calcul des paramètres d'état

Les trois masses en différents états d'échantillon ont été mesurées. On a développé quatre formules pour calculer la volume totale d'échantillon V_T , la teneur en eau w , l'indice des vides e et le degré de saturation S_r . Les formules développées sont basées sur les définitions de chaque paramètre calculé.

$$w = \frac{m_w}{m_s} = \frac{m_1 - m_3}{m_3} \quad \text{Eq. III. 2}$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_T - V_s}{V_s} = \rho_s \frac{m_1 - m_2}{\rho_k m_3} - 1 \quad \text{Eq. III. 3}$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_w}{V_T - V_s} = \frac{\frac{m_1 - m_3}{\rho_k}}{\frac{m_1 - m_2}{\rho_k} - \frac{m_3}{\rho_s}} \quad \text{Eq. III. 4}$$

Avec :

ρ_k : masse volumique du liquide Kerdane ($\rho_k = 0,786 \text{ kg/m}^3$) ;

ρ_w : masse volumique d'eau ($\rho_w = 0,997 \text{ kg/m}^3$) ;

ρ_s : masse volumique du Kaolin K13 ($\rho_s = 2.63 \text{ kg/m}^3$) ;

m_1 : masse humide de l'échantillon non saturé ;

m_2 : masse de l'échantillon immergé dans le liquide ;

m_3 : masse sèche de l'échantillon.

4 Apparition de la fissuration - Traitement par Image-J

Image J est un logiciel multiplateforme et open source de traitement et d'analyse d'images,

il a été développé par *National Institutes of Health*. Il est écrit en *Java*. Ce logiciel a été initialement développé pour des applications biomédicales, son usage maintenant s'est étendu à d'autres domaines comme la science des matériaux.

4.1 Traitement de la fissuration

Dans notre recherche, on utilise l'Image J pour traiter les images obtenues par la technique de corrélation d'images numériques, nous cherchons en particulier d'analyser la création et la propagation de la fissuration. La figure III.8 présente la méthode que nous avons établie pour traiter la fissuration hydrique avec Image J.

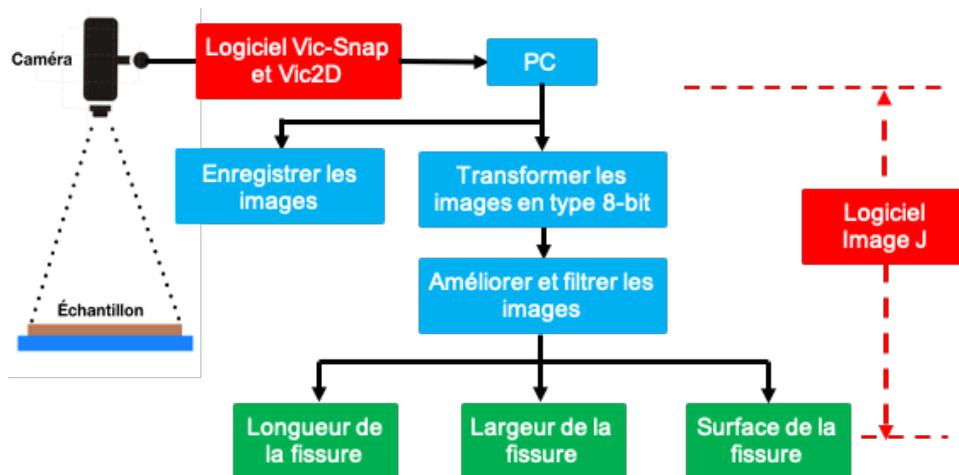


Figure III.8 : Organigramme de traitement la fissuration hydrique avec Image-J.

Au cours de la propagation des fissures, la caméra digitale avec logiciel *Vic-Snap* prend et enregistre les images de la surface supérieure d'échantillon toutes les 2 min. On utilise Image-J pour sélectionner et capturer la zone d'analyse. Ensuite on transforme les images en 8 bit noir/blanc, et on corrige l'éclairage en filtrant les bruits (Fig. III.9).

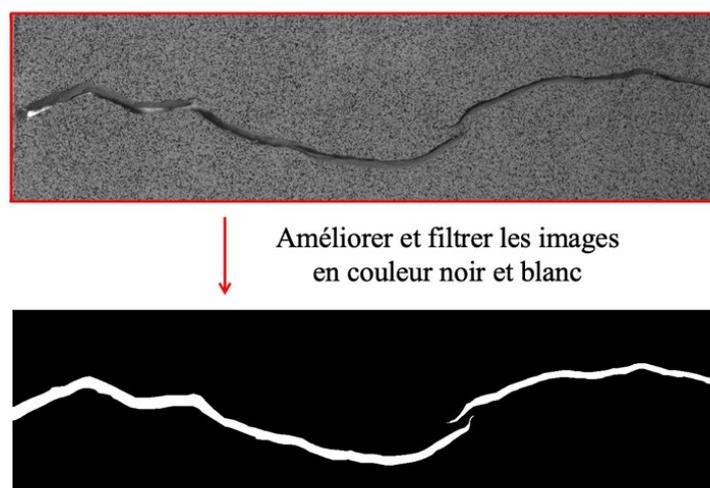


Figure III.9 : Image d'une fissure avant et après le traitement par Image-J.

Le traitement par Image-J permet de mesurer automatiquement la longueur, l'ouverture et la surface des fissures. On peut ainsi suivre la propagation et le développement d'une fissuration.

4.2 Zones de déformations

La zone de déformations d'une fissure décrit une zone pour laquelle une déformation importante se développe tout autour de la fissure principale. Cette zone peut impacter les autres régions de l'échantillon, il en découle des phénomènes de bifurcations, de coalescence, de disparition de zone en traction etc.

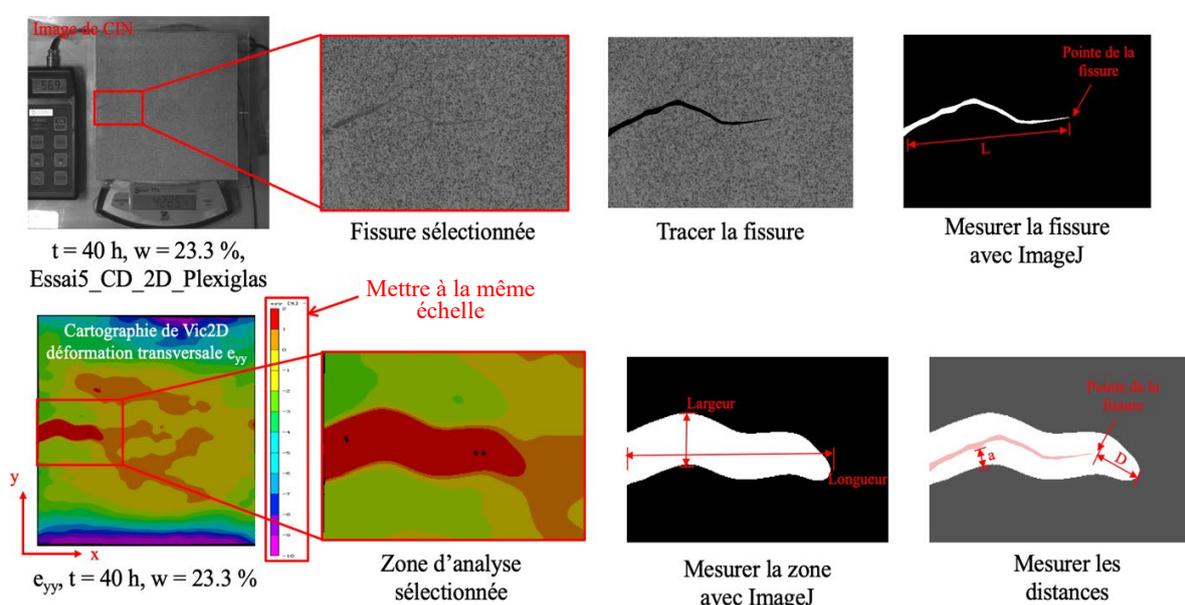


Figure III.10 : Exemple d'une zone de déformation capturée autour d'une fissure.

La méthode que nous proposons consiste à tracer la fissure principale par Photoshop, puis à mesurer la longueur L de cette fissure avec Image-J. Les cartographies de VIC-2D expriment la distribution de la déformation de la surface supérieure d'échantillon avec différentes couleurs. Avec le logiciel Image-J on détermine la fissure à étudier, on peut alors mesurer les propriétés de cette fissure, par exemple calculer la distance D entre la pointe de la fissure principale et la limite de la zone en déformation aux alentours de cette fissure. De cette façon au cours de sa propagation on peut suivre l'évolution de la distance D .

5 Interface support/argile

Dans les essais de dessiccation, on observe l'apparition et la propagation des fissures dans l'échantillon d'argile. De nombreuses études ont montré que lorsque la déformation

de retrait est limitée, par exemple limitée par l'effet des conditions aux limites, la concentration de la contrainte ou la déformation se produit dans le sol et des fissures se développent à cause de la contrainte qui est supérieure à la résistance à la traction du sol. L'échantillon d'argile est placé sur le support de l'échantillon qui est totalement en contact avec le support. Il existe entre eux une interaction qui se produit principalement par le contact de deux matériaux telle que le frottement et la rugosité. Trois types de support ont été utilisés pour les essais de dessiccation contrôlée. L'un en plexiglas noté *PG*, l'un en téflon noté *TF* et l'autre en téflon traité par graisse noté *TG*.

Afin de s'affranchir des effets de frottement liés au contact entre la surface inférieure de l'échantillon et le support utilisé. Nous avons adopté la technique présentée par Péron (2008) qui utilise un support téflon traité avec une substance hydrophobe. Dans notre essai de dessiccation contrôlée, la substance hydrophobe est une graisse industrielle. Pour identifier les effets des différents supports, nous avons étudié l'interaction entre le support et l'échantillon par les essais de cisaillement direct support/argile.

5.1 Essai de cisaillement direct sur plan support/argile

En modifiant le dispositif d'essai de cisaillement direct, nous avons étudié l'interaction entre le support et l'échantillon. La figure III.11 illustre le schéma expérimental spécialement conçu pour l'essai de cisaillement direct support/argile. Le bâti de cisaillement est constitué de deux demi-boîtes indépendantes. La demi-boîte supérieure est une partie fixe munie d'un dynamomètre. La demi-boîte inférieure est une partie mobile sur roulement, un mouvement lent est appliqué à vitesse constante dans le sens horizontal.

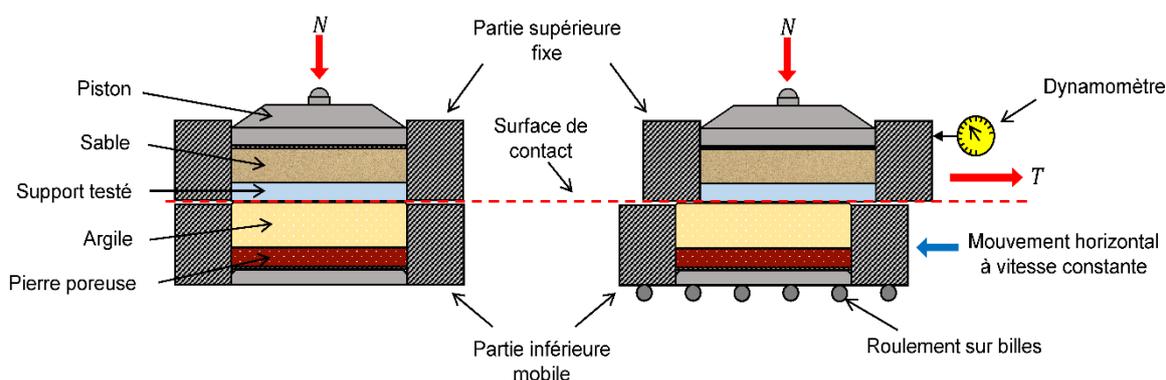


Figure III.11 : Dispositif expérimental d'essai de cisaillement direct support/argile.

La boue d'argile avec une teneur en eau initiale connue ($w_0 = 48 \% \approx 1,2 \cdot w_L$) est disposée dans la demi-boîte inférieure. L'éprouvette d'argile dépasse légèrement le bord supérieur de la demi-boîte de manière à s'assurer que l'argile et le support placé dans la demi-boîte supérieure restent en contact. Une couche de sable entre le piston et le support testé permet de fixer le support au fond de la demi-boîte au contact avec l'argile et de donner au piston une hauteur suffisante.

Le plan de séparation des deux demi-boîtes constitue le plan de glissement à l'interface argile/support. L'effort vertical N est appliqué par un chargement sur le bras de levier (et poids), auquel il faut rajouter le poids propre du piston, la couche de sable et le support testé. L'effort horizontal T est mesuré par un dynamomètre fixé à la demi-boîte supérieure.

5.2 Frottement mobilisé à l'interface

Le frottement entre le support et le matériau est accentué par la rugosité du support sur la surface de contact. Dans les essais de séchage de l'argile qui nous intéressent, la composante horizontale de la déformation de retrait peut être altérée par le frottement sur la surface de contact entre le support et l'argile.

L'essai de cisaillement direct support/argile, permet de définir un angle de frottement φ' à l'interface de différents supports que nous allons utiliser. Les supports sont référencés TF (pour le téflon) et TG (pour le téflon traité par graisse). La contrainte verticale et la contrainte horizontale au cours de l'essai de cisaillement sont respectivement calculées par les relations suivantes :

$$\sigma = \frac{N}{S} \quad \text{Eq. III. 5}$$

$$\tau = \frac{T}{S} \quad \text{Eq. III. 6}$$

Avec : S est la surface de contact.

Pour chaque type de support, l'essai est réalisé avec 3 valeurs différentes de l'effort vertical N . Nous avons donc à réaliser 6 essais.

La figure III.12 montre les résultats en termes de contraintes tangentielles maximales τ_{max} et contraintes normales (issues de l'effort N imposé) notée σ_{max} .

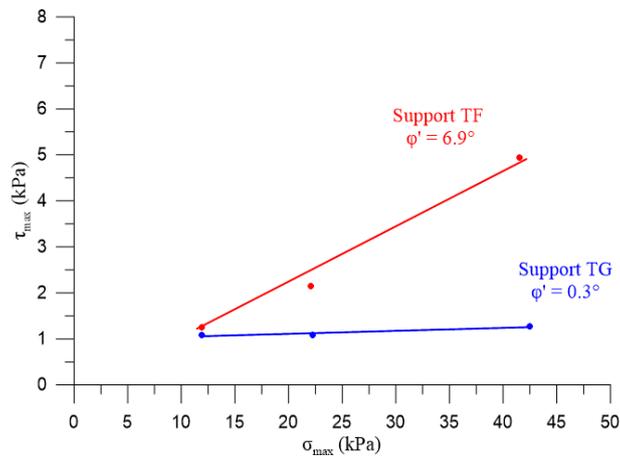


Figure III.12 : L'angle de frottement des différents supports testés.

Les résultats exhibent des droites de pentes différentes correspondant aux deux supports testés. La pente de chaque droite exprime la tangente de l'angle de frottement $\tan \varphi'$ entre le matériau et le support. Pour le support *TG* l'angle de frottement est $\varphi'_{TG} = 0,3^\circ$, il est égal à $\varphi'_{TF} = 6,9^\circ$ lorsque le support est *TF*. Il apparaît donc clairement que la graisse minimise considérablement le frottement entre l'argile et le support. Son utilisation sera réservée aux essais de séchage et retrait libre sur grand échantillon.

La surface du support *TF* a également été observée par [Ighil Ameur \(2016\)](#) au moyen du microscope confocal *LEICA DCM3D* au LEM3. Cette observation permet d'obtenir la topographie 3D de la surface, et également de quantifier l'état de surface du plan ainsi que sa rugosité. La figure III.13 présente la topographie de la surface du support *TF*. Les différentes couleurs représentent l'altitude de chaque point mesuré de la surface. On peut voir que le support *TF* n'est pas complètement lisse, ce qui confirme le résultat obtenu au cisaillement direct.

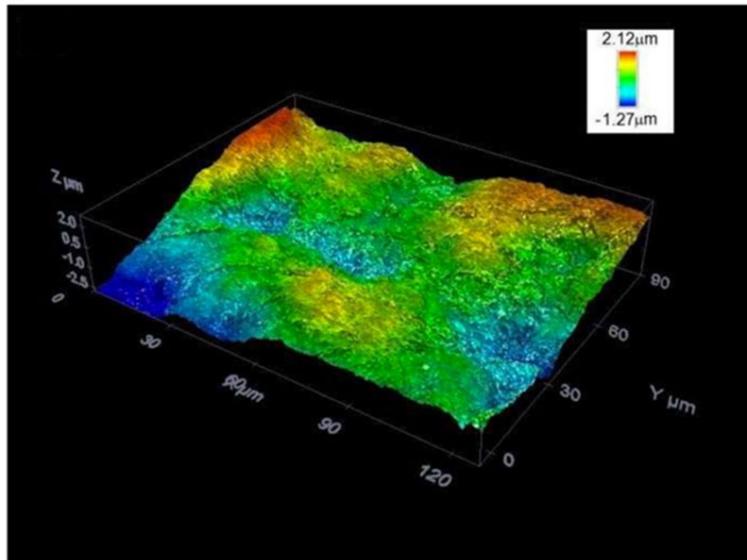


Figure III.13 : Topographie 3D de la surface du support *TF* donnée par le microscope confocal (Ighil Ameur (2016)).

Conclusion

Ce chapitre regroupe les propriétés du matériau argileux étudié et les techniques expérimentales utilisées dans notre étude.

- Les propriétés physiques et minéralogiques du *Kaolin K13* étudié ainsi que les étapes de préparation de la boue d'argile utilisée pour la fabrication des échantillons, ont été détaillées.

- La méthode des solutions salines saturées a été utilisée comme méthode de contrôle de la succion pour le conditionnement et le séchage des échantillons. La précision de cette méthode a été également vérifiée.

- Les paramètres d'état des échantillons d'argile sous différentes succions imposées ont été obtenues par l'essai au Kerdane. Les techniques de détermination de la teneur en eau, du degré de saturation et de l'indice des vides ont été présentées.

- Le logiciel Image-J nous a permis de réaliser une analyse quantitative des fissures qui apparaissent sur la surface de l'échantillon et d'étudier la concentration des déformations en traction à la pointe de la fissure.

- L'interaction support/argile a été étudiée par un essai modifié de cisaillement direct pour évaluer le frottement au niveau de l'interface. Ceci nous a permis de confirmer l'hypothèse selon laquelle l'effet du support lisse sur le retrait de l'échantillon est très faible et négligeable a été vérifiée.

Chapitre IV

Phénomène du retrait – Mise en évidence par l'observation

Chapitre IV. Phénomène du retrait – Mise en évidence par l’observation

Sommaire :

Introduction

1 Courbe de retrait et Courbe de rétention d’eau du *Kaolin K13*

1.1 Détermination de la courbe de retrait

1.2 Etude de la courbe de rétention d’eau

2 Étude du phénomène de retrait, approche par la technique CIN

2.1 Contrôle et suivi de l’humidité relative

2.2 Retrait - analyse à l’échelle globale du grand échantillon

2.3 Déformations locales – Analyse

2.4 Teneur en eau et succion locale dans la matrice

Conclusion

Introduction

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons déterminé par la mesure la déformation volumique du retrait, et sur la base des résultats expérimentaux de petits échantillons nous allons calculer les paramètres sous différents chemins de séchage. La courbe de retrait et la courbe de rétention d'eau du matériau étudié peuvent être établies. La détermination de ces deux courbes caractéristiques du sol nous permet d'avoir une solution multi-échelle (locale ou globale) pour estimer la teneur en eau et la succion en utilisant la déformation volumique de retrait.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, l'étude se concentre sur le phénomène de retrait de l'échantillon dû à la dessiccation contrôlée. La dessiccation contrôlée, par la méthode de la solution saline, permet de soumettre les échantillons au même chemin de dessiccation. Pendant le processus de la dessiccation contrôlée, l'humidité relative contrôlée par la solution saline KOH est imposée à l'échantillon, la température est systématiquement mesurée dans une chambre à température contrôlée. Les variations de la teneur en eau et des vitesses de séchage au cours de la dessiccation sont également mesurées.

Nous avons d'abord étudié la déformation de retrait du point de vue global en utilisant la technique CIN. L'échelle locale est étudiée par les zones choisies aléatoirement sur la surface de l'échantillon. Ces déformations locales de retrait seront utilisées dans le chapitre suivant pour approcher l'initiation et la propagation de fissures au cours de séchage.

Enfin, la dernière partie de ce chapitre est dédiée la teneur en eau locale et à la succion locale au cours du retrait libre. La teneur en eau locale et la succion locale de l'échantillon sont estimées à partir de la déformation globale locale couplée à la courbe rétention eau et à la courbe de retrait de notre matériau.

1 Courbe de retrait et Courbe de rétention d'eau du *Kaolin*

K13

D'une manière générale, la courbe de retrait d'un sol (en l'anglais *Soil Shrinkage Curve* SSC) montre la relation entre l'indice des vides e , ou la déformation volumique ε_v , et la teneur en eau w .

Certaines études ont montré que la courbe de retrait est étroitement liée à la capacité de rétention d'eau (en l'anglais *Soil Water Retention Curve* SWRC) (Fredlund et al., 2002). La courbe de rétention d'eau montre la relation entre la teneur en eau w ou le degré de saturation S_r et la succion s .

Les essais au Kerdane permettent de mesurer le volume d'un échantillon d'argile à l'état non-saturé, et estimer ainsi l'indice des vides. Les procédures expérimentales et les méthodes de calcul des paramètres ont été décrites dans la chapitre III partie 3.

1.1 Détermination de la courbe de retrait

La figure IV.1 présente les évolutions de l'humidité relative HR et la succion imposée s_{glob} par les quatre solutions salines (K_2CO_3 , $NaCl$, Na_2SO_4 et $CaSO_4$), en fonction du temps de séchage. Ici, les valeurs de la succion imposée ont été calculées à partir des valeurs mesurées de l'humidité relative et la température T avec l'équation basée sur la loi de Kelvin indiquée dans la chapitre III section 2.2 (Eq.III.1) dont l'écriture est reprise comme suit :

$$s_{glob} = -\frac{\rho_w RT}{M_w} \ln\left(\frac{HR\%}{100}\right) \quad \text{Eq. IV. 1}$$

Les courbes (Fig. IV.1 a) montrent que les humidités relatives atteignent leurs valeurs constantes après une longue période (une vingtaine de jours). Selon le principe de la technique d'équilibre de la vapeur, les transferts d'eau se produisant entre la solution saline et l'échantillon peuvent se décrire en deux états :

- Au début du séchage, les transferts d'eau s'effectuent avec l'échantillon encore saturé, l'équilibre de la vapeur ne peut pas encore se produire. Cet état correspond à la partie de la courbe où l'humidité relative augmente ou diminue.
- 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). Cet état correspond au plateau de la courbe où l'humidité relative est constante.

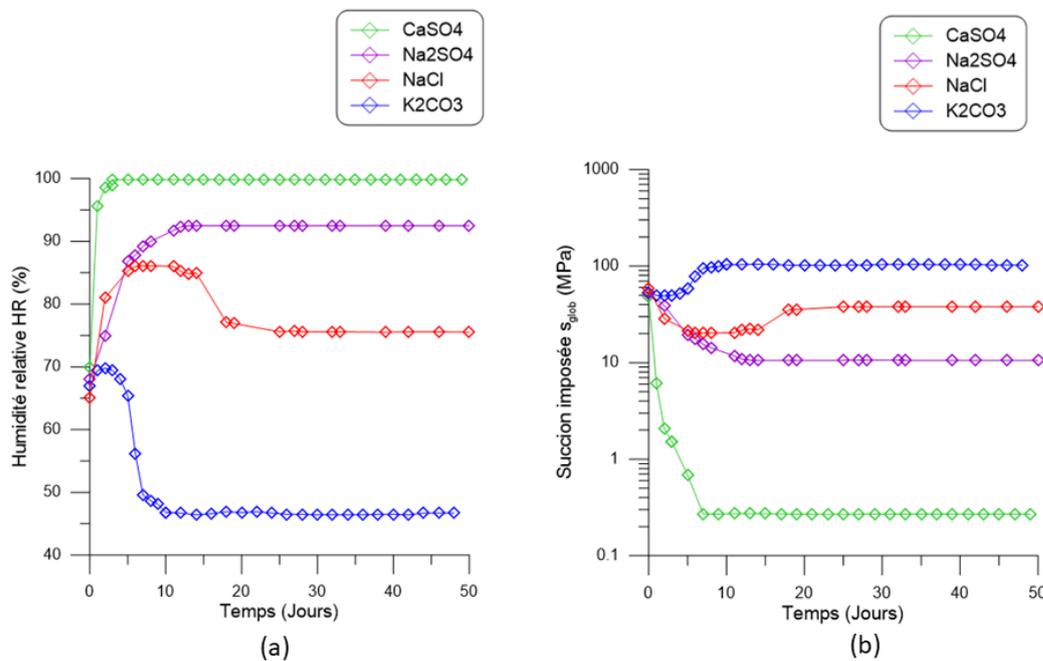


Figure IV.1 : Caractéristiques des solutions salines dans les dessiccateurs.
Variations de l'humidité relative contrôlée en fonction du temps,
Variations de la succion imposée en fonction du temps.

A partir de l'équation (Eq. IV.1) on peut constater que le facteur de température a un effet direct sur la succion imposée.

La température dans les dessiccateurs est la même que la température ambiante du laboratoire où les dessiccateurs sont placés. Cette température ambiante est contrôlée par système de climatisation, et sa plage de variation est d'un degré plus ou moins. Les fluctuations de la température n'affectent donc pas l'évolution de l'humidité relative et les calculs de succion imposée dans nos essais.

Tableau IV.1: Caractéristiques des solutions salines dans les dessiccateurs

Solutions salines utilisés	Humidité relative HR (%)	Succion imposée S_{glob} (MPa)
CaSO ₄	99,8	0,27
Na ₂ SO ₄	92,5	10,5
NaCl	75,5	38
K ₂ CO ₃	46,5	103,8
KOH	6,8	363,7

Les courbes de variation de la succion imposée (Fig. IV.1 b) suivent la même tendance que la

courbe de la variation de l'humidité relative (Fig. IV.1 a). L'humidité relative dans les dessiccateurs, à l'état d'équilibre, et succion correspondante sont indiquées dans le tableau IV.1.

La nomenclature ainsi que les caractéristiques hydriques des différents échantillons dans les dessiccateurs sont rappelées dans tableau IV.2.

Tableau IV.2 Caractéristiques et nomenclature des essais aux Kerdane.

EK : Essai Kerdane		Volume d'échantillon V_T (cm ³)	Teneur en eau w (%)	Degré de saturation S_r (%)	Indice des vides e	Succion S_{glob} (MPa)
Sel utilisé	Non de l'essai					
CaSO ₄	EK1-s0	1,93	34,9	99,4	0,92	0,27
	EK2-s0	1,96	33,9	99,3	0,89	0,27
	EK3-s0	1,96	34,5	98,2	0,91	0,27
Na ₂ SO ₄	EK1-s10	1,89	1,7	7,0	0,65	10,5
	EK2-s10	1,95	1,6	6,1	0,69	10,5
	EK3-s10	1,94	1,5	6,4	0,61	10,5
NaCl	EK1-s38	1,94	1,1	5,0	0,68	38
K ₂ CO ₃	EK1-s103	2,03	1,4	5,0	0,72	103,8
	EK2-s103	2,07	1,0	3,8	0,70	103,8
	EK3-s103	2,05	0,7	2,6	0,71	103,8
KOH	EK2-s363	3,25	0,9	3,3	0,71	363,7
	EK3-s363	3,14	0,7	2,9	0,70	363,7
	EK5-s363	2,76	0,9	3,3	0,67	363,7

Des petits échantillons correspondant au séchage de la solution KOH ont été obtenus à partir d'un échantillonnage local des grands échantillons d'essai prévus pour la dessiccation contrôlée. Ces petits échantillons sont des morceaux en forme de plaque mince d'une épaisseur de 5 mm et d'un volume d'environ 3 cm³.

- Courbe de retrait

La courbe de retrait du sol représente la variation de l'indice des vides lorsque le teneur en eau diminue. Notez qu'il est difficile d'obtenir une courbe entière en utilisant seulement les cinq teneurs en eau impliquées dans notre essai au Kerdane. Afin de mieux approcher la courbe de retrait, nous avons complété nos résultats avec d'autres résultats expérimentaux de la littérature (Indarto (1991) cité dans Taïbi (1994) tracés dans la figure IV.1 b, qui donnent l'indice des vides en fonction de la teneur en eau. Rappelons que ces résultats issus de la littérature sont obtenus sur l'argile *Kaolinite P300*, un matériau proche de la K13 comme présenté dans le chapitre III section 1.1.

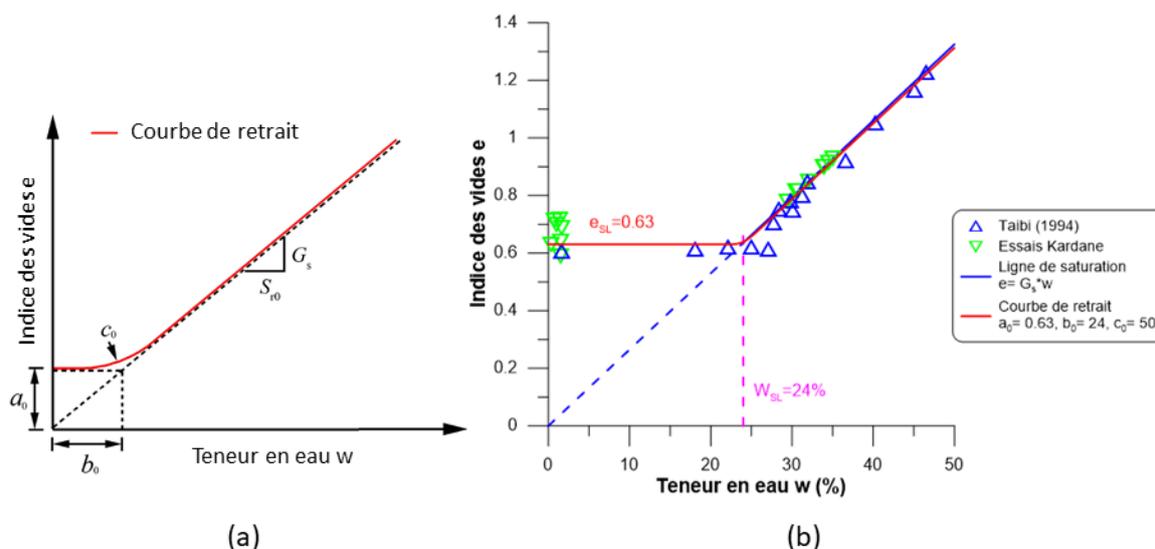


Figure IV.2 : Courbe de retrait du sol - (a) Courbe de retrait typique, (b) Variation de l'indice des vides en fonction de la teneur en eau (Indarto (1991) cité dans Taïbi (1994)).

Pour les sols, il existe une relation entre la teneur en eau w , l'indice des vides e et le degré de saturation S_r :

$$S_r = \frac{G_s \cdot w}{e} \quad \text{Eq. IV. 2}$$

G_s étant la densité spécifique des solides.

Sur un chemin de dessiccation, la relation entre e et w est décrite par la courbe de retrait. La figure IV.2 (a) montre une courbe de retrait typique. A l'état saturé, e diminue avec la diminution de w suivant la ligne de saturation avec une pente égale à G_s/S_{r0} . Ensuite, lorsque w diminue, le sol atteint l'état non-saturé, la pente diminue jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur de zéro et e tend progressivement vers une valeur constante.

De nombreux chercheurs ont développé des lois pour caractériser la courbe de retrait. Parmi ces fonctions, nous avons choisi l'équation à trois paramètres proposés par Fredlund et al. (2002) dont l'expression est :

$$e = a_0 \left[\left(\frac{w}{b_0} \right)^{c_0} + 1 \right]^{1/c_0} \quad \text{Eq. IV.3}$$

$$b_0 = \frac{S_{r0} \cdot a_0}{G_s} \quad \text{Eq. IV.4}$$

a_0 est la valeur minimale de l'indice des vides ; b_0 est le paramètre déterminant la pente de la ligne de saturation ; c_0 est la courbure de la courbe de retrait et S_{r0} est le degré de saturation initial.

- Limite de retrait - e_{SL} et w_{SL}

La figure IV.3 (b) montre les résultats expérimentaux de retrait de la kaolinite (*Kaolinite P300 et Kaolin K13*) sur le chemin de séchage. En théorie de l'équation Fredlund (Eq.IV.3), la limite de retrait est définie comme l'intersection de la ligne de saturation et la ligne asymptotique horizontale de la courbe (Fig. IV.3 a). La teneur en eau à la limite de retrait w_{SL} est liée au paramètre a_0 dans l'équation. La valeur de a_0 est égale à 0,63, qui correspond à la valeur moyenne de l'indice des vides minimale e_{min} dans les résultats expérimentaux et les données de la littérature. Le paramètre b_0 est déterminé par l'équation Eq.IV.4. Sa valeur est égale à 24 (en pourcentage) qui correspond à la w_{SL} .

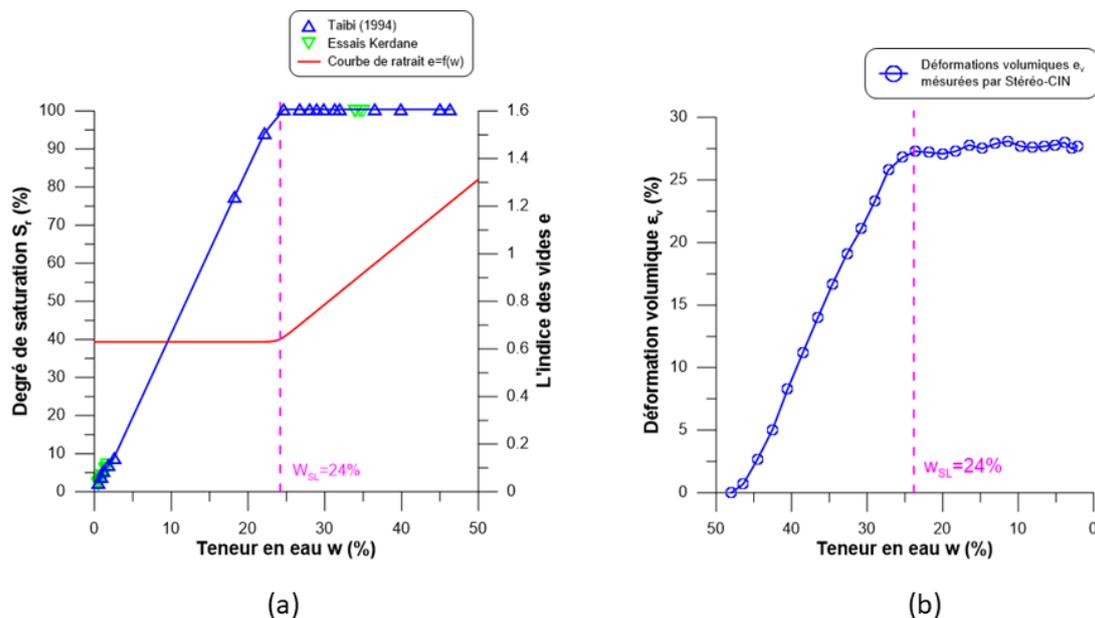


Figure IV.3 : (a) Variation du degré de saturation en fonction de la teneur en eau (Indarto (1991) cité dans Taïbi (1994)) et la courbe de retrait, (b) Déformation volumique en fonction de la teneur en eau – cas de l'essai DC7-TG-3D-s385.

La figure IV.3 (a) montre la variation du degré de saturation en fonction de la teneur en eau. Les résultats du degré de saturation proviennent du même ensemble d'essais Kerdane.

La figure IV.3 (b) montre un exemple de la variation de déformation volumique ε_v du grand échantillon d'argile sur le chemin de séchage (l'essai dessiccation contrôlée DC7-TG-3D-s385).

La déformation volumique tracée est la somme des trois déformations axiales de l'échantillon, qui sont mesurées par la Stéréo-DIC. Le grand échantillon a le même état initial saturé que les petits échantillons. Leur teneur en eau initiale est de 1,2 fois la limite de liquidité ($w_0 = 1,2 \cdot w_L = 48 \%$). Lorsque la teneur en eau globale de l'échantillon atteint la limite de retrait, la variation de ε_v se stabilise à sa valeur maximale, $\varepsilon_{v \max} = 27,2 \%$.

Le paramètre c_0 est lié à la diminution de l'indice des vides près de la limite de retrait, qui est la courbure de la courbe de retrait. La valeur de c_0 est égale à 50, qui est la valeur optimale obtenue par l'équation d'ajustement de la courbe de retrait

Les valeurs sont $a_0 = 0,63$; $b_0 = 24$ et $c_0 = 50$ avec le coefficient de détermination d'ajustement $R^2 = 0,9743$. Ces paramètres sont représentés dans le tableau IV.3. La courbe de retrait est donc exprimée par la relation suivante :

$$e = 0,63 \left[\left(\frac{w}{24} \right)^{50} + 1 \right]^{1/50} \quad \text{Eq. IV.5}$$

Tableau IV.3 : Paramètres de l'équation de Fredlund.

Paramètres de l'équation Fredlund		
a_0	L'indice des vides à la limite de retrait	0,63
b_0	Teneur en eau à la limite de retrait	24 %
c_0	Courbure de la courbe	50

Cette relation permet, par la suite, de calculer l'indice des vides de nos grands échantillons (les échantillons d'essai dessiccation contrôlée) à une teneur en eau donnée.

1.2 Etude de la courbe de rétention d'eau

L'ensemble d'essai Kerdane a imposé cinq valeurs de succion différentes (0,27 MPa, 1,5 MPa, 38 MPa, 103,8 MPa et 363,7 MPa) aux petits échantillons d'argile dans les dessiccateurs en utilisant différentes solution salines (Tableau IV.1). Afin d'étudier les relations w - s et S_r - s , nous avons utilisé l'équation proposée par [Van Genuchten \(1980\)](#) pour déterminer les courbes de rétention d'eau du matériau étudié.

L'équation d'ajustement de la courbe de rétention d'eau proposée par Van Genuchten exprime la relation entre la teneur en eau volumétrique θ et la succion s . L'expression de l'équation est la suivante :

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{s}{\alpha}\right)^n\right]^m} \quad \text{Eq. IV.6}$$

D'où θ est la teneur en eau volumétrique ; s est la succion ; θ_r est la teneur en eau volumétrique résiduelle ; θ_s est la teneur en eau volumétrique saturée. n , m et α sont des paramètres liés au type de sol.

Il convient de noter que la teneur en eau des résultats d'essai Kerdane représentent la teneur en eau massique w du sol. Afin de mieux adapter à l'équation d'ajustement, la teneur en eau volumétrique du sol est calculée par l'équation suivante :

$$\theta = w \cdot \frac{G_s}{1 + e} \quad \text{Eq. IV.7}$$

En général, des résultats expérimentaux permettent d'obtenir le meilleur ajustement des courbes de fittage. Nous avons donc introduit les résultats expérimentaux de [Wei \(2014\)](#) et [Indarto \(1991\)](#) (cité dans [Taïbi, 1994](#)) pour enrichir l'ensemble de données et d'améliorer aussi la précision de l'ajustement, et la fiabilité de la courbe de fittage.

- Courbe de rétention d'eau

Les résultats expérimentaux sont reproduits dans la figure IV.4, qui représente les variations de la teneur en eau volumétrique θ en fonction de la succion globale s de l'argile. Nous avons noté que les échantillons étudiés par [Indarto \(1991\)](#) et [Wei \(2014\)](#), sont fabriqués par une boue d'argile saturée. Les teneurs en eau initiales sont respectivement à $1,5 \cdot w_L$ et w_L .

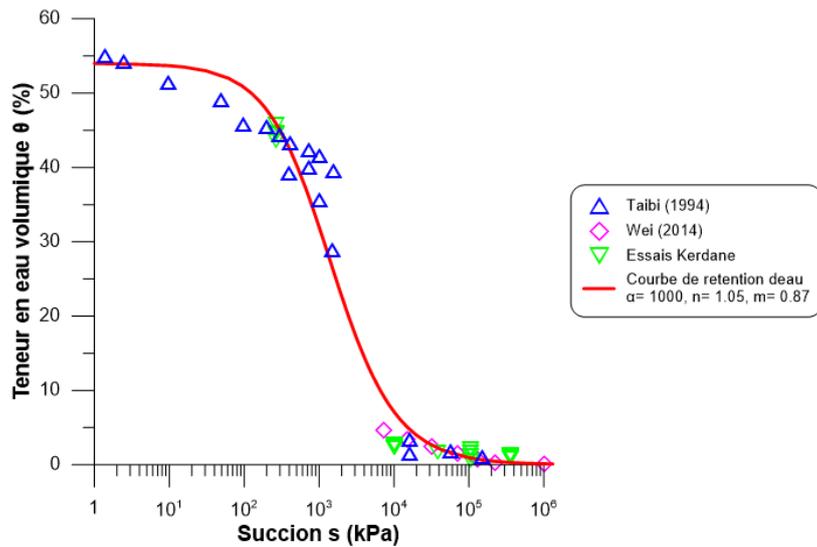


Figure IV.4 Variation de la teneur en eau volumétrique en fonction de la succion (Indarto (1991) cité dans Taibi (1994) ; Wei (2014))

La teneur en eau volumétrique résiduelle θ_r est de 0,1 %, ce qui correspond à θ minimale dans l'ensemble de données. La teneur en eau volumétrique saturée θ_s est de 56 %, ce qui correspond à θ maximale dans l'ensemble de données.

Le paramètre α correspond à la succion au point d'entrée d'air (AE). Cette valeur de succion est déterminée par la relation entre le degré de saturation et la succion. La figure IV.5 représente la variation de S_r en fonction de s . Pour le Kaolin K13, la valeur de succion au point AE est proche de 1000 kPa.

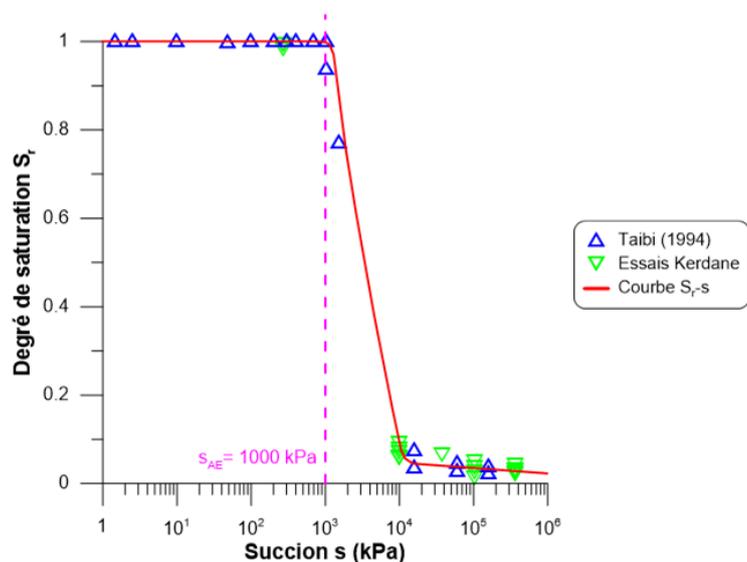


Figure IV.5 Variation du degré de saturation en fonction de la succion (Indarto (1991) cité dans Taibi (1994)).

Les paramètres n et m sont les paramètres d'ajustement qui contrôlent la courbure de la courbe. Leurs valeurs optimales sont obtenues par les calculs d'ajustement de la courbe

de rétention d'eau avec l'équation Eq.IV.6. Les valeurs de n et m sont respectivement égales à 1,05 et 0,87 avec le coefficient de détermination d'ajustement $R^2 = 0,9218$. Ces paramètres sont représentés dans le tableau IV.4. La courbe de rétention d'eau peut être exprimée par la relation suivante :

$$\theta = 0,001 + \frac{0,56 - 0,001}{\left[1 + \left(\frac{s}{1000}\right)^{1,05}\right]^{0,87}} \quad \text{Eq. IV.8}$$

Tableau IV.4 : Paramètres de l'équation de Van Genuchten.

Paramètres de l'équation Van Genuchten		
α	Succion au point d'entrée d'air	1000 kPa
n	Courbure de courbe	1,05
m	Courbure de courbe	0,87
θ_r	Teneur en eau volumétrique résiduelle	0,001
θ_s	Teneur en eau volumétrique saturée	0,56

La courbe obtenue (la courbe rouge dans la Fig. IV.4) montre le chemin de séchage en fonction de la succion.

On observe que la succion correspondant à la limite de retrait s_{SL} est environ 1500 kPa. Aux succions 0,27 MPa, 10,5 MPa, 38 MPa, 103,8 MPa et 363,7 MPa, les teneurs en eau volumétriques sur la courbe sont respectivement égales à 46 %, 6,6 %, 2,0 %, 1,2 % et 0,7 %. Les teneurs en eau gravimétriques moyennes des petits échantillons d'argile sont respectivement égales à 34,4 %, 1,6 %, 1,1 %, 1,0 % et 0,8 %.

Grâce à l'études de la courbe de retrait et la courbe de rétention d'eau de l'argile - *Kaolin K13*, certaines variations hydriques et physiques (la teneur en eau, la succion et la déformation volumique etc.) sous dessiccation ont été obtenues. Les relations entre les différents paramètres d'état (w, s, e) sont bien montrées à partir des courbes caractéristiques du sol.

Ces deux courbes seront utilisées pour interpréter les comportements du grand échantillon d'argile sous dessiccation contrôlée.

2 Étude du phénomène de retrait, approche par la technique CIN

La technique de CIN a été utilisée pour observer les variations des déformations globales (échelle de l'échantillon) et des déformations locales (échelle du pixel environ 10-100 μm) de l'échantillon sous dessiccation contrôlée. Les dispositifs expérimentaux, la manipulation d'essai et les méthodes principales de calcul dans le cadre de ce chapitre, sont présentés en détail dans les chapitres II et III.

2.1 Contrôle et suivi de l'humidité relative

L'essai de dessiccation contrôlée est une méthode expérimentale pour étudier le retrait dû au séchage. Il impose une succion nécessaire à un échantillon saturé en contrôlant HR dans une chambre fermée. Dans le cadre de ce chapitre, nous avons seulement utilisé la solution de KOH pour imposer une succion globale théorique de 325 MPa (à 20 °C), dans la chambre de contrôle (voir figure de dispositif Fig. III.4 dans le chapitre III section 2.1). Dans ce cas, tous les grands échantillons sont soumis au même chemin de séchage.

Tous les essais de dessiccation contrôlée sont représentés dans le tableau IV.5. La nomenclature adoptée pour chaque essai est formulée par :

DC (Dessiccation contrôlée) **numéro d'essai** (1 à 7) - **Support d'échantillon** (PG, TF et TG) - **Type de CIN** (2D ou 3D) - **s valeur de succion imposée** (MPa).

Tableau IV. 5 : Caractéristiques et nomenclature des essais de dessiccation contrôlée.

DC : Dessiccation Contrôlée			Humidité relative (%)	Succion (MPa)
Support d'échantillon	Type de CIN	Non de l'essai		
Semi-rugueux	CIN-2D	DC1-PG-2D-s359	7	359
Semi-rugueux		DC2-PG-2D-s361	6,9	361
Intermédiaire		DC3-TF-2D-s381	6	381
Intermédiaire	CIN-3D	DC4-TF-3D-s387	5,7	387
Semi-rugueux		DC5-PG-3D-s390	5,6	390
Lisse		DC6-TG-3D-s387	5,7	387
Lisse		DC7-TG-3D-s385	5,8	385

Les trois types de support d'échantillon sont également présentés. Ils sont respectivement le support semi-rugueux en Plexiglas (*PG*), le support intermédiaire en Teflon (*TF*) et le support lisse en Teflon avec surface traité (*TG*).

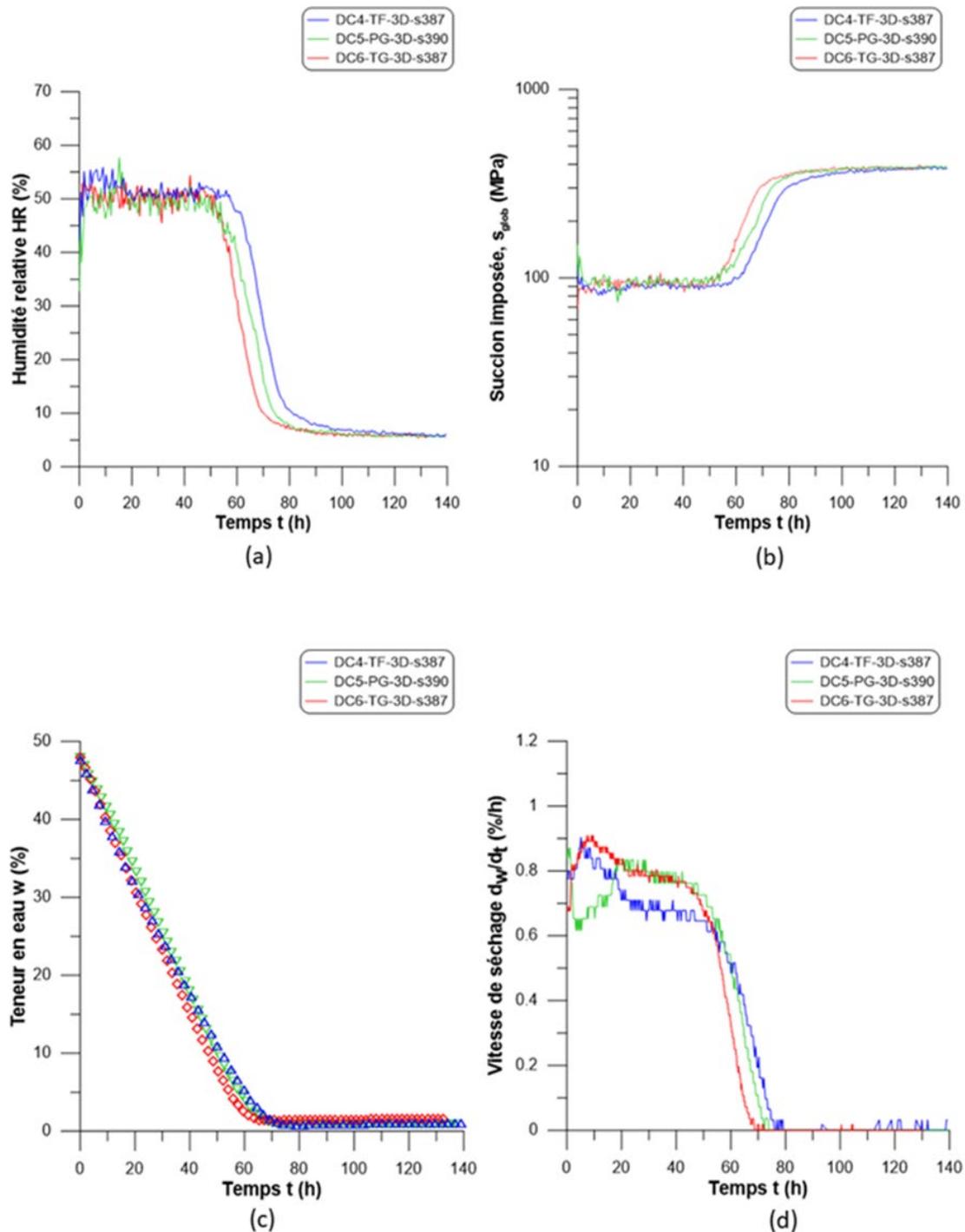


Figure IV.6 : Dessiccation contrôlée
 (a) Variation de l'humidité relative en fonction du temps,
 (b) Variation de la succion en fonction du temps,
 (c) Évolution de la teneur en eau en fonction du temps,
 (d) Vitesse de séchage en fonction du temps.

La figure IV.6 (a) présente les évolutions de l'humidité relative (HR) imposée par la solution saline KOH en fonction du temps de séchage pour les trois essais de dessiccation contrôlée ($DC4-TF-3D-s387$, $DC5-PG-3D-s390$ et $DC6-TG-3D-s387$). Les échantillons de ces trois essais représentés dans la figure, utilisant trois supports différents, ont été étudiés par CIN-3D dans le même dispositif expérimental.

Les courbes montrent que l'humidité relative oscille dans une plage relativement petite (environ $\pm 5\%$) au début de l'essai de dessiccation. Sa valeur est proche de l'humidité relative ambiante ($50\% \sim 55\%$), et elle est supérieure à la valeur théorique de l'humidité relative imposée correspondant à la solution saline KOH.

Nous avons des raisons d'exclure que la température ambiante soit la cause de l'oscillation de l'humidité, car la température dans le laboratoire est contrôlée et sa plage de variation est de $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$. Une courbe de suivi de la température a été menée pendant 180 h, on peut voir que la température ne présente pas d'oscillations similaires à l'humidité relative (voir la Fig. IV.7).

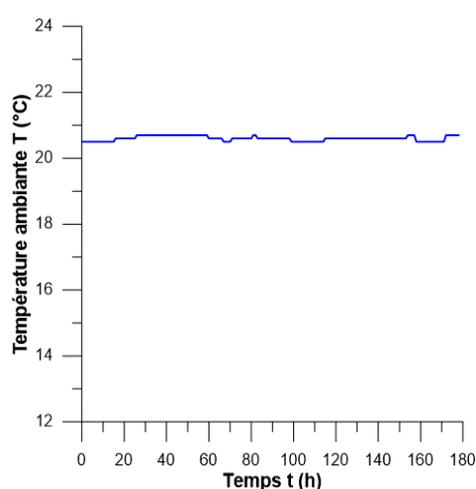


Figure IV.7 : Variation de la température ambiante en fonction du temps.

On peut également constater que l'humidité relative chute rapidement après 50 h et commencent à se stabiliser vers 80 h. Les valeurs stables d'humidité relative pour les trois essais sont similaires et leur moyenne ($5,7\%$) est inférieure à la valeur théorique ($HR = 9\%$ pour KOH à $20\text{ }^\circ\text{C}$).

2.2 Retrait - analyse à l'échelle globale du grand échantillon

Les déformations globales ε_x , ε_y et ε_z sont représentées à partir des trois composantes axiales de la déformation volumique, pendant la dessiccation contrôlée. Ces déformations globales décrivent le comportement de l'échantillon à l'échelle globale. Compte tenu de la géométrie de l'échantillon, nous avons d'abord étudié la déformation dans les directions horizontale et verticale. La déformation volumique de l'échantillon est ensuite étudiée.

L'effet du retrait anisotrope de l'échantillon dû à la forme géométrique et l'effet de l'interaction argile/support sont également étudiés.

Afin d'étudier le retrait libre de l'échantillon, un support lisse avec surface traitée (support en téflon avec surface traitée à la graisse : *TG*) a été utilisé pour éliminer le frottement entre le matériau et le support. L'utilisation de ce type de support est similaire à l'installation utilisée par Péron (2008). Les essais réalisés pour valider ce type de support sont décrits en détail au Chapitre III. On suppose donc que les déformations observées par la CIN dans le cas de l'échantillon avec un support *TG* indiquent les déformations de retrait libre.

La figure IV.8 représente un schéma de l'échantillon sur un support *TG* et représente les déformations globales de l'échantillon suivant les trois directions axiales.

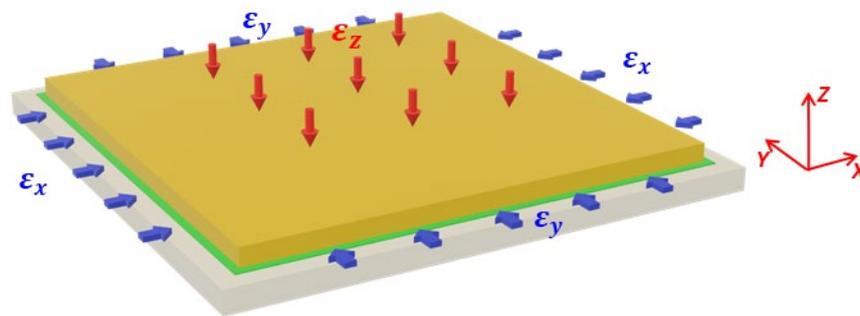


Figure IV.8 : Schéma des déformations globales ε_x , ε_y et ε_z de l'échantillon sur le support lisse.

- Déformations horizontales ε_x et ε_y

Les déformations horizontales globales ε_x et ε_y sont estimées. Le calcul se fait à partir des déplacements locaux obtenus par la CIN dans les bandes longeant les bords du grand échantillon. Le détail de la méthode de calcul est décrit dans le chapitre II section 3.1.

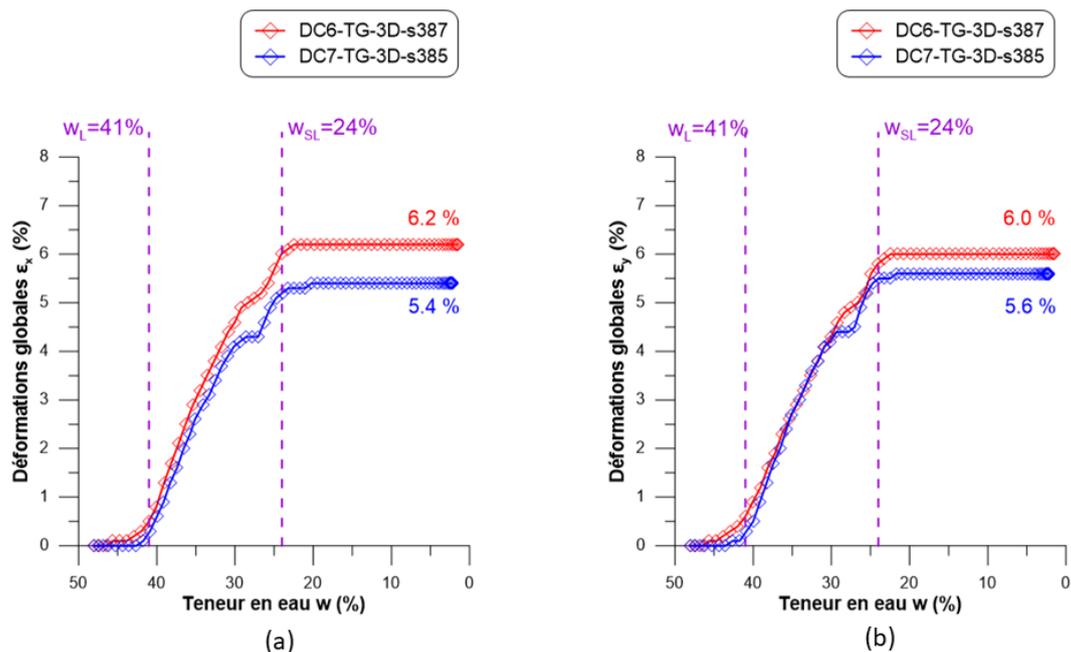


Figure IV.9 : Déformations horizontales globales

- (a) Variation de la déformation globale suivant l'axe X en fonction de la teneur en l'eau,
 (b) Variation de déformation globale suivant l'axe Y en fonction de la teneur en l'eau.

Afin de présenter les déformations horizontales du retrait (ε_x et ε_y), nous avons choisi de présenter l'essai *DC6-TG-3D-s387* et l'essai *DC7-TG-3D-s385*, utilisant le même support, lisse à surface traitée. Cela assure des déformations avec un frottement réduit au minimum.

La figure IV.9 présente les variations des déformations horizontales globales obtenues en fonction de la teneur en eau. La déformation ε_x est présentée en figure IV.9 (a) et la déformation globale ε_y en figure IV.9 (b).

Les résultats montrent que le développement des déformations dans les deux directions peut être divisé en trois intervalles de teneur en eau. En considérant les deux teneurs en eau caractéristiques de l'argile étudié (w_L et w_{SL}) :

- w dans l'intervalle 48 % et 41 % : En raison de la forte teneur en eau, l'échantillon reste à l'état liquide. Le séchage est principalement effectué sur la surface supérieure de l'échantillon, en contact avec l'air. Le retrait observé est principalement vertical (déformation verticale ε_z en figure IV.10). La déformation horizontale augmente lentement dans cet intervalle.
- w se situe entre w_L et w_{SL} (41 % et 24 %) : Le retrait horizontal se développe, on peut observer une croissance rapide de ε_x et ε_y jusqu'à la limite de retrait du matériau. Les courbes présentent des tendances très similaires pour les deux échantillons dans l'évolution de la déformation horizontale.
- w se situe au-delà de w_{SL} (de 24% à 0 %) : A w_{SL} , les déformations ε_x et ε_y

commencent à tendre vers un plateau. Les déformations ε_x sont stables pour les deux échantillons. Elles sont de 6,2 % pour l'essai *DC6-TG-3D-s387*, et 5,4 % pour l'essai *DC7-TG-3D-s385* (Fig. IV.9 a). Les déformations ε_y sont stables pour les deux échantillons, elles sont de 6,0 % pour l'essai *DC6-TG-3D-s387* et 5,6 % pour l'essai *DC7-TG-3D-s385* (Fig. IV.9 b). On peut noter une différence de moins 1 % ($\Delta\varepsilon_x = 0,8\%$ et $\Delta\varepsilon_y = 0,4\%$) dans la déformation horizontale des différents échantillons.

Par ailleurs, pour le même essai, on observe que la déformation ε_x est similaire à la déformation ε_y , et les deux courbes évoluent avec la même tendance. Vu que l'échantillon a une géométrie symétrique, nous prenons l'hypothèse suivante :

$$\varepsilon_h = \varepsilon_x \approx \varepsilon_y \quad \text{Eq. IV. 9}$$

ε_h est la déformation globale horizontale de l'échantillon. Cette hypothèse sera utilisée pour déterminer le coefficient d'anisotropie η .

- Déformations verticales ε_z

La déformation globale verticale notée ε_z est calculée à partir des déplacements locaux verticaux, notés W , mesurés par la CIN-3D sur surface supérieure de l'échantillon. Cette déformation représente la déformation dans la direction verticale (selon l'axe Z, voir Fig. IV.8). La méthode de calcul est décrite dans le chapitre II section 3.1. Notons qu'une zone en dehors des bords a été choisie pour le calcul afin d'éviter les effets de bords liés au phénomène de uplift plus sensible aux bords de l'échantillon. La zone carrée délimitée par la ligne en pointillé jaune de la figure IV.10 (a) représente cette zone de calcul pour la déformation verticale. Le choix de cette zone a été fixé et appliqué pour tous les essais de CIN-3D.

La figure IV.10 (b) présente les variations de la déformation globale verticale en fonction de la teneur en eau, pour les deux essais aux supports lisses et surface traitée.

Par rapport aux déformations horizontales lors du retrait, les déformations verticales sont beaucoup plus importantes. On peut noter les étapes suivantes :

- Lorsque la teneur en eau est supérieure à w_L (w se situe entre 48% et 41%), le retrait se manifeste principalement sous forme de déformation verticale. C'est dû au fait que la surface supérieure est en contact avec l'air et permet une évaporation plus importante par la surface de l'échantillon dès le lancement du séchage.
- Lorsque la teneur en eau est entre w_L et w_{SL} (w se situe entre 41 % et 24 %), l'échantillon passe de l'état liquide à l'état solide, une cohésion de type capillaire augmente dans le sol, ce qui entraîne le développement rapide de la déformation horizontal. Par conséquent, la croissance de la déformation verticale de l'échantillon ralentit légèrement dans cette période.

- Lorsque la teneur en eau est plus petite que w_{SL} (w se situe entre 24 % et 0 %), la déformation ε_z commence à tendre vers un plateau. Les déformations ε_z se stabilisent pour les deux échantillons, à 15,8 % pour l'essai *DC6-TG-3D-s387* et à 17,4 % pour l'essai *DC7-TG-3D-s385* (Fig. IV.10 b).

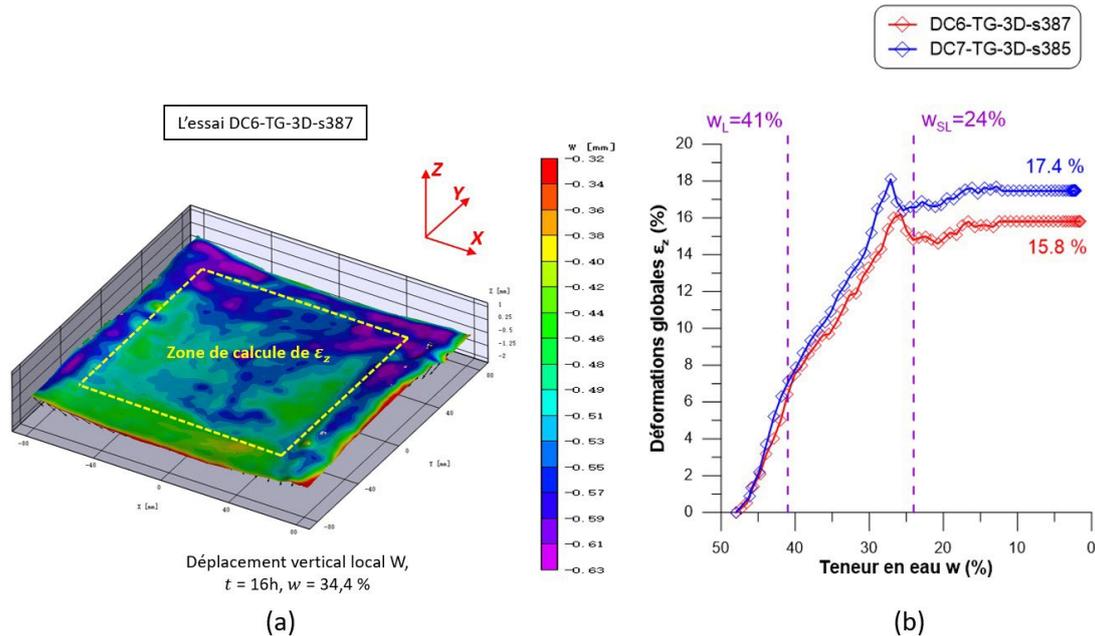


Figure IV.10 : Déformation verticale globale (a) Topographie du déplacement vertical local de l'essai *DC6-TG-3D-s387*, $t = 16$ h et $w = 34,4$ % ; (b) Évolution de la déformation globale verticale en fonction de la teneur en eau.

Remarque :

Dans la figure IV.10 (b) un pic sur la courbe de déformation ε_z est observé lorsque la teneur en eau s'approche de la limite de retrait w_{SL} . Ce pic n'est pas un cas isolé, il est présent dans beaucoup de résultats expérimentaux. Si on prend comme exemple l'essai *DC6-TG-3D-s387* (courbe rouge dans la Fig. IV.10 b), le pic suggère un gonflement, puis une compression dans l'intervalle [26 % - 24 %] de la teneur en eau. Cette évolution de la déformation ε_z estimée en moyennant des valeurs mesurées localement n'est pas physique. Elle est liée au fait que la mesure détecte des déplacements verticaux locaux opposés, qui minimisent la valeur moyenne du déplacement global vertical, et par conséquent affecte les résultats du calcul des déformations globales.

Pour vérifier cette interprétation, on présente dans la figure IV.11 ci-dessous une série de topographies de déplacement vertical local W , ce qui permet d'analyser le comportement de l'échantillon dans l'intervalle [26 % - 24 %] de w .

La figure IV.11 montre la distribution des déplacements verticaux locaux W sur la surface supérieure de l'échantillon, ainsi que la morphologie de la surface supérieure de l'échantillon correspondant aux différents teneurs en eau. Les flèches indiquent le déplacement local, les valeurs positives sur la légende signifient une direction vers le haut du déplacement, et les valeurs négatives signifient que le déplacement est vers le bas.

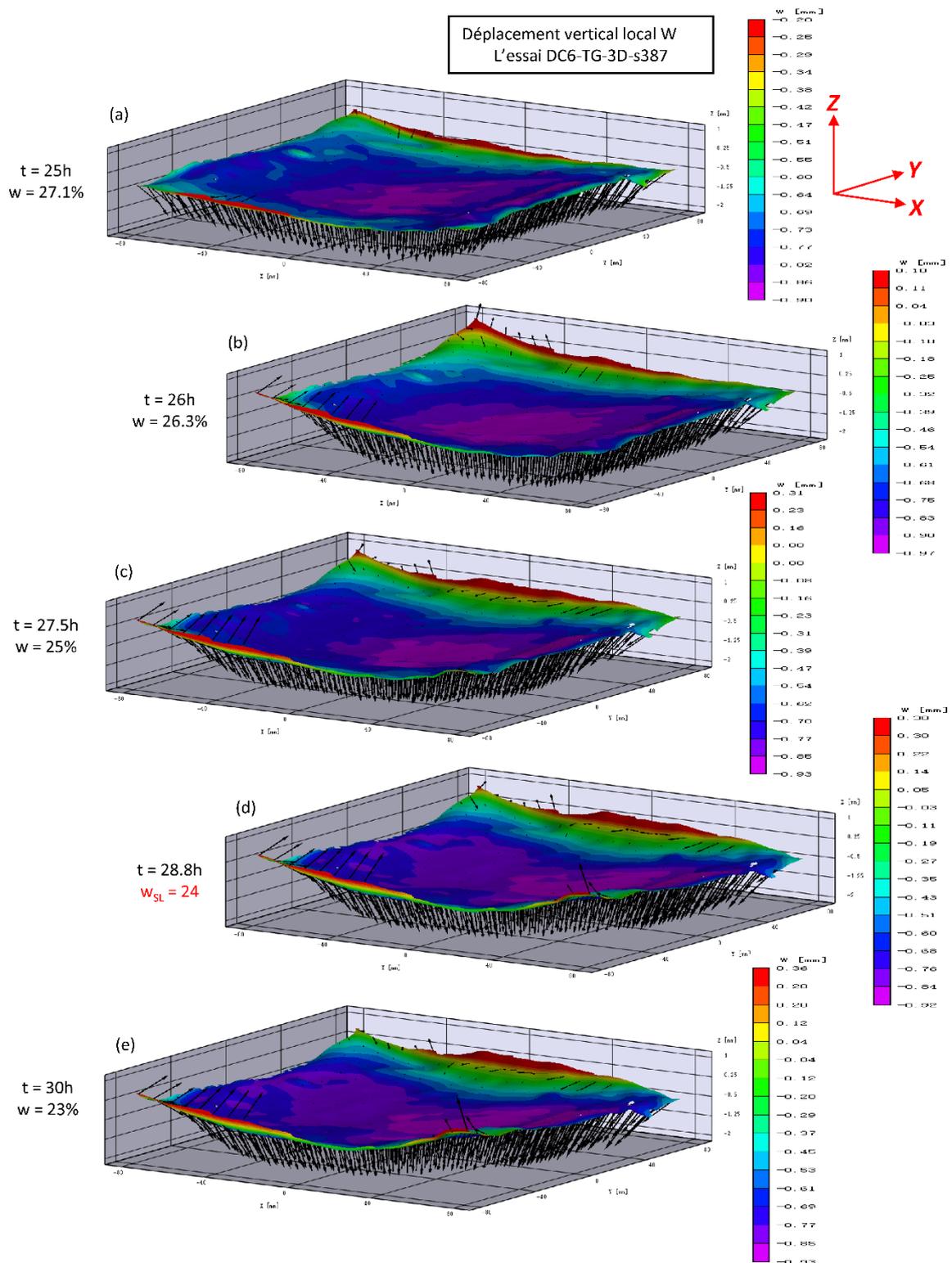


Figure IV.11 : Topographie de déplacements verticaux W au cours du séchage.

Dans la figure IV.11 (a) (à un séchage de $t = 25\text{ h}$ et $w = 27,1\%$), les déplacements verticaux sont tous négatifs, ce qui signifie un tassement global de la surface supérieure

de l'échantillon. Le déplacement maximal de 0,9 mm se trouve au centre de l'échantillon, correspondant à la zone violette. Le déplacement minimal de 0,2 mm se trouve au bord de l'échantillon correspondant à la zone rouge.

La figure IV.11 (b) montre la surface supérieure de l'échantillon après 26,3 h de séchage, avec une teneur en eau de 26 %. On a observé des déplacements positifs (vers le haut) au niveau des deux coins de l'échantillon avec le déplacement maximal de 0,18 mm. La morphologie de la surface de l'échantillon indique que les bords de l'échantillon se sont déjà soulevés. Dans le même temps, le déplacement local vertical vers le bas causé par le retrait continue de se développer au centre de l'échantillon et atteint un déplacement maximal de 0,97 mm. Ce moment correspond également à la valeur maximale de la déformation verticale, comme l'indique la courbe rouge de la figure IV.10 (b).

Les figures IV.11 (c), (d), et (e) représentent l'état de la surface de l'échantillon avec une teneur en eau allant de 25 % à 23 %. Le uplift de l'échantillon s'est développé, nous avons mesuré un déplacement positif maximal de 0,38 mm au bord de l'échantillon lorsque celui-ci a atteint la limite de retrait (Fig. IV.11 d, $t = 28,8$ h, $w = w_{SL}$). D'autre part, nous avons observé une diminution du déplacement local vers le bas au centre de l'échantillon, le déplacement maximal vers le bas diminuant de 0,92 mm à 0,97 mm.

En comparant la figure IV.11 (d) et la figure IV.11 (e), on constate que la distribution des déplacements locaux verticaux et la morphologie de la surface de l'échantillon ne changent pas de manière significative après la limite de retrait.

En résumé, nous avons le pic obtenu sur la courbe de la déformation globale verticale est le résultat du uplift qui se produit sur les bords de l'échantillon, le phénomène lui-même est lié au retrait. On peut remarquer qu'au fur et à mesure que la déformation du retrait augmente, l'effet uplift augmente. L'effet maximal est atteint à la limite du retrait et se stabilise par la suite.

Par ailleurs, l'effet uplift est principalement concentré sur le bord de l'échantillon, la méthode existante de sélection de la zone pour le calcul de la déformation permet d'éviter que cet effet marque trop la mesure de la déformation verticale.

On peut remarquer que l'uplift affecte légèrement la zone centrale avec un effet décroissant du bord de l'échantillon vers le centre.

- Déformations volumiques ε_v

La CIN-3D et la méthode de calcul de la déformation globale présentée précédemment ont permis d'obtenir les trois composantes ε_x , ε_y et ε_z , permettant de déterminer la déformation volumique au cours de la dessiccation contrôlée. Soit :

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad \text{Eq. IV. 10}$$

Rappelons que lors de dessiccation contrôlée, le support lisse permet d'obtenir une déformation volumique approchant au mieux le retrait libre. Les courbes de variation de la déformation volumique en fonction de la teneur en eau pour l'essai DC6-TG-3D-s387 et l'essai DC7-TG-3D-s385 sont tracées ci-dessous dans la figure IV.12.

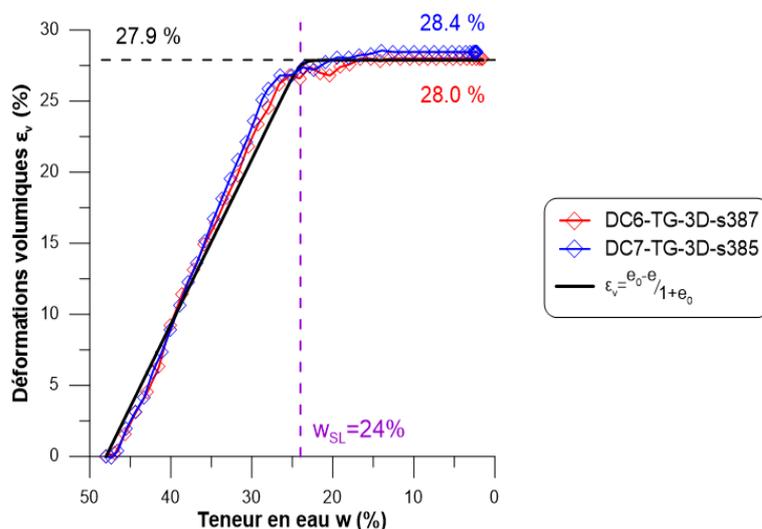


Figure IV.12 : Évolution de la déformation volumique en fonction de la teneur en eau.

D'autre part, à partir de la relation entre la porosité et la teneur en eau obtenue par la courbe de retrait (Fig. IV.2), nous pouvons calculer la déformation volumique du retrait par :

$$\epsilon_v = \frac{e_0 - e}{1 + e_0} \quad \text{Eq. IV. 11}$$

D'où la courbe de couleur noire de la figure IV.12, qui est similaire aux résultats de la déformation volumique obtenus par la CIN-3D.

Nous pouvons donc conclure que l'utilisation de support lisse avec surface traitée réduit considérablement le frottement entre l'échantillon et le support permettant le retrait libre (non contrarié).

- Anisotropie de la déformation à l'échelle du grand échantillon

Dans ce qui suit, les essais sont menés avec le support lisse.

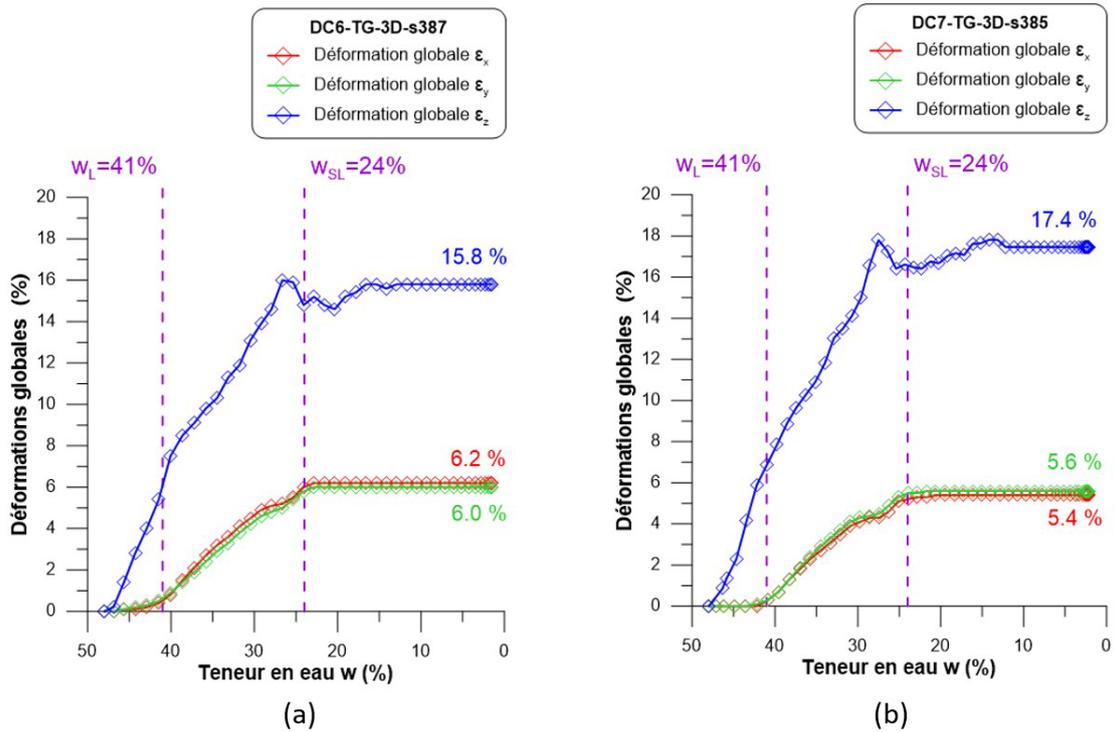


Figure IV.13 : Variations des déformations globales en fonction de la teneur en eau,
 (a) Résultats de l'essai *DC6-TG-3D-s387*,
 (b) Résultats de l'essai *DC7-TG-3D-s385*.

Les figure IV.13 (a) et (b) présentent respectivement les résultats de l'essai *DC6-TG-3D-s387* et les résultats de l'essai *DC7-TG-3D-s385*. On représente ici les déformations globales dans trois directions (X , Y et Z représentées sur l'illustration de la Fig. IV.8). On constate globalement que les déformations horizontales sont faibles devant la déformation verticale. Par ailleurs pour des valeurs importantes de la teneur en eau (avant la limite de liquidité) les déformations horizontales sont très faibles alors que la déformation verticale est très élevée (comme discuté précédemment dans section 2.2).

Un paramètre d'anisotropie η est utilisé pour décrire la relation entre les déformations horizontales et la déformation verticale. Son expression est la suivante :

$$\eta = \frac{\epsilon_z}{\epsilon_h} \quad \text{Eq. IV. 12}$$

Les grands échantillons ayant une symétrie axiale, la déformation dans les deux directions horizontales (direction X et direction Y) est similaire comme on peut le voir dans les résultats de la figure IV.13. Dans ce cas, on prend la valeur moyenne de la déformation ϵ_x et la déformation ϵ_y pour calculer le paramètre η . L'équation de calcul est la suivante :

$$\eta = \frac{\epsilon_z}{(\epsilon_x + \epsilon_y)/2} \quad \text{Eq. IV. 13}$$

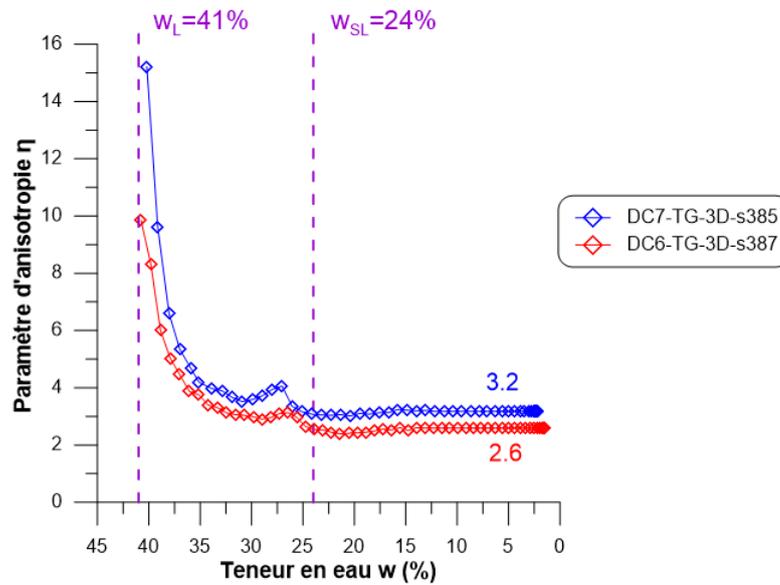


Figure IV.14 : Variations du paramètre d'anisotropie en fonction de teneur en eau des essais *DC6-TG-3D-s387* et *DC7-TG-3D-s385*.

La figure IV.14 montre les variations du paramètre d'anisotropie en fonction de la teneur en eau pour les deux essais. Avant la limite de liquidité le paramètre d'anisotropie a une valeur importante ($\eta > 10$), lorsque la déformation horizontale se développe la valeur du paramètre d'anisotropie commence à diminuer. Après la limite de retrait, le paramètre d'anisotropie se stabilise. Ainsi, pour l'essai *DC6-TG-3D-s387*, $\eta = 2,6$. Pour l'essai *DC7-TG-3D-s385*, $\eta = 3,2$.

Il est à noter que le phénomène uplift de l'échantillon peut influencer sur le calcul du paramètre d'anisotropie, ce qui semble avoir été le cas pour l'essai *DC7-TG-3D-s385*, Par conséquent le coefficient d'anisotropie est pris égal à 2,6.

- Détermination des déformations de retrait ε_x^r , ε_y^r et ε_z^r

Les déformations de retrait ε_x^r , ε_y^r et ε_z^r seront calculées à partir de la courbe de retrait du matériau et des paramètres d'anisotropie liés à la géométrie de l'échantillon.

Dans une partie précédente de l'étude, nous avons constaté que le paramètre d'anisotropie du retrait de l'échantillon est variable en fonction de la teneur en eau. Il faut donc obtenir la courbe de la variation du paramètre d'anisotropie de l'échantillon en fonction de la teneur en eau. Ici, nous avons utilisé la méthode d'ajustement de la courbe pour obtenir cette relation.

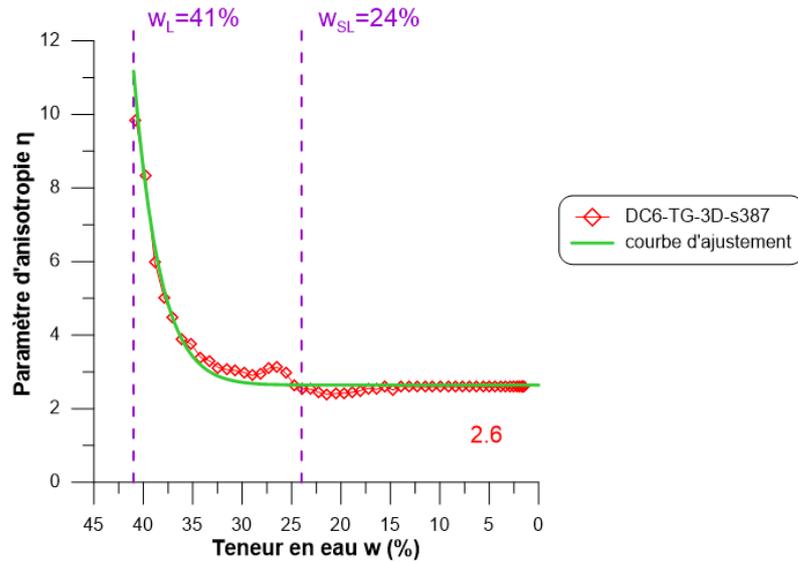


Figure IV.15 : Paramètre d’anisotropie – Comparaison de la courbe d’ajustement avec les résultats expérimentaux.

La courbe verte de la figure IV.15 montre la courbe d’ajustement obtenue, qui correspond aux résultats expérimentaux, en éliminant l’effet sur les paramètres d’anisotropie dû au uplift de l’échantillon (le pic entre 30 % et 25 % de la teneur en eau)

L’équation d’ajustement et les paramètres utilisés pour approcher la courbe sont indiqués par l’équation Eq.IV.14 et le tableau IV.6.

$$\eta = d + \frac{a - d}{\left[1 + \left(\frac{w}{c}\right)^b\right]^m} \quad \text{Eq. IV. 14}$$

Tableau IV. 6 : Paramètres de la courbe d’ajustement obtenus.

Paramètres de l’équation $\eta = f(w)$		
a	Paramètre d’ajustement	2,64237
b	Paramètre d’ajustement	15,1807
c	Paramètre d’ajustement	85,7966
d	Paramètre d’ajustement	17499,3
m	Paramètre d’ajustement	36,0065
R²	Coefficient de détermination d’ajustement	0,9745

L'équation obtenue s'applique pendant le séchage des échantillons entre la limite de liquidité ($w_L = 41\%$) et la fin de séchage ($w = 0\%$).

Vu que l'échantillon a une géométrie symétrique, la déformation de retrait libre de l'échantillon a des composantes égales dans les directions de l'axe X et de l'axe Y . La déformation de retrait horizontale notée ε_h^r représente la composante de déformation horizontale.

$$\varepsilon_h^r = \varepsilon_x^r = \varepsilon_y^r \quad \text{Eq. IV. 15}$$

La déformation de retrait horizontale ε_h^r et la déformation de retrait verticale ε_z^r sont liées par la relation suivante :

$$\varepsilon_h^r = \frac{1}{(2 + \eta)} \varepsilon_z^r \quad \text{Eq. IV. 16}$$

$$\varepsilon_z^r = \eta \varepsilon_h^r \quad \text{Eq. IV. 17}$$

La figure IV.16 représente les déformations de retrait ε_h^r et ε_z^r en fonction de la teneur en eau au cours du séchage. Dans l'intervalle entre la teneur en eau initiale et la limite de liquidité, le retrait en cours de séchage est dominé par la déformation verticale et on utilise deux relations linéaires pour représenter les variations de déformation dans cet intervalle de teneur en eau plus élevée. Ceci est représenté par deux lignes en pointillés dans la figure IV.16.

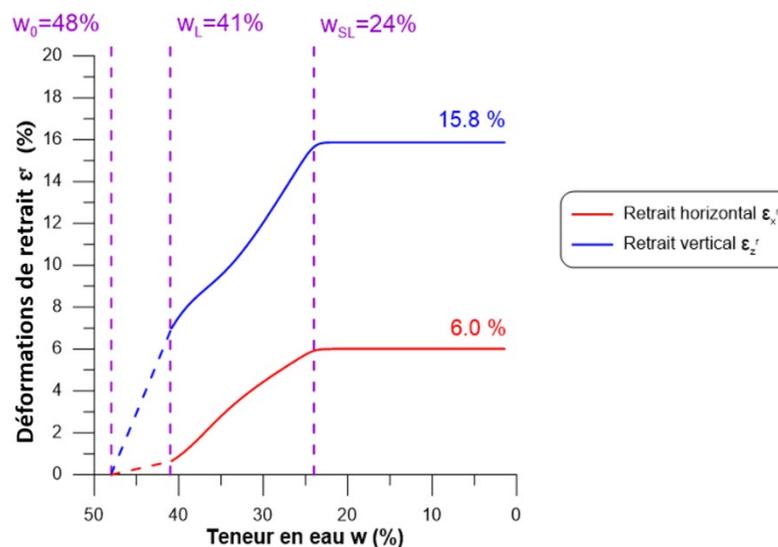


Figure IV.16 : Variations des déformations de retrait calculés par le coefficient d'anisotropie η , en fonction de la teneur en eau.

2.3 Déformations locales - Analyse

Les champs des déplacements et des déformations obtenus par les techniques de traitement d'image 2D et 3D permettent d'analyser le phénomène de déformation de l'échantillon pendant la dessiccation à l'échelle locale. L'échelle locale peut s'agir d'un seul point de mesure sur l'échantillon, ou d'une moyenne sur un ensemble de points, dans une petite zone d'échantillon ou sur d'une ligne sélectionnée.

- Champ des déplacements locaux 3D : U , V et W

La première étape de calcul dans la mesure de la déformation locale par la CIN consiste à obtenir les déplacements locaux de tous les points de mesure dans la surface de l'échantillon. La CIN-2D et la CIN-3D peuvent être utilisées pour obtenir le champ de déplacement local en 2D (U et V), puis afficher les résultats sous forme de cartographie.

Les champs de déplacement locaux (U et V) à $w = 30\%$, à w_{SL} et à $w = 0,62\%$ (fin de séchage), pendant la dessiccation contrôlée de l'essai *DC3-TF-2D-s381*, sont présentés dans la figure IV.17. U est le déplacement local suivant l'axe X et V est le déplacement local suivant l'axe Y . Sur la légende de la cartographie la couleur rouge représente la valeur maximale du déplacement local (convention positif), et la couleur violette la valeur maximale du déplacement local (convention négatif). Les signes positifs et négatifs du déplacement local représentent sa direction.

L'étude à partir des cartographies de champ de déplacement montre que les déplacements plus grands sont situés au niveau des bords de l'échantillon (zones rouges et violettes au bord). Les déplacements locaux U suivant l'axe X présentent une certaine symétrie, il en est de même pour les déplacements locaux V suivant l'axe Y .

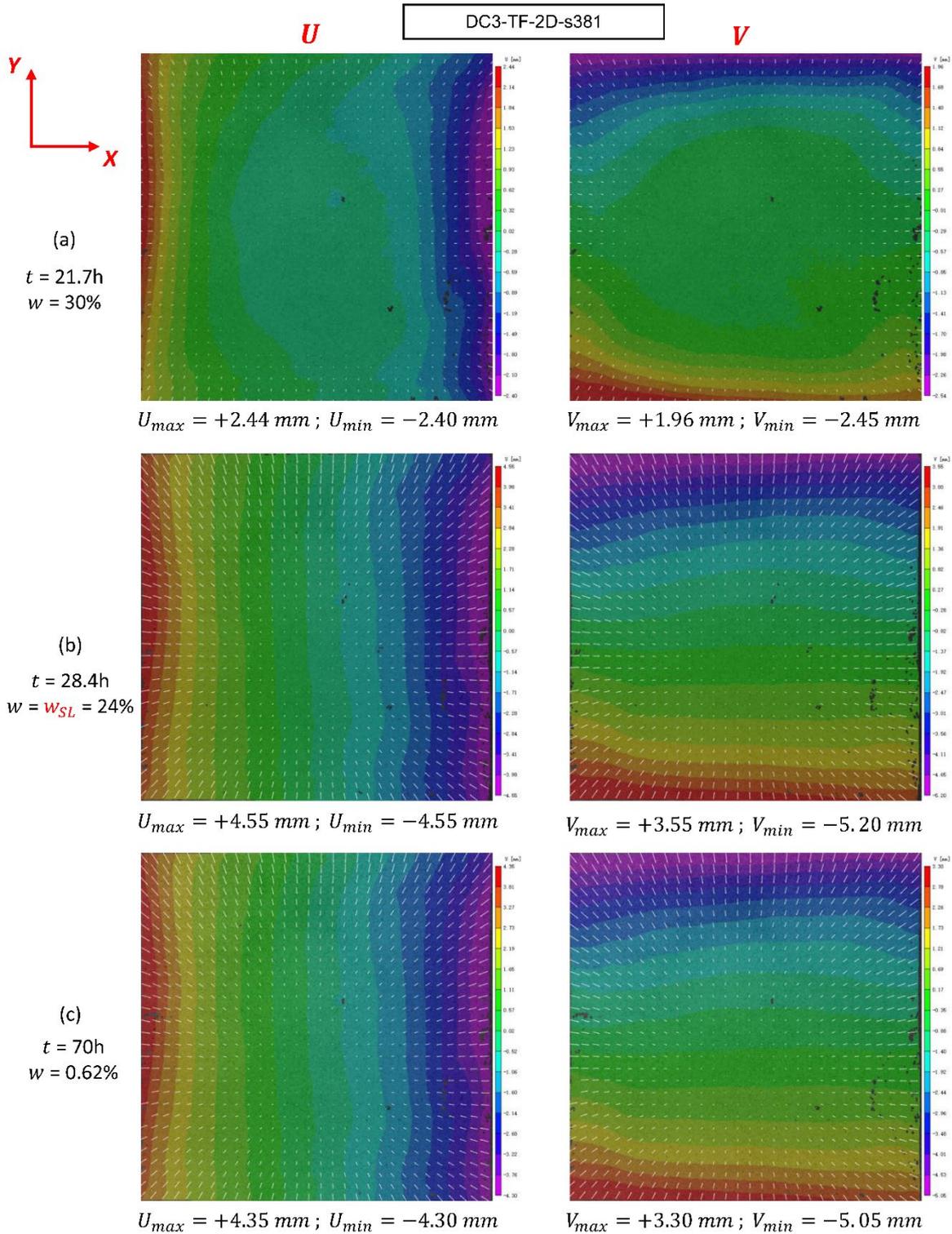


Figure IV.17 : Champ des déplacements U et V au cours du séchage.

Ces vecteurs (flèches blanches) sur la cartographie indiquent la direction et la magnitude relative des déplacements locaux. Ces vecteurs sont orientés vers le centre de l'échantillon avec une intensité plus importante au niveau des bords. Ces vecteurs convergent vers un point qui n'est pas strictement le centre géométrique de l'échantillon, comme le montrent les figure IV.17 (b) et (c).

Une comparaison des champs à la limite de retrait en figure IV.17 (b), avec ceux de la fin du séchage en figure IV.17 (c) montre que la distribution des déplacements locaux, mais aussi les valeurs de déplacement maximales, restent stables après la limite de retrait.

Le champ de déplacement vertical W est obtenu par la CIN-3D, qui représente le déplacement de tous les points de la surface supérieure de l'échantillon, dans la direction verticale (suivant l'axe Z) comme on le montre dans la figure IV.11.

- Déformations de retrait à l'échelle locale - Analyse

Les déformations locales de retrait sont obtenues par un essai de dessiccation contrôlée utilisant un support lisse avec surface traitée (TG), par exemple l'essai DC6-TG-3D-s387.

Les déformations locales suivant les axes X et Y (ε_{xx}^r et ε_{yy}^r) sont mesurées directement par la CIN-3D. Les déformations locales suivant l'axe Z , ε_{zz}^r sont calculées à partir des déplacements locaux W dans la direction verticale. La méthode de calcul a été présentée dans le chapitre II section 3.2.

Afin d'étudier la variation de la déformation locale au cours du séchage, quelques zones d'étude P_i ($i = 1$ à 10), de forme carrée et de surface moins de 1 cm², ont été sélectionnées aléatoirement sur la surface de l'échantillon. La figure IV.18 indique les positions de ces zones étudiées. Dans cette étude la valeur moyenne de la déformation de chaque zone représente la déformation locale.

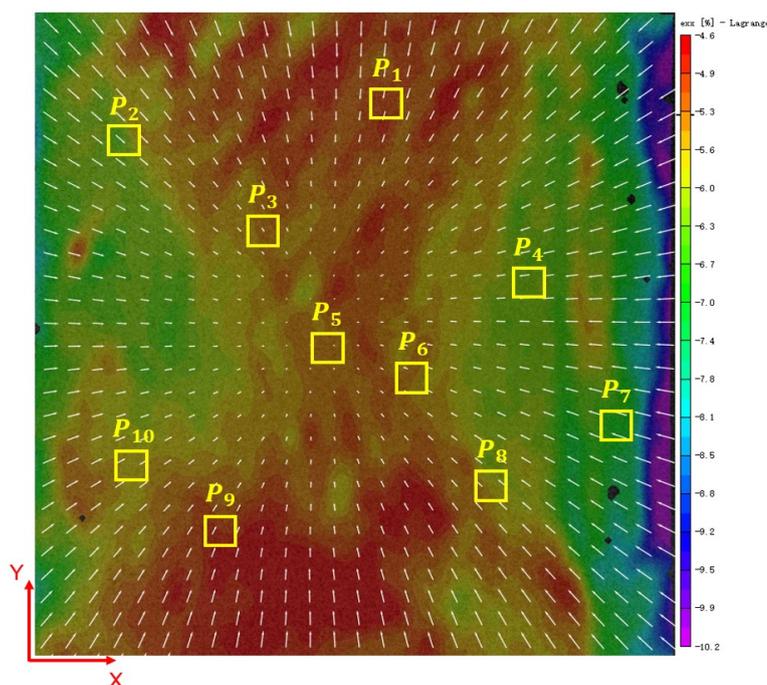


Figure IV.18 : Disposition des différentes zones d'analyse, P_i , du champ de déformation horizontale ε_{xx} de l'essai DC6-TG-3D-s387 ($t = 28,8$ h, $w = w_{SL} = 24$ %).

La figure IV.19 présente les évolutions de la déformation locale ε_{xx} dans chaque zone P_i au cours de séchage, en fonction de la teneur en eau globale d'échantillon.

Nous pouvons constater que les déformations locales ε_{xx} dans toutes les zones ont une tendance similaire de croissance, cette évolution est analogue à l'évolution de la déformation horizontale globale ε_x ou ε_y . Ainsi la déformation locale au cours du séchage se développe très lentement avant w_L , puis rapidement entre w_L et w_{SL} pour se stabiliser après w_{SL} .

La zone P_7 affiche une déformation locale ε_{xx} qui croît avant w_L . La valeur de la déformation à la limite de liquidité atteint 1,5 %. Cette variation importante dès le début du séchage est liée à la position de la zone P_7 plutôt proche du bord droit de l'échantillon. Au début du séchage, les déformations se développent aux alentours du bord de l'échantillon avant d'atteindre le centre de l'échantillon. Une différence de 1,5 % de ε_{xx} maximum est relevée entre P_7 et la zone proche du centre de l'échantillon (par exemple P_5).

D'autre part, les déformations locales ε_{xx} dans toutes les zones présentent une différence de moins 1 % par rapport à la déformation globale de retrait horizontal de l'échantillon ($\varepsilon_h^r = 6\%$).

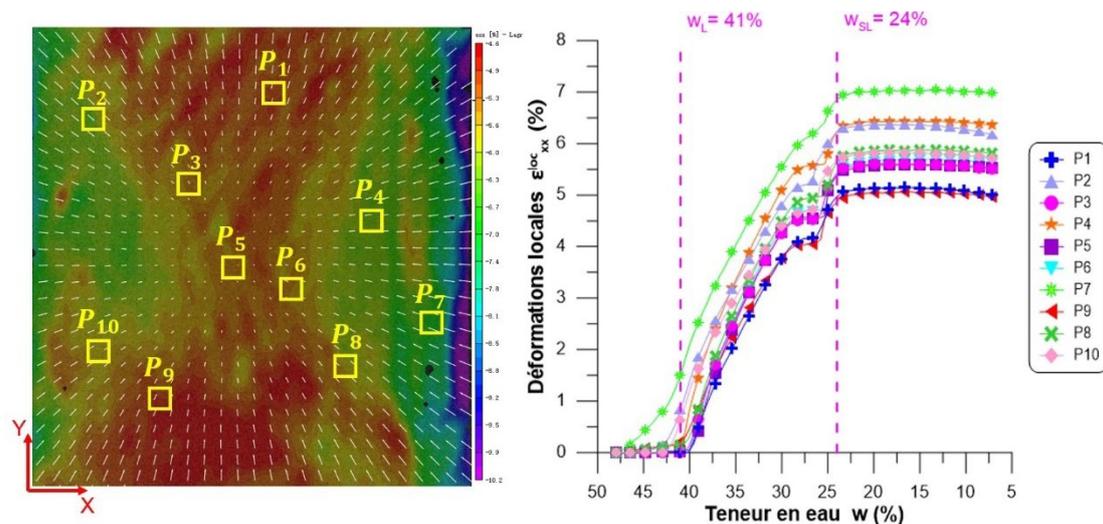


Figure IV.19 : Variations de la déformation horizontale locale obtenues dans chaque zone P_i – cas de l'essai DC6-TG-3D-s387. Cartographie de ε_{xx} et des zones P_i .

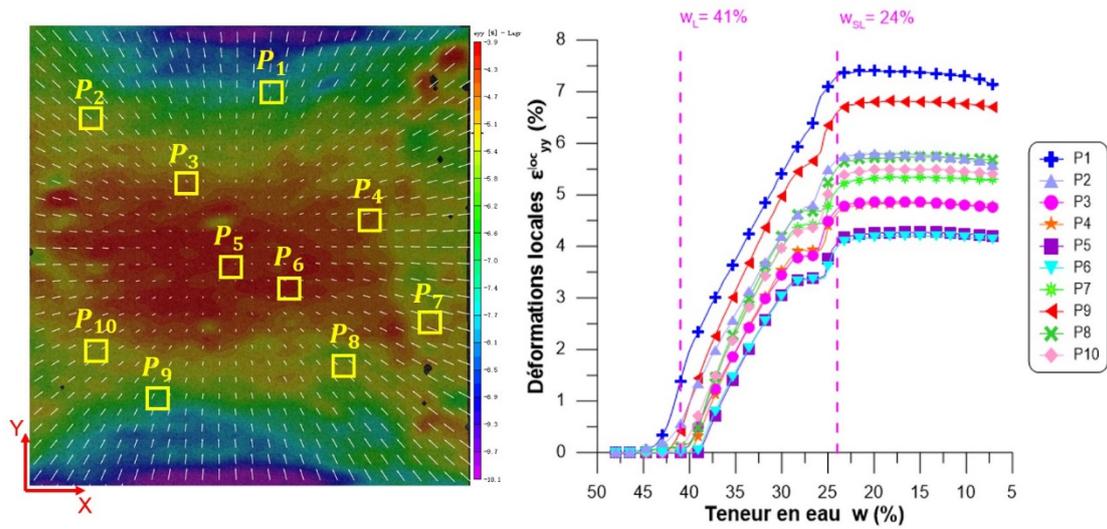


Figure IV.20 : Variations de la déformation horizontale locale obtenues pour chaque zone P_i – cas de l'essai *DC6-TG-3D-s387*. Cartographie de ε_{yy} et des zones P_i .

La figure IV.20 présente les évolutions de la déformation locale ε_{yy} en chaque zone P_i au cours du séchage en fonction de la teneur en eau. Des résultats globalement similaires à la déformation locale ε_{xx} sont obtenus.

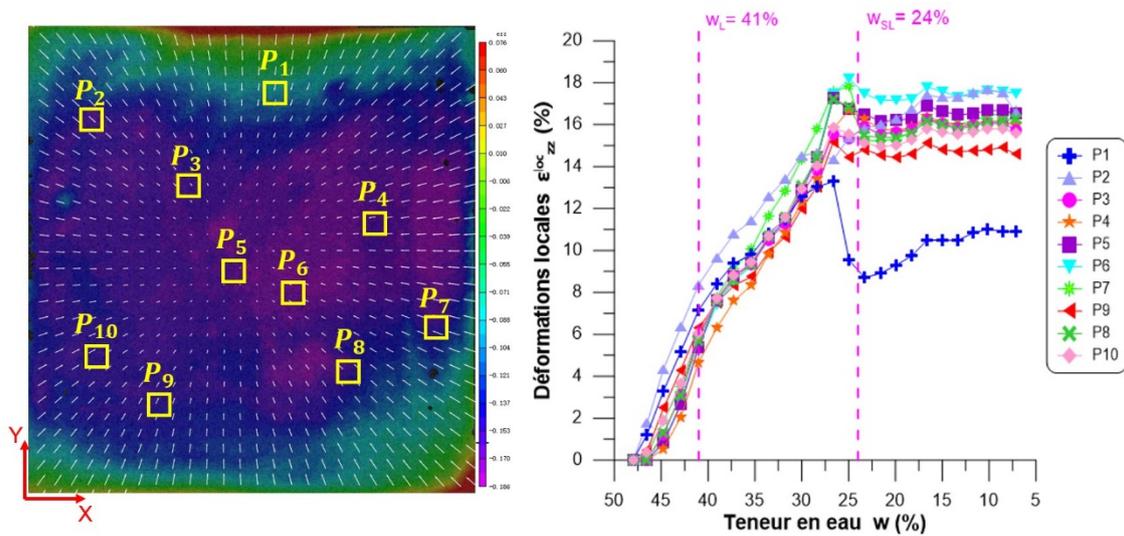


Figure IV.21 : Variations de la déformation horizontale locale obtenues pour chaque zone P_i – cas de l'essai *DC6-TG-3D-s387*. Cartographie de ε_{zz} .

Dans la figure IV.21, la déformation locale ε_{zz} dans chaque zone P_i est représentée en fonction de la teneur en eau globale. On remarque que les déformations locales au bord de l'échantillon sont plus significativement affectées par le phénomène de uplift, ce qui a été assez bien détecté par la CIN-3D (cas de la zone P_1). Hormis la zone P_1 , la différence entre la déformation locale verticale et la déformation de retrait verticale ($\varepsilon_z^r = 15,8\%$) est inférieure à 1,2 %.

Afin d'éviter l'effet du uplift sur les résultats de la mesure, et sur le calcul de la déformation volumique locale, nous avons éliminé du traitement les trois zones P_1 , P_2 et P_7 qui sont rattachées au risque du uplift car situées près des bords de l'échantillon.

La déformation volumique locale est présentée dans la figure IV.22 en fonction de la teneur en eau. Sur cette même figure, nous avons tracé la courbe de déformation volumique du retrait.

La déformation volumique locale de l'échantillon est calculée à partir de l'équation suivante :

$$\varepsilon_v^{loc} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \quad \text{Eq. IV. 18}$$

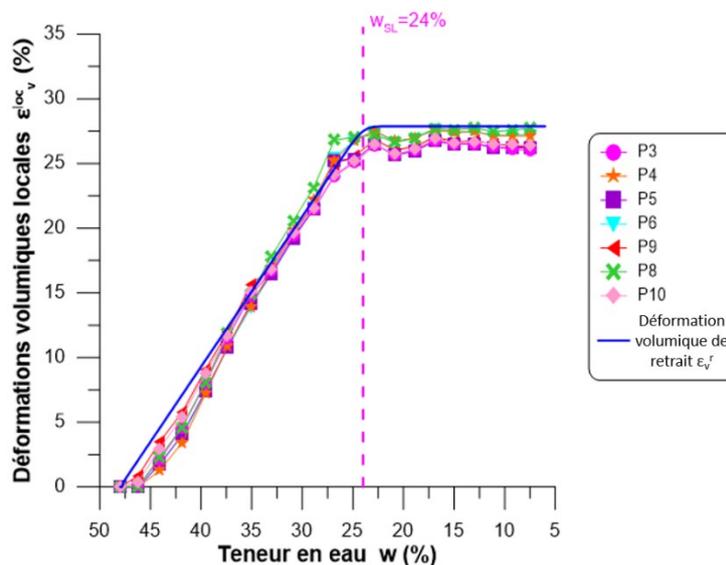


Figure IV. 22 Variation de la déformation volumique locale en fonction de la teneur en eau - cas de l'essai DC6-TG-3D-s387.

Nous pouvons constater que l'évolution de la déformation volumique locale est similaire dans toutes les zones étudiées. Les déformations volumiques locales sont également similaires à la déformation volumique globale de retrait. Une fois la limite de retrait atteinte, la différence entre ε_v^{loc} et ε_v^r ne dépasse pas 1,5 %.

En somme, l'utilisation d'un support lisse permet de réduire le frottement entre l'échantillon et le support. Les déformations locales dues au séchage donc alors sont très proches d'une zone à une autre. Après avoir écarté l'effet des bords sur les résultats expérimentaux, nous constatons que la déformation de retrait locale est la même que la déformation de retrait de l'échantillon. La courbe de rétention d'eau et la courbe de retrait peuvent par conséquent être appliquées à l'échelle locale pour approcher le retrait libre. Le paramètre anisotrope lié à la géométrie de l'échantillon sera utilisé pour caractériser les déformations locales.

2.4 Teneur en eau et succion locale dans la matrice

Le séchage signifie aussi une augmentation de la succion. L'étude de la teneur en eau locale et de la succion locale nous permet aussi de comprendre comment les fissures s'amorcent ce qui est l'objet du chapitre V.

La mesure et/ou l'estimation continue de la teneur en eau et de la succion au niveau local au cours d'un essai de dessiccation représente un challenge dans le domaine de la recherche expérimentale. Nous allons tenter d'approcher les deux paramètres au niveau local à partir des déformations de retrait locales estimées par la CIN-3D comme expliqué précédemment.

- Estimation de la teneur en eau locale w^{loc}

Rappelons que les données expérimentales permettent d'obtenir la déformation volumique locale de l'échantillon ε_v^{loc} . D'autre part, la courbe de retrait, qui représente la relation entre la teneur en eau et l'indice des vides de l'argile étudiée ($e = f(w)$), a été formalisée. La teneur en eau locale peut ainsi être estimée à partir de la déformation volumique locale.

Nous avons :

$$\varepsilon_v = \frac{e_0 - e}{1 + e_0} \quad \text{Eq. IV. 19}$$

On suppose qu'au début de l'essai l'échantillon reste homogène, et l'indice des vides local e_0 est le même que l'indice des vides global.

Ainsi :

$$e^{loc} = e_0 - (1 + e_0)\varepsilon_v^{loc} \quad \text{Eq. IV. 20}$$

Et

$$w^{loc} = \left(\frac{e^{loc}}{G_s} \right) \cdot S_r \quad \text{Eq. IV. 21}$$

Le retrait libre sous dessiccation contrôlée, l'étude au niveau locale consiste à investiguer la distribution de la teneur en eau locale et à l'approcher par une loi en vue d'une modélisation.

Une ligne droite AA' suivant l'axe X et passant par le centre a été sélectionnée (Fig. IV.23 a), ce qui a donné la distribution de la teneur en eau sur cette ligne.

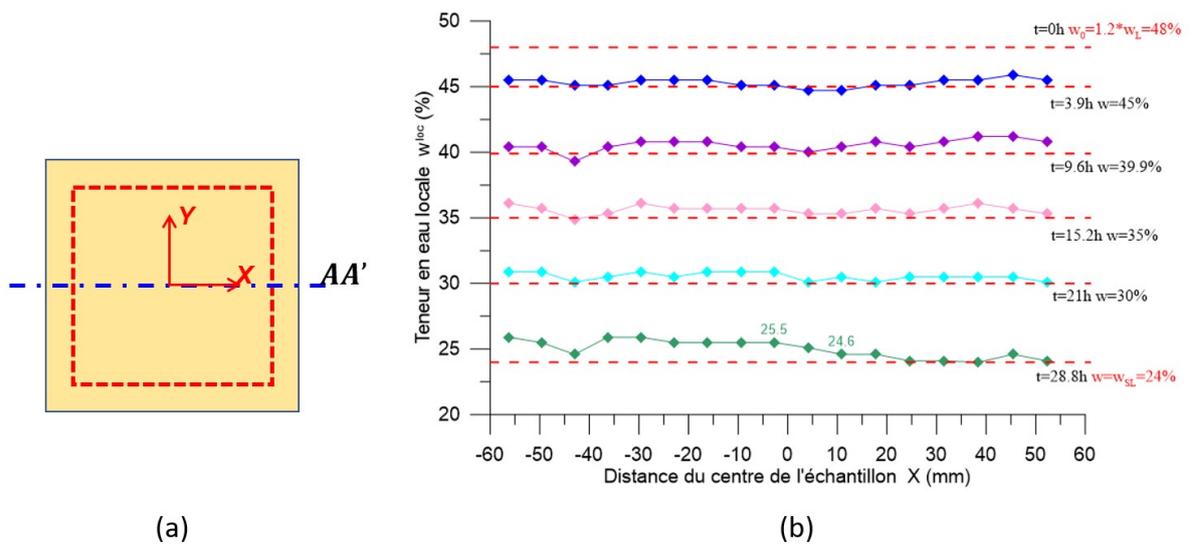


Figure IV.23 : Distributions de la teneur en eau selon l'axe X
- cas de l'essai *DC6-TG-3D-s387*.

Les courbes de la figure IV.23 indiquent la teneur en eau locale en des points pris sur la ligne *AA'*, à des temps de séchage différents (et donc à différentes teneurs en eau de l'échantillon pris globalement).

Les lignes horizontales en pointillé indiquent la teneur en eau globale de l'échantillon, elles sont utilisées comme référence aux variations de la teneur en eau locale.

Le scénario de séchage est décrit ci-dessous :

- Au début du séchage ($t = 3,9$ h et $w = 45$ %), la teneur en eau locale est similaire à la teneur en eau globale, avec toutefois une différence inférieure à 1 %. La distribution de la teneur en eau est quasi-uniforme.
- Une distribution non uniforme de la teneur en eau se développe progressivement (voir à $t = 9,6$ h et à $t = 15,2$ h).
- À la limite de retrait ($t = 28,8$ h et $w = w_{SL} = 24$ %), la teneur en eau locale sur le côté gauche de la ligne *AA'* est supérieure à celle du côté droit. Lorsqu'on est revenu à l'image de surface supérieure de l'échantillon, la ligne droite *AA'* passe bien par le centre de l'échantillon, mais aussi par certaines zones sur le côté gauche qui présentent des problèmes dans la mesure que nous avons évoqués ci-dessus. Cela fait que les déformations verticales locales calculées du côté gauche de la ligne sont plus petites qu'en réalité, et affectent les résultats du calcul de la teneur en eau locale. En considérant uniquement la distribution de la teneur en eau sur le côté droit de la ligne, nous pouvons observer une distribution décroissante du centre vers le bord de l'échantillon.

La figure IV.24 présente les cartographies de distribution de la teneur en eau avant la limite de retrait correspondant au retrait libre. Pour mieux illustrer la variation de la teneur en eau et sa distribution au cours du séchage, les valeurs ont été normalisées par des couleurs. La couleur rouge indique les fortes teneurs en eau enregistrées à l'état quasi-saturé ($w = 48\%$), la couleur violette indique la valeur de la teneur en eau à la limite de retrait ($w_{SL} = 24\%$).

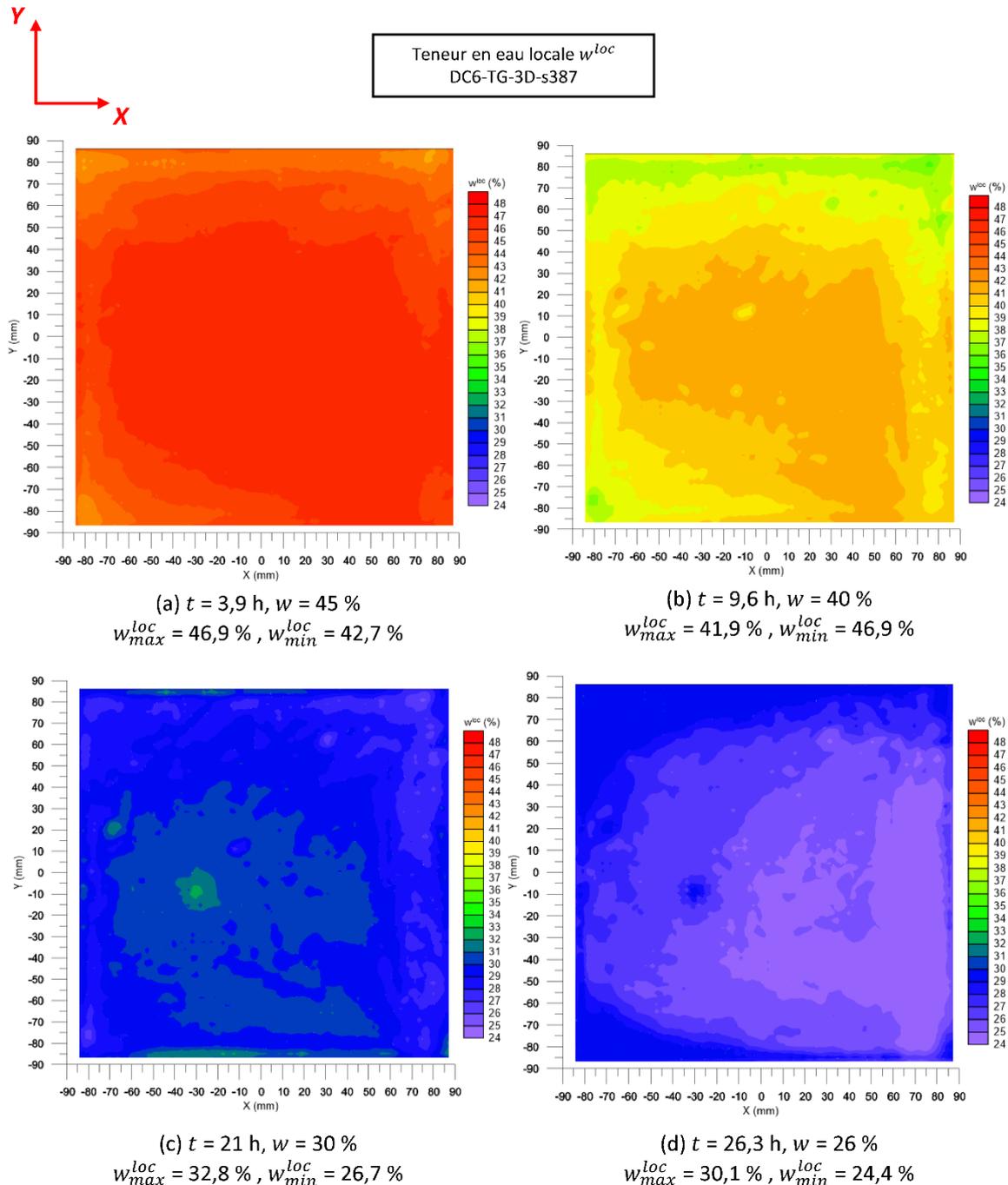


Figure IV. 24 : Cartographies de distribution de la teneur en eau locale

La distribution de la teneur en eau peut être décrite comme suit en fonction du séchage :

- Le début du séchage ($t = 3,9$ h et $w = 45$ %) est présenté par la figure IV.24 (a) qui montre déjà que la teneur en eau au niveau du bord de l'échantillon est moins importante que la teneur en eau au centre de l'échantillon. Le séchage est plus rapide au niveau des bords qu'au centre de l'échantillon. Cela va provoquer une distribution croissante de la teneur en eau du bord vers le centre.
- Au cours du séchage, la figure IV.24 (b) montre que la valeur minimale de la teneur en eau se situe également au bord de l'échantillon.
- Sur la figure IV.24 (c) on voit apparaître une zone circulaire sur le côté gauche de l'échantillon, montrant une évolution de la teneur en eau différente de celle dans zones voisines. La teneur en eau locale plus importante observée dans cette zone montre une hétérogénéité locale qui commence à se développer et qui représentera un risque d'initiation d'une fissure à cet endroit.
- La figure IV.24 (d) présente la distribution de la teneur en eau avant la limite de retrait. Au centre de l'échantillon la teneur en eau est inférieure à la teneur en eau sur les bords, mais ceci est le résultat du uplift évoqué précédemment, difficile à maîtriser et qui perturbe l'estimation de la teneur en eau.
- D'une manière générale, les gradients de la teneur en eau sont plus forts dans des zones situées sur ou près des bords. La distribution de la teneur en eau dans la grande partie centrale de l'échantillon est homogène avant la limite de liquidité.

- Estimation de la succion locale s^{loc}

La succion locale peut être estimée à partir de la relation entre la teneur en eau et la succion. Nous proposons ici d'utiliser cette relation de [Van Genuchten \(1980\)](#) Eq.IV.22 qui s'exprime en termes de teneur en eau volumétrique θ , donnant une loi obtenue par ajustement sur les résultats expérimentaux de l'argile utilisée. La teneur en eau volumétrique θ et la teneur en eau massique w du sol peuvent être converties à l'aide de l'équation Eq.IV.23.

$$s^{loc} = \alpha \cdot \left[\left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta^{loc} - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^{\frac{1}{n}} \quad \text{Eq. IV. 22}$$

Avec :

$$\theta^{loc} = w^{loc} \cdot \frac{G_s}{1 + e^{loc}} \quad \text{Eq. IV. 23}$$

Les résultats du calcul sont présentés dans la figure IV.25 donnant les cartographies de

distribution de la succion avant la limite de retrait. Comme pour la distribution de la teneur en eau, la valeur maximale de la succion est représentée en rouge (2000 kPa), et la valeur minimale en violet (1000 kPa). Noter que la différence de succion dans les mêmes nuances de couleurs est seulement de 50 kPa.

- Au début du séchage (Fig. IV.25 a), la succion est quasi uniforme sur la majeure partie de la surface de l'échantillon. La succion locale maximale, de 1250 kPa, a été enregistrée dans les coins de l'échantillon, comme on pouvait s'y attendre, et la succion minimale, de 1150 kPa, au milieu de l'échantillon.
- Proche de la limite de liquidité (Fig. IV.25 b), la succion augmente en maintenant une distribution plutôt uniforme. La différence entre la succion maximale et minimale augmente, elle est de 200 kPa.
- Lorsque la teneur en eau est de 30 % (Fig. IV.25 c), l'effet uplift apparait et perturbe la mesure, ce qui impacte le calcul de la succion locale. La succion moyenne au centre de l'échantillon, où l'effet uplift n'existe pas est d'environ 1650 kPa.
- Proche de la limite de retrait (Fig. IV.25 d), le calcul donne une succion au bord de l'échantillon inférieure à la succion au centre, ici aussi le résultat est rattaché aux problèmes de soulèvement que l'échantillon subit.

La succion locale maximale mesurée dans l'échantillon au début du séchage jusqu'à la limite de retrait est de 2 MPa, ce qui est loin de la succion globale que nous avons imposée en utilisant la solution saline KOH (387 MPa mesuré à la fin de séchage). En effet, l'humidité relative et la succion globale dans le dispositif n'ont pas encore atteint l'équilibre avant la limite de retrait de l'échantillon. L'échantillon ne peut pas acquérir la succion globale imposée par la solution saline avant que le transfert d'eau entre l'échantillon et la solution saline atteigne l'équilibre. Néanmoins cela ne présente pas de problème pour notre démarche car le but en utilisant l'essai de dessiccation contrôlée n'est pas d'imposer une succion suffisamment importante à l'échantillon. L'objectif de l'essai est de fournir un chemin donné de dessiccation pour les échantillons à tester. Ainsi, tous les essais de séchage pour une humidité relative donnée vont avoir une même vitesse d'évolution de la teneur en eau. Il est également possible de supposer que la succion évoluant dans l'échantillon, localement, représente la succion matricielle.

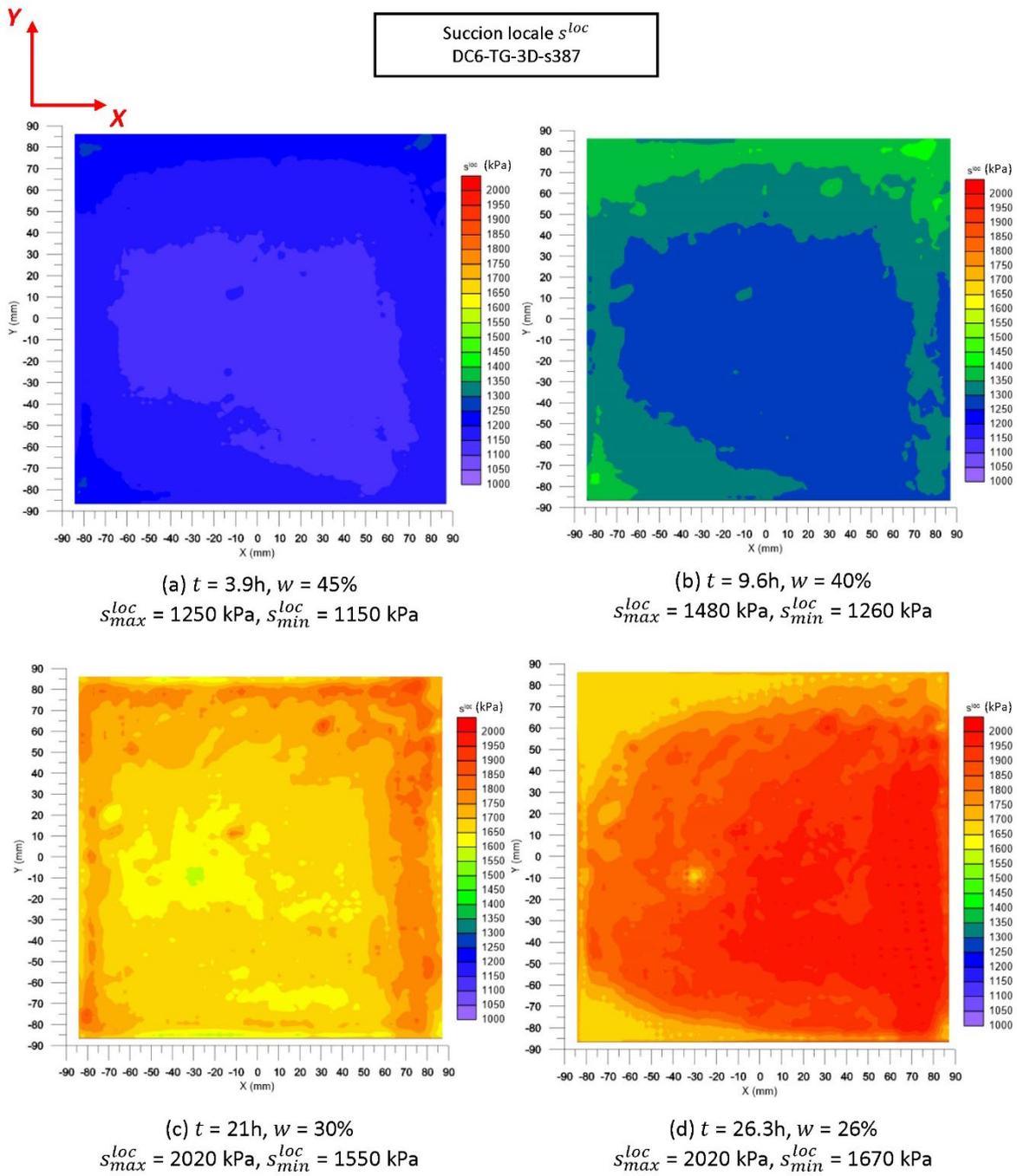


Figure IV.25 : Cartographies de distribution de la succion locale.

Conclusion

Dans ce chapitre, le phénomène de retrait des échantillons d'argile dû au séchage à l'échelle globale et à l'échelle locale a été étudié. Dans un premier temps, les courbes de retrait et de rétention d'eau ont été déterminées. Ensuite, le phénomène de retrait libre a été étudié par des essais de dessiccation contrôlée en utilisant le support d'échantillons lisse. A l'échelle locale, les distributions de la déformation locale, de la teneur en eau locale et de la succion au cours du séchage ont été investiguées. Les résultats de ce chapitre ont permis de tirer les conclusions suivantes.

- A l'échelle globale, les déformations du retrait libre de l'échantillon ont été déterminées. D'abord, la déformation verticale ε_z se développe au début du séchage et reste toujours supérieure à la déformation ε_h . Ensuite, les déformations horizontales (ε_x et ε_y) commencent à apparaître après la limite de liquidité. Le paramètre d'anisotropie η lié à la géométrie de l'échantillon a été identifié en fonction de la teneur en eau.

- Le uplift, affectant la mesure de la déformation verticale, a été détecté au niveau des bords de l'échantillon par CIN-3D. Ce phénomène s'accroît avec l'augmentation du retrait dans la direction horizontale. Cependant, ce phénomène a moins d'influence sur la zone centrale de l'échantillon.

- À l'échelle locale, la distribution des déformations a tendance à diminuer du bord vers le centre dans toutes les directions lorsque le support lisse est utilisé, mais l'amplitude de la variation est très faible.

- La teneur en eau locale calculée à partir de la déformation volumique locale présente une distribution croissante du bord vers le centre de l'échantillon. Au cours du séchage, l'échantillon présente des hétérogénéités locales de la teneur en eau, ce qui entraîne un risque de fissure hydrique. Quant à la succion, elle reste toujours supérieure au bord et la différence de succion entre le bord et le centre de l'échantillon augmente d'au moins 200 kPa.

Chapitre V

Initiation et propagation des fissures

Chapitre V Initiation et propagation des fissures

Sommaire :

Introduction

1. Fissuration de l'argile sous une sollicitation hydrique

- 1.1. Apparition des fissures et analyse quantitative
- 1.2. L'effet du support sur la formation des fissures (analyse en 2D)
- 1.3. Analyse à l'échelle locale à partir de cartographies issues de la CIN-3D
- 1.4. Exemple de propagation de fissure – analyse à partir de cartographies issues de la CIN-2D
- 1.5. Topographie d'une argile sur chemin de séchage et déformation de la surface (analyse en 3D)

2. Poutrelles d'argile non saturée sous flexion 3 points

- 2.1. Comportement mécanique des poutrelles d'argile sous succion en flexion
- 2.2. Analyse par la CIN de la déformation locale liée à la fissuration

Conclusion

Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'initiation et la propagation de la fissure sous sollicitation hydrique et mécanique. Il comprend également d'étude des facteurs influençant processus de fissuration au cours du séchage.

La première partie de ce chapitre est focalisée sur l'étude de la fissuration de l'argile sous dessiccation contrôlée. Nous avons d'abord étudié le développement des fissures de séchage dans différents échantillons, du point de vue morphologique et statistique. L'influence du chemin de séchage et du support de l'échantillon sur le comportement de la fissuration hydrique ont également été étudiés. La distribution des déformations locales, le phénomène de concentration des contraintes (à travers le développement des déformations locales), et la direction des déformations principales sont étudiées et analysées dans cette section.

La deuxième partie de ce chapitre est concentrée sur le comportement de poutrelles d'argiles sous succion en flexion indirecte. La résistance à la traction de ces poutrelles est approchée par la flexion 3 points.

1 Fissuration de l'argile sous une sollicitation hydrique

1.1 Apparition des fissures et analyse quantitative

Les essais dans lesquels nous avons observé la formation des fissures hydriques utilisent tous le support semi-rugueux (en Plexiglas). Trois essais (Tableau V.1) sous dessiccation contrôlée seront présentés dans ce chapitre, ils permettent de suivre la fissuration. Notons qu'aucune fissuration n'a été observée lorsque le grand échantillon d'argile est posé sur les supports lisses (téflon + graisse) ou de rugosité faible (téflon).

Les échantillons pour ces trois essais de séchage ont été soumis à une dessiccation contrôlée par la solution saline KOH, dans un environnement confiné (chambre de contrôle dans le dispositif expérimental). Cela nous permet d'étudier le comportement des fissures hydriques de l'argile soumise au même chemin de séchage.

Tableau V.1 : Caractéristiques des essais qui ont fait apparaître des fissures hydriques.

DC : Dessiccation Contrôlée			Humidité relative (%)	Succion (MPa)
Support d'échantillon	Type de CIN	Non de l'essai		
Plexiglas (Semi-rugueux)	CIN-2D	DC1-PG-2D-s359	7	359
		DC2-PG-2D-s361	6,9	361
	CIN-3D	DC5-PG-3D-s390	5,6	390

La variation de la teneur en eau des grands échantillons en fonction du temps au cours de la dessiccation contrôlée est représentée dans la figure V.1 (a). La vitesse de séchage de l'échantillon de l'essai *DC5-PG-3D-s390* est légèrement plus rapide, et la teneur en eau a atteint sa valeur minimale plus tôt que pour les autres grands échantillons.

En effet, la vitesse de séchage est liée à la succion imposée par la solution saline. La figure V.1 (b) présente la variation de la succion en fonction du temps pour les trois essais effectués. On peut observer que la succion imposée dans l'essai *DC5-PG-3D-s390* (courbe en couleur rouge) s'équilibre plus tôt, et la valeur maximale de la succion imposée est plus importante de 8,4 % en comparaison avec les deux autres essais. Les valeurs de l'humidité relative et de la succion obtenues à l'état d'équilibre pour chaque essai sont indiquées dans le Tableau V.1.

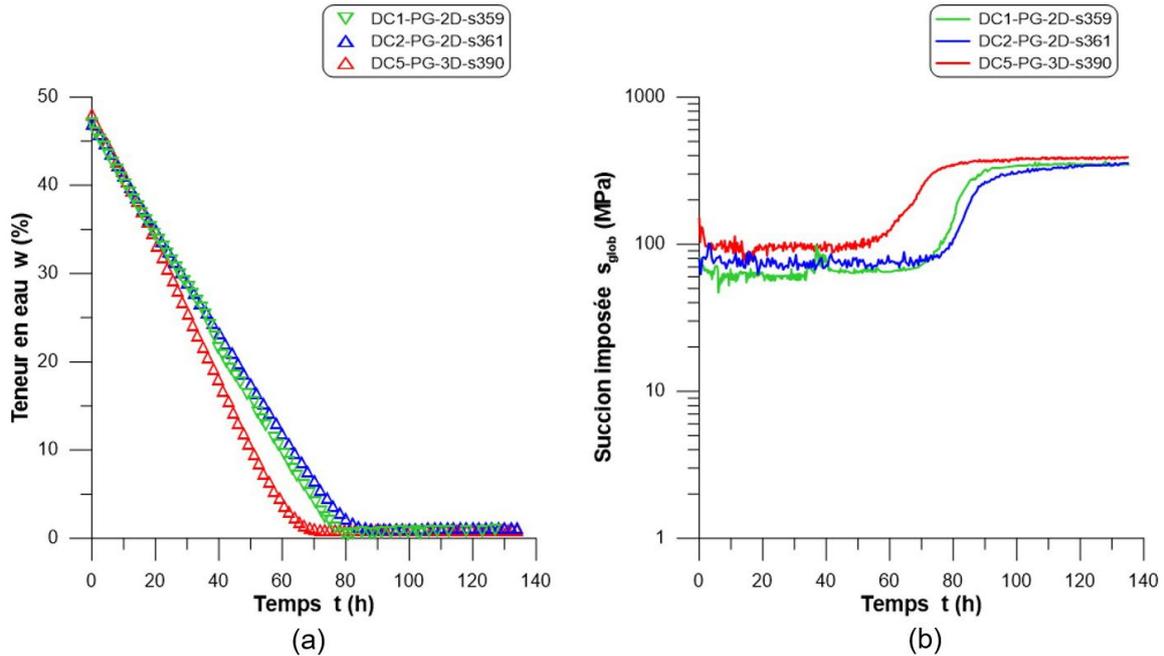


Figure V.1 : Chemin de séchage – (a) Évolution de la teneur en eau en fonction du temps, (b) Variations de la succion imposée en fonction du temps.

Des images de la surface supérieure de l'échantillon sont prises en temps réel au cours de la dessiccation, elles ont été filtrées et traitées à l'aide du logiciel *Image-J*. Les images binarisées obtenues permettent de représenter les fissures en blanc (0 binaire), et toutes les autres zones, hors fissures, sont en noir (1 binaire).

Les trois exemples d'images traitées par *Image-J* dans la figure V.2, montrent la morphologie des fissures pour une teneur en eau de l'argile inférieure à w_{SL} . Ces échantillons proviennent de différents essais de dessiccation contrôlée.

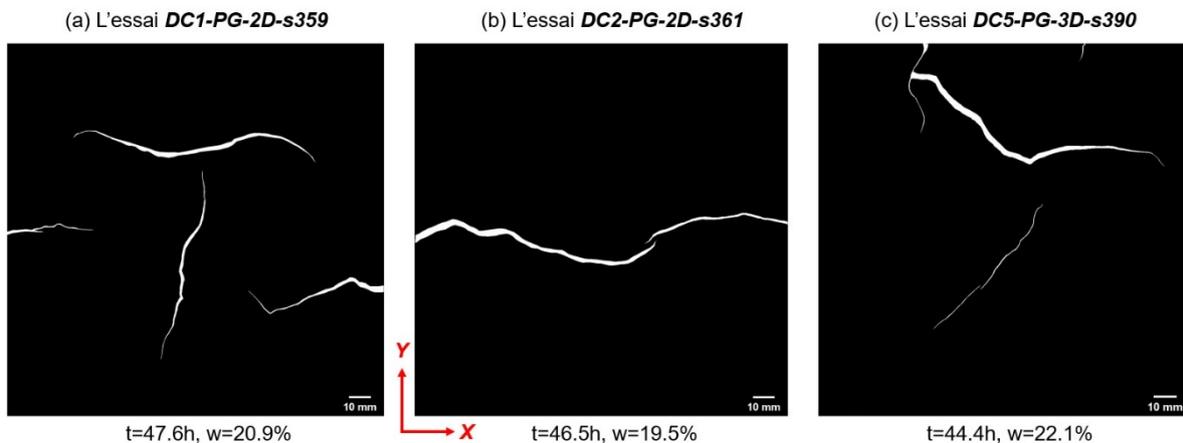


Figure V.2 : Dimension et morphologie des fissures produites dans les différents échantillons, (a) *DC1-PG-2D-s359*, (b) *DC2-PG-2D-s361*, (c) *DC5-PG-3D-d360*.

L'état fissuré de l'échantillon de l'essai *DC1-PG-2D-s359* est illustré par la figure V.2 (a). Nous avons observé un total de quatre fissures hydriques, soit deux fissures au bord de l'échantillon et deux fissures au centre de l'échantillon. Chaque fissure s'est développée individuellement sans contact.

La figure V.2 (b) représente deux fissures hydriques de l'essai *DC2-PG-2D-s361*. Celles-ci sont apparues à partir du bord de l'échantillon et ont rejoint le milieu de l'échantillon.

Sur la figure V.2 (c) présentant l'essai *DC5-PG-3D-s390*, nous pouvons observer quatre fissures. Deux sont situées vers le centre de l'échantillon et deux fissures sur le bord. La fissure située dans la partie supérieure de l'échantillon est plus grande en longueur et en largeur comparée aux trois autres. On peut voir que le côté gauche de cette fissure coalesce avec une fissure plus petite.

Nous avons analysé la morphologie de ces fissures en suivant le développement de leurs dimensions au cours du séchage. La longueur totale des fissures est notée L , la largeur moyenne est notée l et la surface totale des fissures est notée S . Ces paramètres ont été quantifiés en fonction de la teneur en eau au cours de la dessiccation contrôlée. Les résultats sont présentés dans la figure V.3.

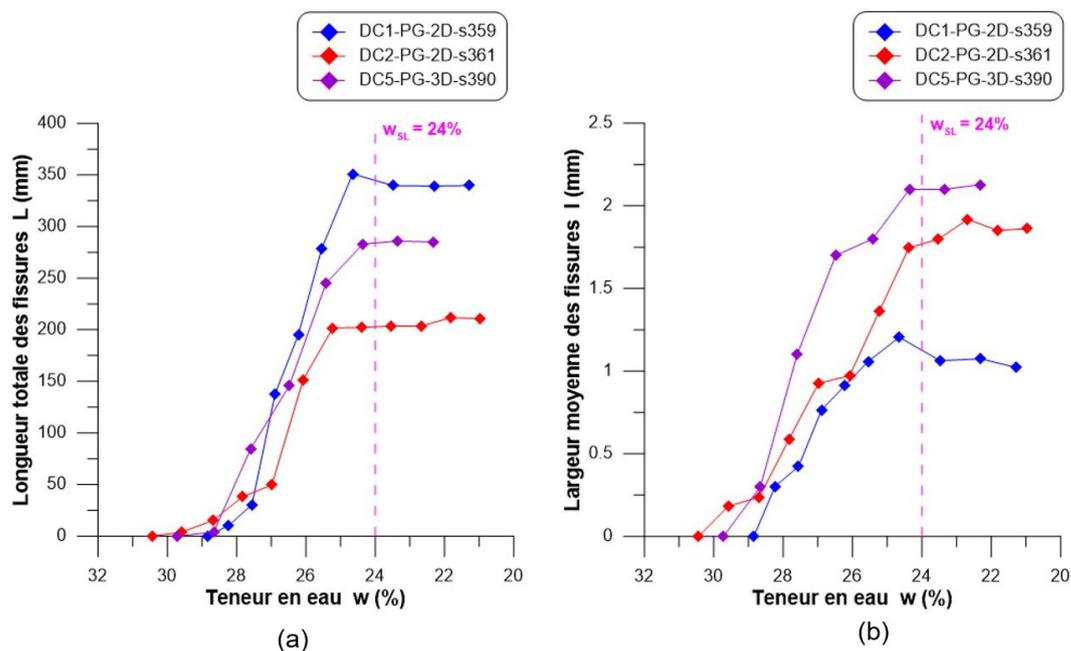


Figure V.3 : Développement de fissures hydriques dans différents échantillons en fonction de la teneur en eau, (a) Variation de la longueur totale des fissures, (b) Variation de la largeur moyenne des fissures.

Les résultats expérimentaux présentés dans la figure V.3 (a) montrent que le développement de la longueur des fissures commence à se manifester autour de la teneur en eau globale de 30 % (± 1 %) alors que le matériau est encore en état saturé. Lorsque la teneur en eau diminue, la longueur des fissures se développe rapidement, puis se stabilise et atteint une valeur maximale quand la teneur en eau atteint la limite de retrait

($w_{SL}=24\%$).

La largeur moyenne des fissures a été calculée et présentée dans la figure V.3 (b) en fonction de la teneur en eau. La tendance dans le développement de la largeur moyenne semble similaire au développement de la longueur. C'est-à-dire que la largeur des fissures commence à augmenter à environ 30 % de teneur en eau, puis elle se stabilise lorsque la teneur en eau atteint la limite de retrait.

L'indice de fissuration IF (en l'anglais : *Surface crack ratio*) exprimé par Eq.V.1, est introduit pour quantifier la densité de fissures au cours du séchage.

$$IF = \frac{S_{fissure}}{S_{totale}} \quad \text{Eq. V. 1}$$

$S_{fissure}$ est la surface totale des fissures ; S_{totale} est la surface de l'échantillon.

La figure V.4 représente la variation de l'indice de fissuration en fonction de la teneur en eau pour les trois échantillons au cours du séchage. Les résultats montrent que :

- $w_0 > w > 30\%$ ($\pm 1\%$) : au début de la dessiccation contrôlée, on ne constate aucune fissure à la surface de l'échantillon, et l'échantillon présente un retrait.
- $30\% > w > w_{SL}$: la tendance dans l'évolution des courbes est similaire dans les trois essais. L'indice de fissuration augmente rapidement, il maintient quasiment la même vitesse de progression jusqu'à la stabilisation à la limite de retrait.
- $w < w_{SL}$: les indices de fissuration se sont stabilisés, et ont atteint un palier.

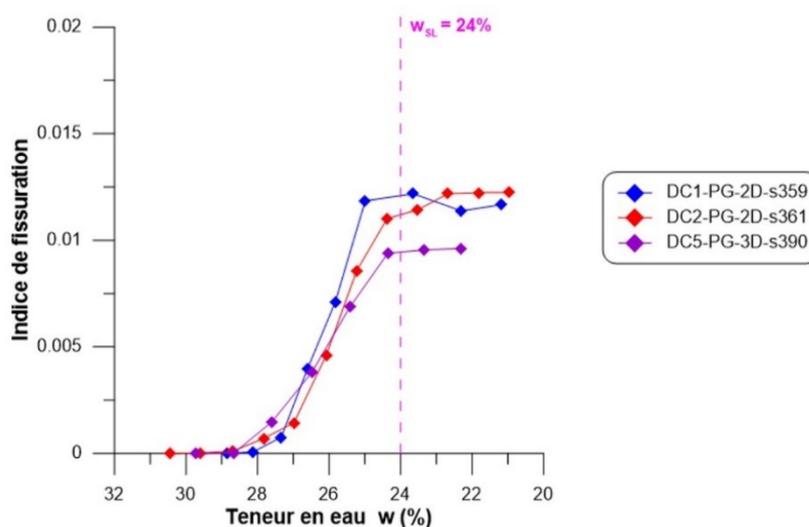


Figure V.4 : Variation de l'indice de fissuration en fonction de la teneur en eau.

On note que le développement des fissures dans les essais *DC1-PG-2D-s359* et *DC2-PG-2D-s361* mènent au même palier en termes d'évolution de l'indice de fissuration. Ceci est probablement dû aux chemins de séchage quasiment identiques dans les deux cas (Voir la courbe bleue et la courbe verte dans la Fig. V.1 a). Le chemin de séchage de l'essai *DC5-PG-3D-s390* est décalé légèrement par rapport aux deux autres (Voir la courbe rouge dans la Fig. V.1 a), induisant une vitesse de séchage plus élevée et une succion imposée plus forte.

La vitesse de séchage doit donc être maîtrisée car elle peut agir sur la formation des fissures.

1.2 L'effet du support sur la formation des fissures (analyse en 2D)

Dans cette section on s'intéresse à l'effet du support semi-rugueux sur l'amorçage des fissures. Cette condition aux limites est importante car elle peut limiter le retrait par l'interaction entre l'argile et le plan du support.

L'effet du support sur le retrait peut être approché par exemple en comparant la déformation globale de l'échantillon avec la déformation de retrait.

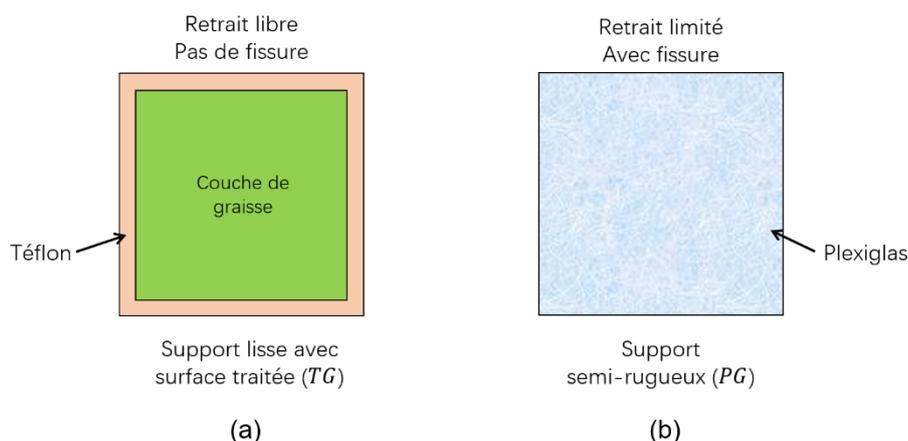


Figure V.5 : Schéma des deux supports utilisés (a) Support lisse (TG), (b) Support semi-rugueux (PG).

Nous avons choisi ici de comparer l'essai *DC5-PG-3D-s390* et l'essai *DC6-TG-3D-s387* qui sont sous le même chemin de séchage. Dans l'essai *DC5-PG-3D-s390*, où des fissures se sont développées pendant le processus de séchage, nous avons utilisé le support semi-rugueux *PG* en plexiglas. Dans l'essai *DC6-TG-3D-s387* où le retrait libre a pu se développer, nous avons utilisé un support lisse *TG* (en téflon avec la surface traitée par graisse).

Prenant compte des conditions de mise en place, les résultats en termes de déformations globales de l'échantillon en fonction de la teneur en eau sont représentés dans la figure V.5.

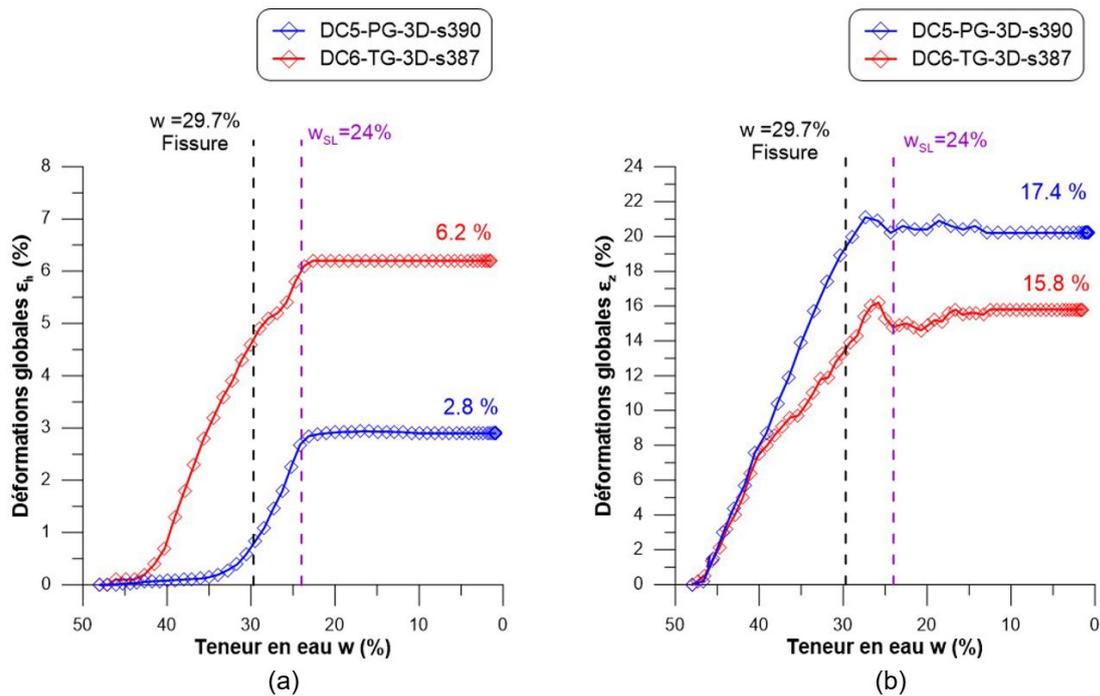


Figure V.6 : Effet du support sur la déformation globale en fonction de teneur en eau, (a) Variation de la déformation horizontale, (b) Variation de la déformation verticale.

La figure V.6 (a) montre la variation de la déformation horizontale ϵ_h ($\epsilon_h = \epsilon_x = \epsilon_y$) en fonction de la teneur en eau pour chaque type de support.

Au début du séchage, les déformations horizontales sur support semi-rugueux se développent très lentement en comparaison avec le support lisse. Elles deviennent significatives aux alentours de 30 % de teneur en eau. A ce stade, les bords ont commencé à glisser vers le centre mais la plus grande partie de l'échantillon est toujours limitée, et comme la CIN le montrera le déplacement mesuré est très faible. On notera que la première fissure s'est produite à une teneur en eau de 30 %. La déformation horizontale continue à augmenter et atteint 2,8 % après la limite de retrait qui est de 24 %.

Le développement de la déformation verticale en fonction de la teneur en eau est montré dans la figure V.6 (b). On voit que le type de support impacte également la déformation verticale. Les résultats montrent en effet que la déformation verticale sur le support semi-rugueux est plus importante que la déformation verticale du support lisse.

Avant la limite de retrait l'échantillon est considéré dans un état saturé. La déformation volumique de l'échantillon ϵ_v pendant le retrait est égale au volume d'eau perdu par séchage. Lorsque la composante horizontale de la déformation volumique de l'échantillon est limitée à cause de la rugosité du support, sa composante verticale doit en conséquence augmenter.

- Décomposition du tenseur de déformation

Considérons que le champ de déformation (pouvant être mesuré par la CIN) au cours du séchage peut se décomposer de deux parties, l'une liée à la déformation de retrait et l'autre liée à une déformation de type mécanique générée par l'empêchement du retrait et le développement d'une concentration de contraintes.

L'équation Eq.V.2 représente ces deux composantes de la déformation.

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^r + \varepsilon_{ij}^m \quad \text{Eq. V. 2}$$

- ε_{ij}^r est la déformation de retrait.
- ε_{ij}^m est déformation mécanique.

Rappelons ici que dans le cas de l'essai DC6-TG-3D-s387, l'utilisation de supports lisses a favorisé un retrait libre. ($\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^r$)

Dans la figure V.7, on montre comment la variation de la déformation mécanique horizontale évolue en fonction de la teneur en eau. Le signe positif indique une compression et le signe négatif indique une traction.

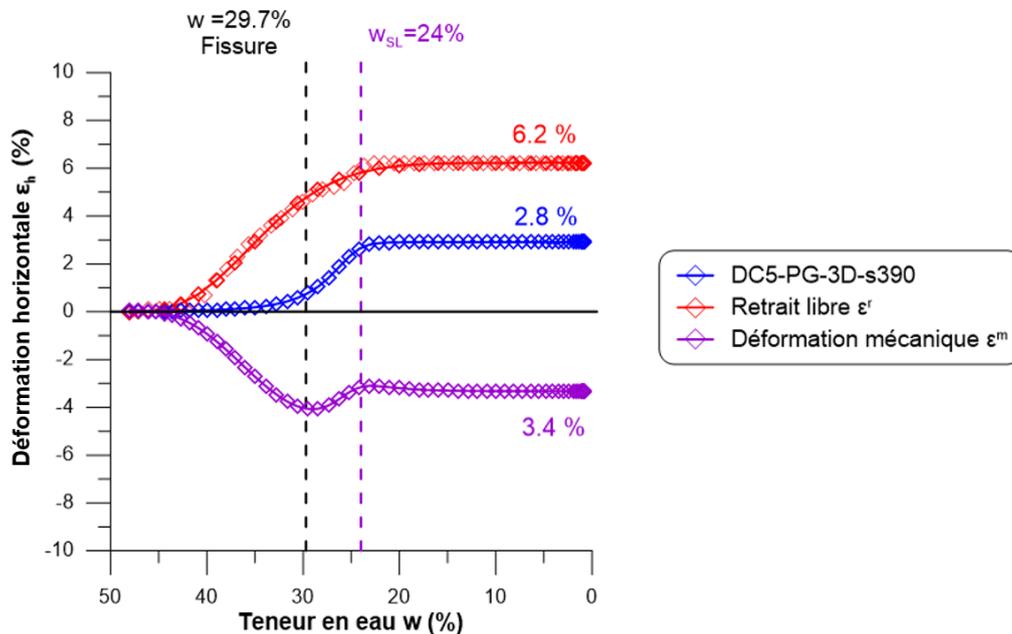


Figure V.7 : Variation de la déformation de retrait (libre), déformation avec le support semi-rugueux et la déformation mécanique calculée en fonction de la teneur en eau au cours du dessiccation de l'échantillon.

La courbe montre une augmentation continue de la déformation mécanique avec la diminution de la teneur en eau. La fissure s'est amorcée dans l'échantillon lorsque la déformation mécanique a atteint sa valeur maximale qui est de 4,1 % (en traction). Après

l'apparition de cette fissure la déformation mécanique est légèrement diminuée. La déformation mécanique atteint une valeur stable de - 3, 4 % lorsque la teneur en eau atteint la limite de retrait.

Cette étude a permis de montrer que l'augmentation de la déformation mécanique dans l'échantillon peut être causée par l'interaction entre le support et l'argile. Elle est l'une des causes de la formation des fissures hydriques au cours de la dessiccation.

1.3 Analyse à l'échelle locale à partir de cartographies issues de la CIN-3D

Les grands échantillons d'argile étudiés sont en forme de dalle avec une faible épaisseur de 5 mm, celle-ci est très petite par rapport à la longueur et à la largeur. Par conséquent on peut considérer que les fissures se produisent sur le plan, et sont caractérisées par la CIN sur la surface des échantillons.

Les analyses de l'initiation des fissures se font en local en suivant la distribution de la déformation locale suivant X , Y et XY . Une attention particulière est portée à la concentration des contraintes qui amorcent les fissures hydriques, notons que la déformation de retrait est déjà déterminée dans le chapitre IV.

1.3.1 La déformation locale suivant l'axe X

La figure V.8 présente la cartographie de la déformation locale ε_{xx} suivant l'axe X de l'essai $DC5-PG-3D-s390$. Le support semi-rugueux (PG) a été utilisé, ce qui a provoqué des fissures hydriques qu'on peut observer à la surface.

- À la limite de liquidité ($w = w_L$) :

La déformation horizontale de retrait libre similaire à celle obtenue avec le support lisse commence à se développer lorsque la teneur en eau est inférieure à la limite de liquidité. La limitation de la déformation horizontale provoquée par le support commence à apparaître à partir de w_L .

La figure V.8 (a) montre des valeurs de ε_{xx} allant de + 1,5 % en rouge (extension) à - 5 % en violet (compression). Les déplacements étant limités par le support, les déformations de traction sont détectées mais les valeurs restent faibles (inférieures à + 1,5 %), ces zones d'extension sont indiquées dans les régions délimitées par des pointillés jaunes.

- À la teneur en eau de 35 % ($w = 35\%$)

Pour des teneurs en eau inférieures à 35 % la figure V.7 a montré que la déformation horizontale augmentait rapidement. La déformation locale ε_{xx} est présentée dans la

figure V.8 (b) à 35 % de teneur en eau. On peut alors observer que les bords du côté gauche et droit de l'échantillon sont en compression avec une déformation d'environ - 5 %. Lorsque cette compression due au retrait se développe et se propage vers le centre, certaines zones d'extension diminuent (II-DC5 et III-DC5), et d'autres disparaissent (V-DC5 et VI-DC5).

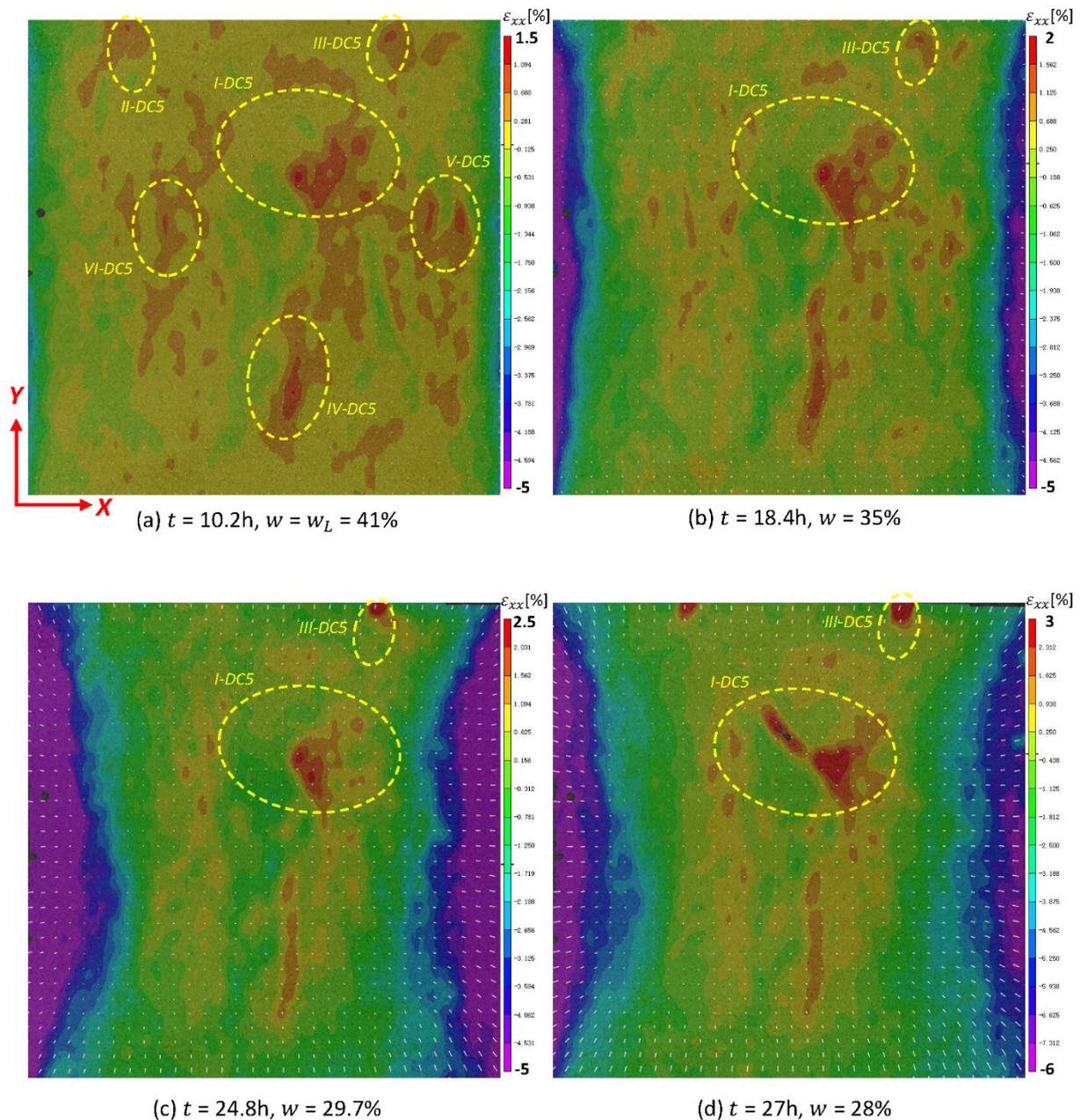


Figure V.8 : Cartographies de la déformation locale ε_{xx} de l'essai DC5-PG-3D-s390.

- A l'initiation de la fissure ($w = 29.7\%$)

À une teneur en eau de 29,7 % les premières fissures commencent à apparaître sur la surface de l'échantillon, elles sont aussi détectées par le logiciel *Image-J* (voir la Fig. V.7 c).

La cartographie de la figure V.8 (c) présente les déformations locales ε_{xx} . Nous avons observé une fissure perpendiculaire à l'axe X dans la zone d'extension ($III-DC5$). Une déformation maximale de 2,5 % est mesurée autour de la fissure. Des deux côtés de cette zone d'extension, on observe une compression maximale de - 0,5 %.

La zone également en extension ($I-DC5$) provoque de fissure mais qui n'est pas perpendiculaire à l'axe X .

- L'apparition d'autres fissures ($w = 28 \%$)

Le retrait continue à se développer en raison de la diminution de la teneur en eau. La déformation dite mécanique continue elle à limiter le retrait dans le sens horizontal. Les fissures qui ont été créées se développent en longueur et en largeur. La déformation en traction atteint maintenant - 3 % dans la zone $II-DC5$. Une fissure s'initie ensuite dans cette zone.

Nous avons remarqué des fissures se propageant dans des directions autres que perpendiculairement à l'axe X (Fig. V.8 d). Nous allons tenter par la suite de comprendre l'initiation de ces fissures dans la cartographie des déformations locales suivant l'axe Y (ε_{yy}), et celle des déformations de cisaillement (ε_{xy}).

1.3.2 La déformation locale suivant l'axe Y

Nous avons choisi d'analyser les déformations locales ε_{yy} aux mêmes teneurs en eau (même temps de séchage) que les déformations locales ε_{xx} . La figure V.9 présente les cartographies du champ des déformations ε_{yy} de l'essai $DC5-PG-3D-s390$.

- A la limite de liquidité ($w = w_L$) :

Des zones d'extension apparaissent vers le centre de l'échantillon et près des bords en haut et en bas de l'échantillon (voir la Fig. V.9 a). Les déformations maximales dans ces zones sont inférieures de + 1,5 %. On constate également des zones d'extension en ($I-DC5$) avec une déformation locale ε_{yy} maximale de + 1,5 %.

- À la teneur en eau de 35% ($w = 35 \%$)

La cartographie de la figure V.9 (b) montre que des déformations de compression se développent au niveau des bords, en haut et en bas d'échantillon, ce qui va augmenter l'interaction entre l'argile et le support. Au centre de l'échantillon la déformation de traction augmente, alors que la zone de déformation près des bords diminue fortement. La valeur maximale, de + 2 % d'extension, se trouve toujours dans la zone $I-DC5$ près du centre de l'échantillon.

- A l'initiation de la fissure ($w = 29,7 \%$)

Dans la zone *I-DC5*, ε_{yy} augmente à 2,5 %. Une fissure se produit mais sa propagation n'est pas non plus perpendiculaire à l'axe *Y*. (Fig. V.9 c).

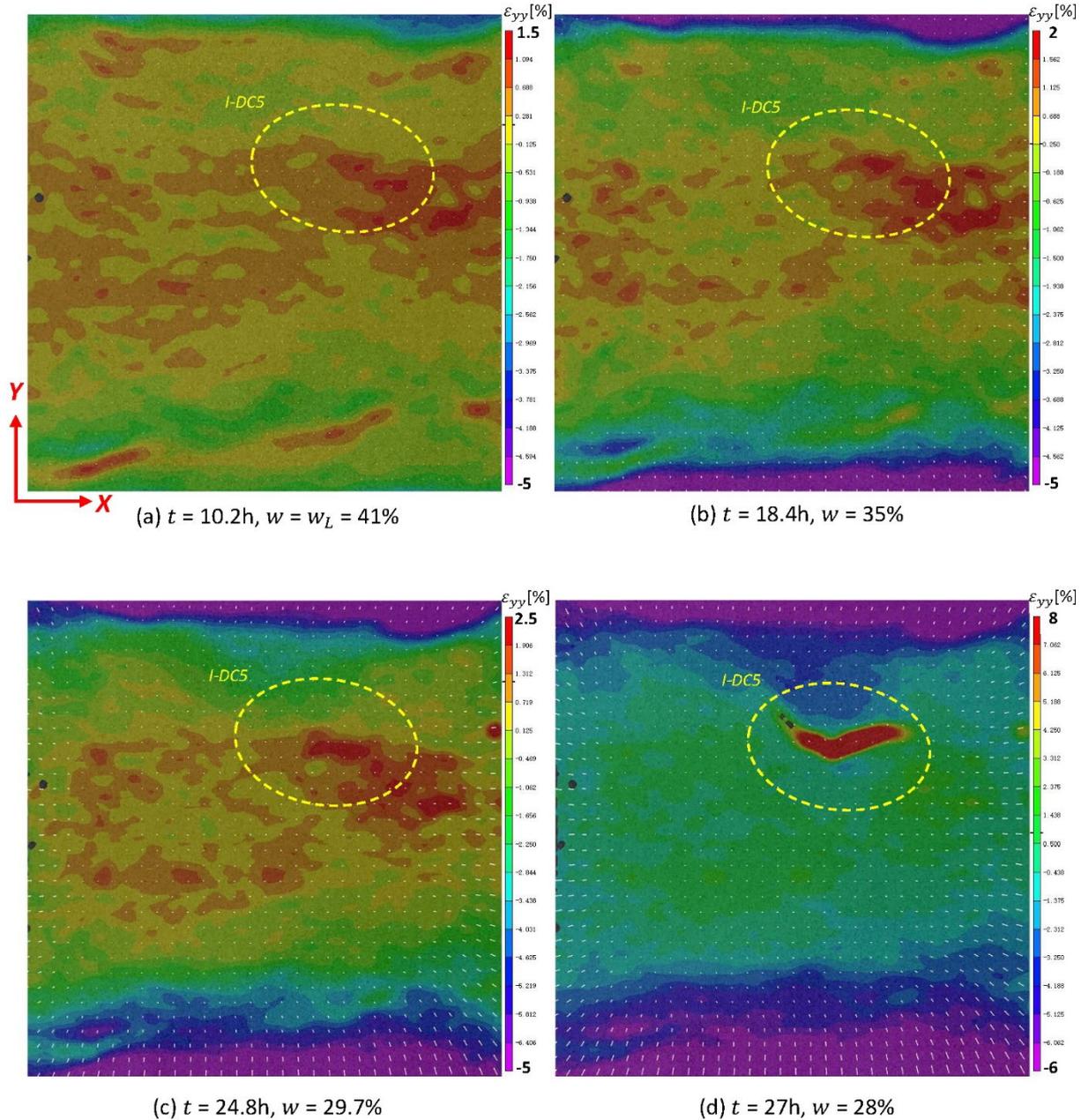


Figure V.9 : Cartographies de la déformation locale ε_{yy} de l'essai *DC5-PG-3D-s390*.

- Avant la limite de retrait ($w = 28 \%$)

À cet instant aucune nouvelle fissure ne s'est produite dans les zones d'extension. La fissure déjà existante se développe ; les déformations locales vont jusqu'à + 8 % dans la zone où les fissures se sont ouvertes.

1.3.3 La déformation locale de cisaillement (X,Y)

L'étude des déformations de cisaillement locales ε_{xy} permet d'affiner les causes de l'initiation de la fissure. La figure V.10 présente les cartographies des déformations locales de cisaillement pour les quatre mêmes teneurs en eau que celles présentées précédemment.

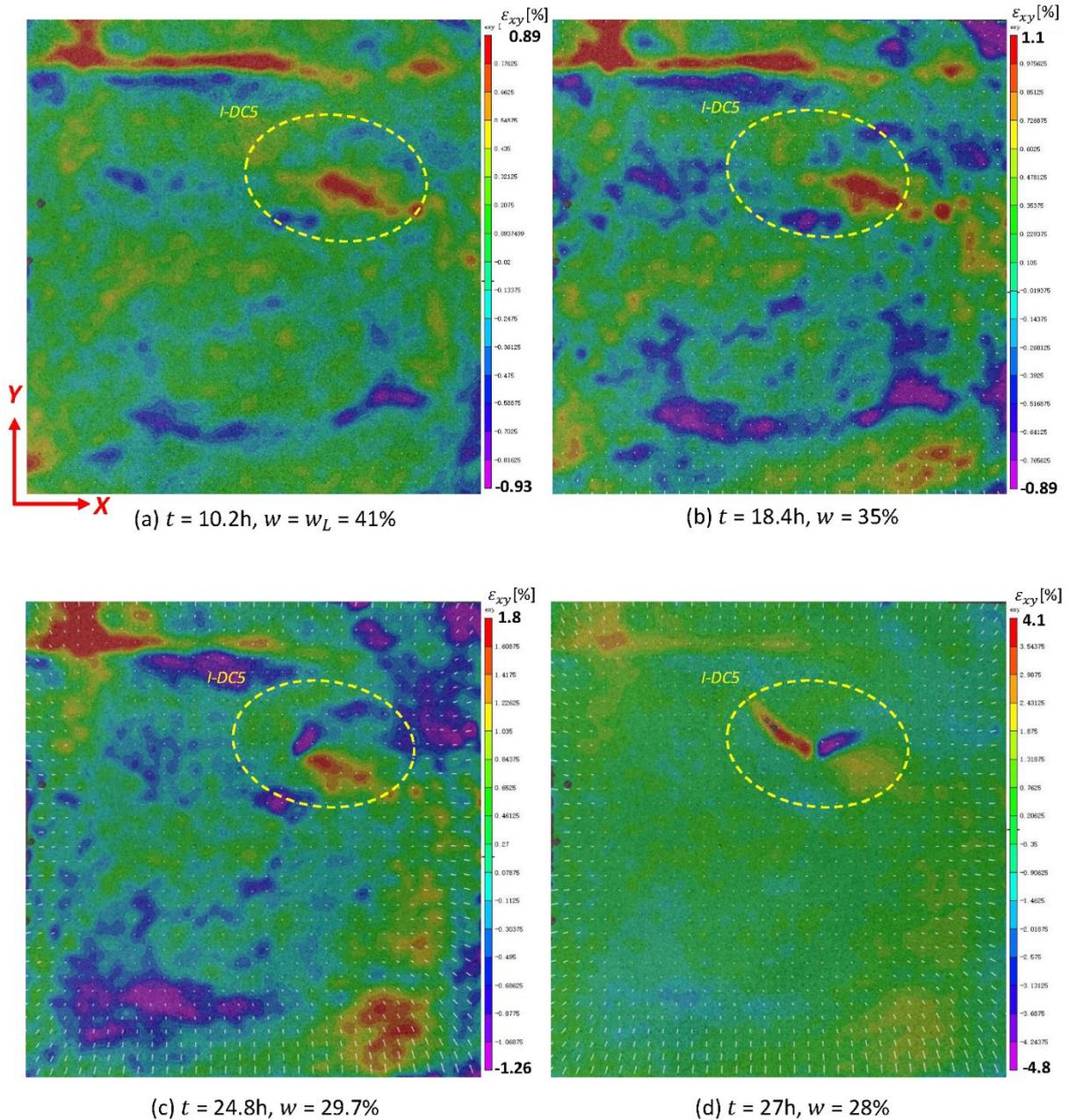


Figure V.10 : Cartographies de la déformation de cisaillement ε_{xy} de l'essai $DC5-PG-3D-s390$.

- A la limite de liquidité ($w = w_L$) :

Comme vu précédemment, à cet instant, c'est le retrait qui se développe et l'interaction

entre le support et l'argile limite ce retrait. Une zone de déformation de cisaillement se produit au centre de l'échantillon dans la zone *I-DC5*. La déformation de cisaillement maximale est de + 0,89 %. (Fig. V.10 a). Notons que dans cette même zone, il existe également des déformations importantes en extension en termes de ε_{xx} et ε_{yy} .

- À la teneur en eau de 35 % ($w = 35\%$) :

Dans la figure V.10 (b) on peut observer une augmentation de la déformation de cisaillement dans la zone *I-DC5* avec des valeurs positives supérieures à + 1 %. On observe également le développement de déformations de cisaillement avec des valeurs négatives, mais plus faibles, dans cette même zone qui sont d'environ - 0,4 %.

- À l'initiation de la fissure ($w = 29,7\%$) :

La figure V.10 (c) montre le moment où la fissure s'initie. La fissure s'amorce dans la zone où la déformation de cisaillement est importante, elle atteint - 1,25 %.

- Avant la limite de retrait ($w = 28\%$) :

La fissure se développe en longueur et en largeur. Sa direction semble du côté gauche suivre la zone de distorsion positive avec une valeur maximale de + 3,5 %, et du côté droit elle suit la zone de distorsion négative avec une valeur maximale de - 4,7% (Fig. V.10 d).

1.3.4 Exemple de propagation de fissure - analyse à partir de cartographies issues de la CIN-2D

L'étude précédente a montré que l'initiation des fissures se produit dans une zone de déformation locale importante. Nous avons montré également que différents types de déformation peuvent se concentrer dans une même zone provoquant un mécanisme de fissuration complexe. Dans cette étude, nous proposons de nous concentrer sur la caractérisation du mode de fissuration, en investiguant la manière dont la déformation locale évolue (en extension, en distorsion ou en mode mixte). L'étude sera enrichie par une analyse des directions des déformations principales locales. ε_1 est la déformation principale majeure et ε_2 est la déformation principale mineure. La méthode de calcul des directions principales, à l'aide du programme *Matlab* et à partir des résultats de la CIN, est décrite en Chapitre II.

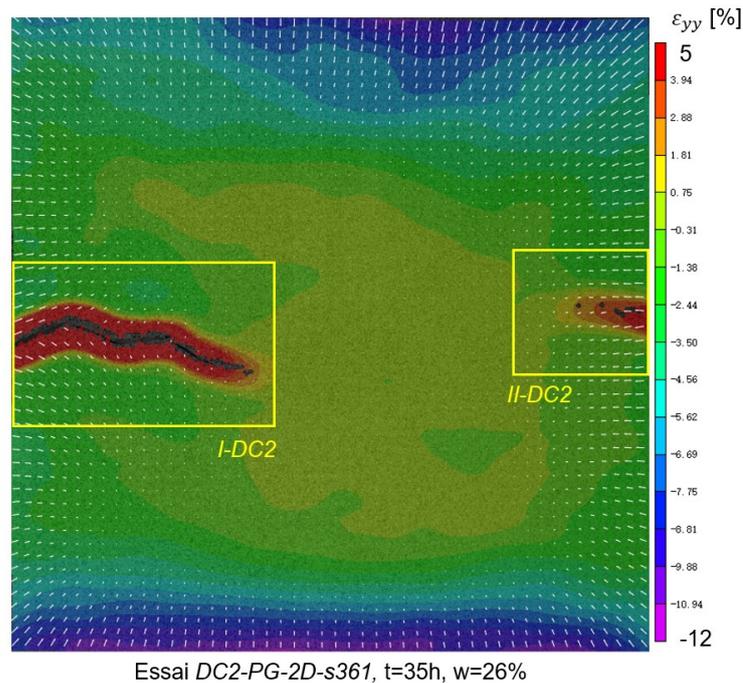


Figure V.11 : Fissures hydriques et leurs zones en extension - cartographie des déformations ε_{yy} de l'essai *DC2-PG-2D-s361*.

Dans cette partie, on analyse les deux fissures qui se sont développées pendant l'essai *DC2-PG-2D-s361*. La première fissure s'est initiée en premier à une teneur en eau d'environ 30 %, puis s'est développée à partir du bord gauche de l'échantillon. La deuxième fissure s'est développée plus tard à partir du bord droit de l'échantillon. Les deux fissures se rejoignent finalement vers le centre de l'échantillon. L'état final de ces fissures est illustré par la figure V.2 (b).

La figure V.11 représente la cartographie de déformations locales pendant la propagation des fissures ($t = 35$ h, $w = 36$ %). Les deux zones rectangulaires jaunes (*I-DC2* et *II-DC2*) dans la cartographie indiquent la zone où la déformation se développe très localement avant que les deux fissures apparaissent.

- Les déformations locales dans la zone *I-DC2*

La figure V.12 représente les déformations locales ε_{xx} , ε_{yy} et ε_{xy} dans la zone *I-DC2* à différents temps de séchage.

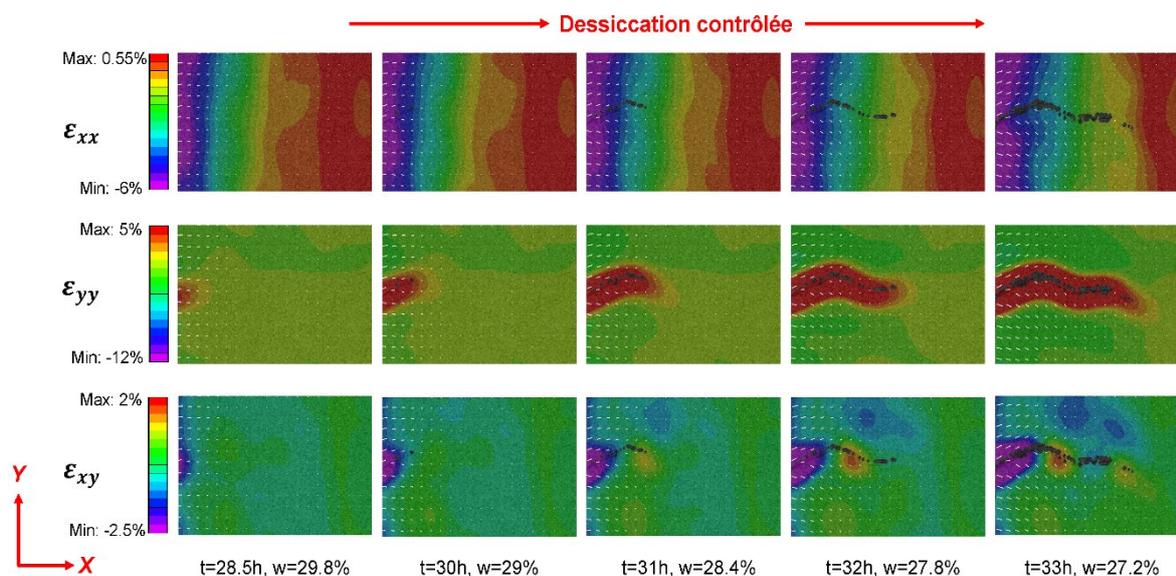


Figure V.12 : Déformations locales ε_{xx} , ε_{yy} et ε_{xy} dans la zone *I-DC2* à différents temps de séchage.

Après 28 heures de séchage et une teneur en eau à 29,5 %, une zone d'extension en ε_{yy} se produit du côté gauche dans l'espace *I-DC2*. La déformation ε_{yy} maximale dans cette zone est de +3 %. Une distorsion locale ε_{xy} est également observée dans ce même endroit avec une valeur négative maximale de -2,5 %. Les déformations locales ε_{xx} à ce moment-là ne montrent pas de zones particulières, juste un retrait important.

A 31 h de séchage, la fissure se propage, la déformation ε_{yy} est notée de +5 % au niveau de la fissure (partie rouge dans la zone *I-DC2*), ε_{yy} est de +2,5 % à la pointe de la fissure. La déformation maximale ε_{xy} (négative) ne couvre pas toute la longueur de la fissure. Une déformation de cisaillement inférieure à +1 % est enregistrée à la pointe de la fissure. ε_{xx} n'est pas significative à proximité de cette fissure.

Après 33 heures de séchage, la fissure continue de se propager dans la zone de fortes déformations ε_{yy} , elle se réoriente ensuite en traversant la zone de déformations de fort cisaillement ε_{xy} .

- Les directions principales dans la zone *I-DC2*

Nous avons calculé la direction des déformations principales dans la zone *I-DC2*, les résultats sont indiqués dans la figure V.13 sous forme de cartographie.

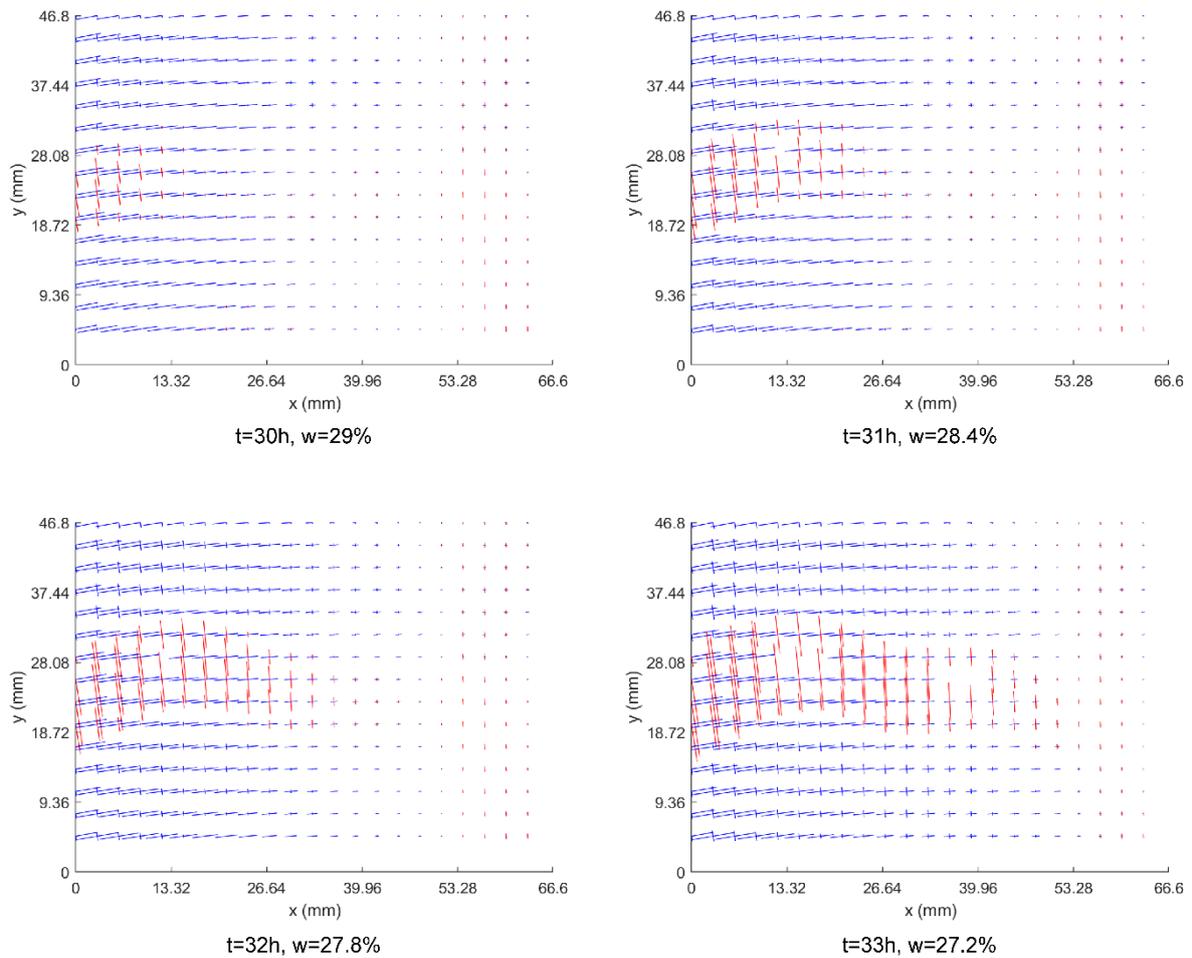


Figure V.13 : Cartographies des directions principales locales dans la zone *I-DC2* essai *DC2-PG-2D-s361*.

Rappelons que les vecteurs rouges indiquent une déformation principale positive correspondant à l'extension, et les vecteurs bleus indiquent une déformation principale négative correspondant à la compression.

En comparant les résultats du calcul de la déformation principale avec les résultats de la déformation locale obtenus par CIN, on peut constater que la partie rouge en extension a la même allure que le développement de la déformation ε_{yy} dans cette même région. La zone de déformation principale positive, elle, augmente également au cours du processus de séchage aux alentours de la fissure. Cela signifie que le processus de séchage et celui de la fissuration se déroulent simultanément.

La figure V.13 montre que la propagation de la fissure se déroule perpendiculairement à la direction de la déformation principale. On en déduit que la fissure dans la zone *I-DC2* est provoquée par une traction, et qu'elle correspond à un mécanisme d'ouverture par extension – rupture en mode I.

- Les déformations locales dans la zone II-DC2

Dans le même échantillon de l'essai *DC2-PG-2D-s361*, la deuxième fissure est indiquée dans la zone *II-DC2* (Fig. V.11). Il faut noter que la variation de la déformation ϵ_{xx} de l'échantillon est importante, et atteint un maximum de 10 % pendant le développement de cette fissure.

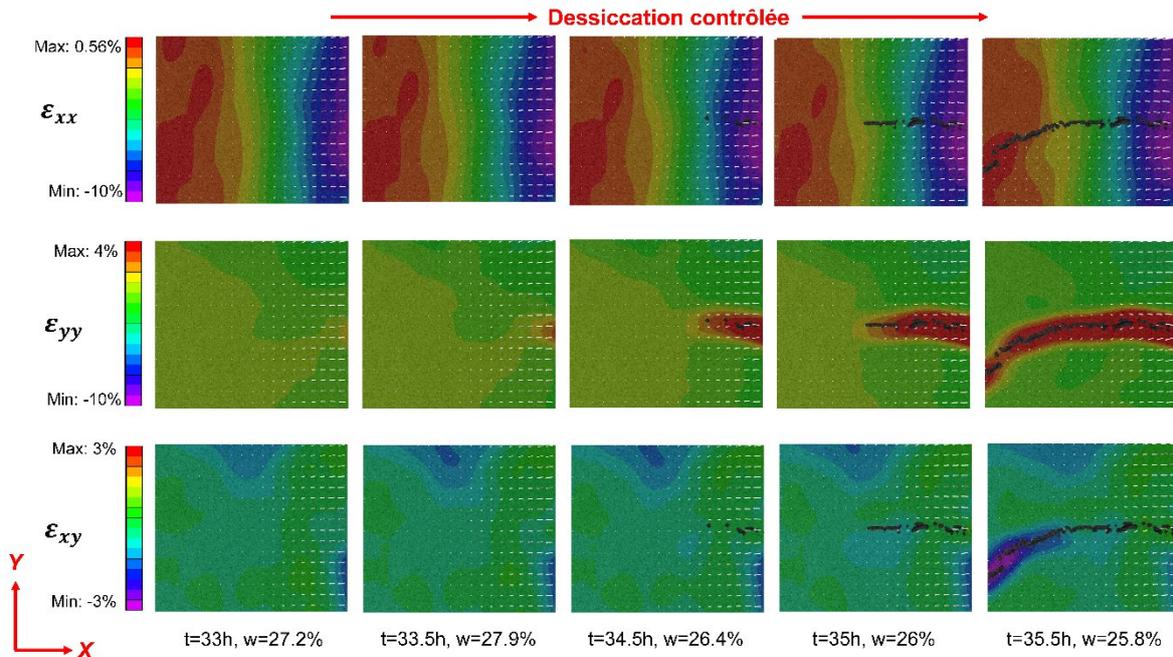


Figure V.14 : Déformations locales ϵ_{xx} , ϵ_{yy} et ϵ_{xy} dans la zone *II-DC2* à différents temps de séchage

La figure V.14 représente les déformations locales ϵ_{xx} , ϵ_{yy} et ϵ_{xy} sur la zone *II-DC2* à différents temps de séchage pendant l'initiation et la propagation de la fissure. Nous avons constaté que seulement les déformations ϵ_{yy} produisaient une zone d'extension et une initiation de fissure. D'autre part, une région de déformation de cisaillement négative apparaît à la pointe de la fissure lorsqu'elle rencontre une autre fissure.

- Les directions principales dans la zone II-DC2

La figure V.15 présente les cartographies des directions principales également calculées à partir des résultats de la CIN. Elles montrent que la direction de la fissure n'est pas perpendiculaire à la direction principale. Par conséquent, un mode de rupture plus complexe que le mode I se développe dans cette zone.

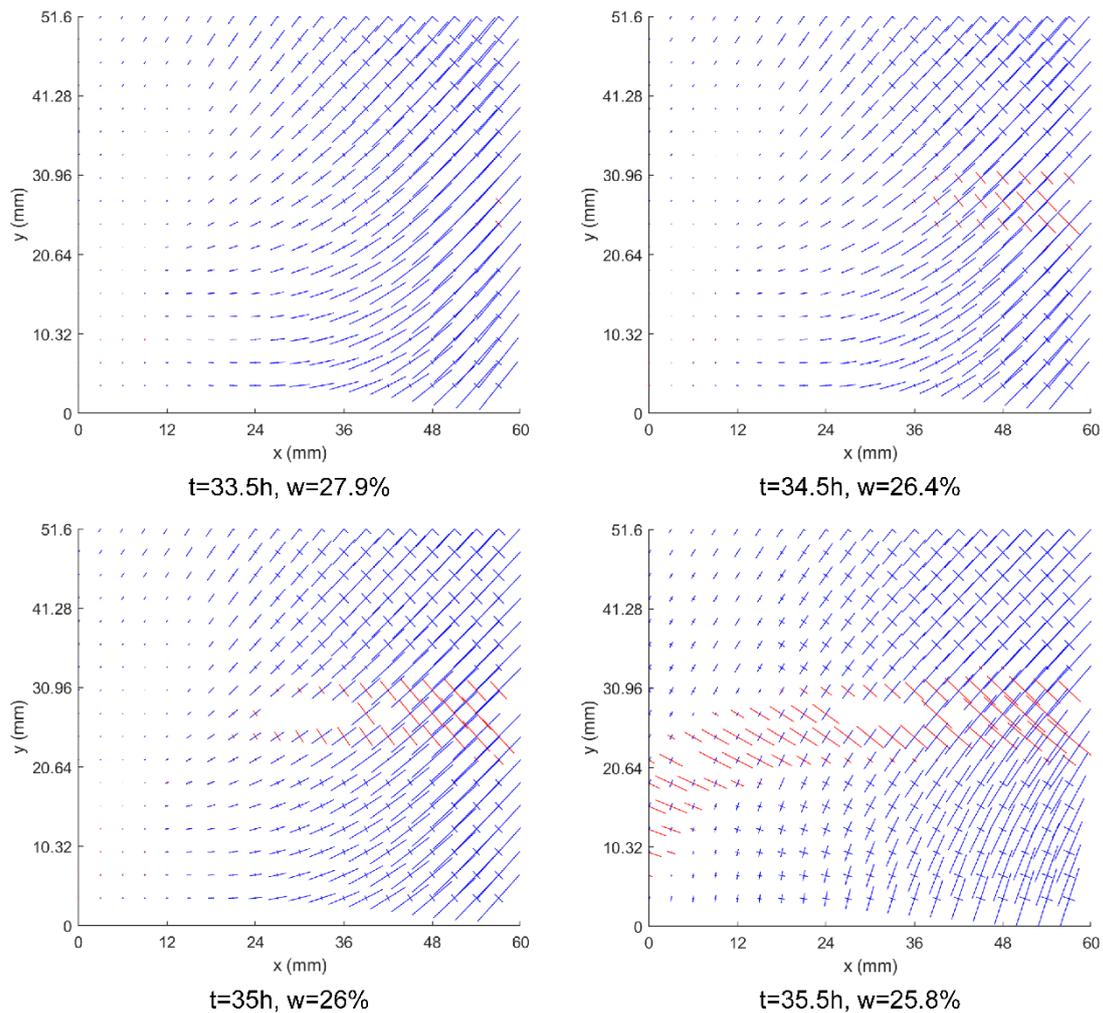


Figure V.15 : Cartographies des directions principales locales dans la zone II-DC2 essai DC2-PG-2D-s361.

1.3.5 Topographie d'une argile sur chemin de séchage et déformation de la surface (analyse en 3D)

La CIN-3D permet de réaliser des analyses de l'état de la surface de l'échantillon. Dans cette partie on montre comment la surface évolue durant le phénomène de retrait et le phénomène de fissuration au cours du séchage. Ainsi, nous présentons la déformation de la surface de l'échantillon en retrait libre (cas de l'essai DC6-TG-3D-s387), ainsi que la déformation de la surface fissurée obtenue avec le même chemin de séchage dans l'essai DC5-PG-3D-s390.

Les caractéristiques hydriques et les types de supports utilisés dans ces deux essais sont indiqués dans le tableau V.2.

Tableau V.2 : Caractéristiques hydriques des essais sélectionnés.

Non de l'essai	DC5-PG-3D-s390	DC6-TG-3D-s387
Support d'échantillon	Semi-rugueux	Lisse
Teneur en eau initiale w_0 (%)	48	48
Teneur en eau finale w_f (%)	1,5	1,6
Vitesse de séchage dw/dt (%/h)	0,76	0,74
Humidité relative HR (%)	5,6	5,7
Succion s (MPa)	390	387

- Observation 3D du phénomène de retrait

La figure V.16 représente les topographies de la surface avec la distribution des déplacements verticaux locaux W , l'échantillon est en retrait libre depuis le début du séchage jusqu'à la limite de retrait. Les déplacements locaux sont indiqués par des flèches. Les valeurs positives des déplacements verticaux signifient une direction vers le haut, et les valeurs négatives signifient une direction vers le bas. Dans la légende de la cartographie, les couleurs allant du rouge vers le violet indiquent le niveau des déplacements.

La figure V.16 (a) montre la surface supérieure de l'échantillon au début du séchage. Après 9,6 h de séchage et une teneur en eau de 40 %, la surface supérieure n'est pas parfaitement plane, elle est légèrement plus basse au centre et un peu surélevée au niveau des bords. Les déplacements verticaux sont tous négatifs, ce qui indique que la surface de l'échantillon présente un tassement global. Le déplacement vertical maximal est de 0,51 mm (en couleur violette) et le déplacement vertical minimal est de 0,22 mm (en couleur rouge), ils sont concentrés au niveau du bord de l'échantillon.

La figure V.16 (b) montre qu'après 21,2 h de séchage et une teneur en eau de 30 %, le tassement (dans le sens vertical) continue de se développer. Le déplacement vertical maximal est de 0,74 mm. Les directions des déplacements locaux aux bords semblent dévier vers le centre (voir la direction des flèches noires). Cela montre que la composante horizontale du déplacement (suivant X) est importante.

La figure V.16 (c) est à une teneur en eau de 28 %. L'échantillon se soulève légèrement sur les bords, et le déplacement vertical (vers le bas) se réduit. Le déplacement vertical au centre de l'échantillon continue d'augmenter et atteint une valeur maximale de 0,8 mm.

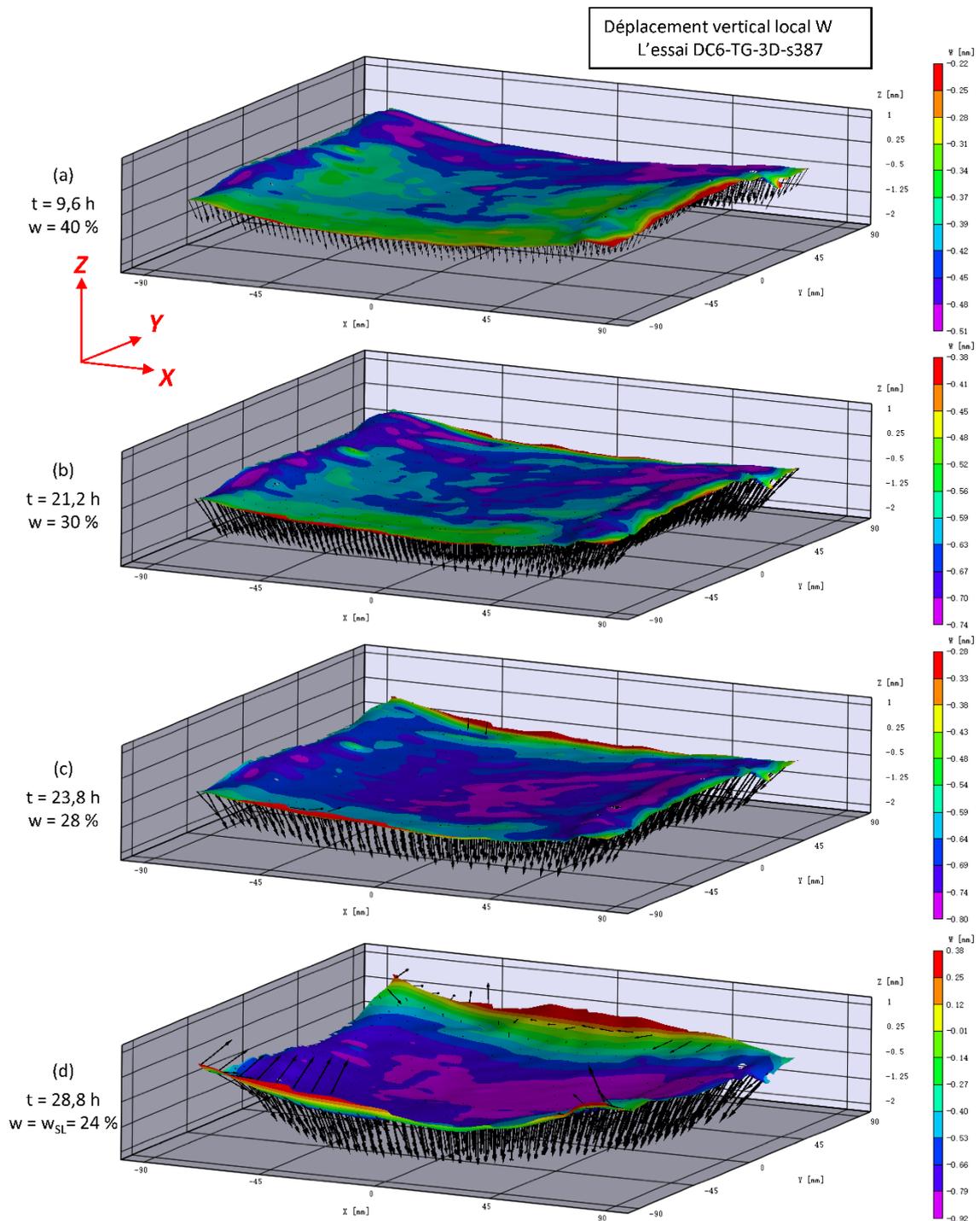


Figure V.16 : Topographies des surfaces aux différentes teneurs en eau en retrait libre essai DC6-TG-3D-s387.

À la limite de retrait (Fig. V.16.d, $t = 28,8$ h, $w = w_{SL}$), un déplacement vertical maximum positif de 0,38 mm a été mesuré au bord de l'échantillon, dans la zone où le uplift est manifeste. On montre ici que le déplacement vertical dans la région du centre de l'échantillon n'a pas été affecté par l'effet uplift, et il continue à augmenter jusqu'à une valeur maximale de 0,92 mm (en violet). La surface montre clairement que les quatre coins

de l'échantillon sont surélevés.

- Le phénomène de fissuration - Observation 3D

La figure V.17 représente la distribution des déplacements verticaux locaux W sur la surface de l'échantillon fissuré.

Après 10,3 h de séchage, la teneur en humidité de l'échantillon a été réduite à 40 %. La figure V.17 (a) présente l'état de la surface supérieure de l'échantillon et la distribution des déplacements verticaux. Le déplacement maximal de 0,54 mm en négatif (vers le bas) se trouve au centre de l'échantillon. Le déplacement minimal de 0,09 mm en positif (vers le haut) se trouve au bord de l'échantillon. En comparant avec le retrait libre à la même teneur en eau (Fig. V.16 a) on voit que le déplacement au centre de l'échantillon est similaire et que le déplacement sur le bord de l'échantillon est plus grand. L'échantillon s'est soulevé dès le début du séchage.

La figure V.17 (b) est à la teneur en eau de 30 %. On observe un déplacement vertical positif de 0,94 mm à un coin de la surface. Le soulèvement aux bords a largement dépassé le déplacement vertical négatif résultant du retrait libre. A cet instant, la valeur de la déformation mécanique, due aux frottements support/argile, est au maximum comme l'indique la courbe bleue de la figure V.7. On peut également voir que le déplacement vertical maximal au milieu de l'échantillon est de 1,19 mm, supérieur à celui enregistré dans le retrait libre à la même teneur en eau (voir Fig.V.16 b où le déplacement vertical maximal est de 0,75 mm). On note qu'à cet instant du séchage, la déformation verticale est supérieure à la déformation verticale du retrait libre (courbe bleue de la Fig.V.6).

La figure V.17 (c) correspond à un séchage de $t = 26,2$ h et $w = 28$ %, et le début de la propagation des fissures. Une fissure près du centre de l'échantillon s'est produite et se dirige vers le bord dans la zone violette (négative). En revanche, on n'observe pas de distribution en déplacements verticaux positifs dans cette zone fissurée. Cela semble indiquer que la fissure a été provoquée par la composante horizontale est déformations locales.

À la limite de retrait (Fig.V.17 d, $t = 31,8$ h, $w = w_{SL}$) le centre de l'échantillon présente un affaissement, le déplacement maximal de 1,32 mm se trouve dans la zone violette. A cet instant, le soulèvement des bords atteint un état stable avec une valeur maximale de 1,2 mm au coin le plus surélevé.

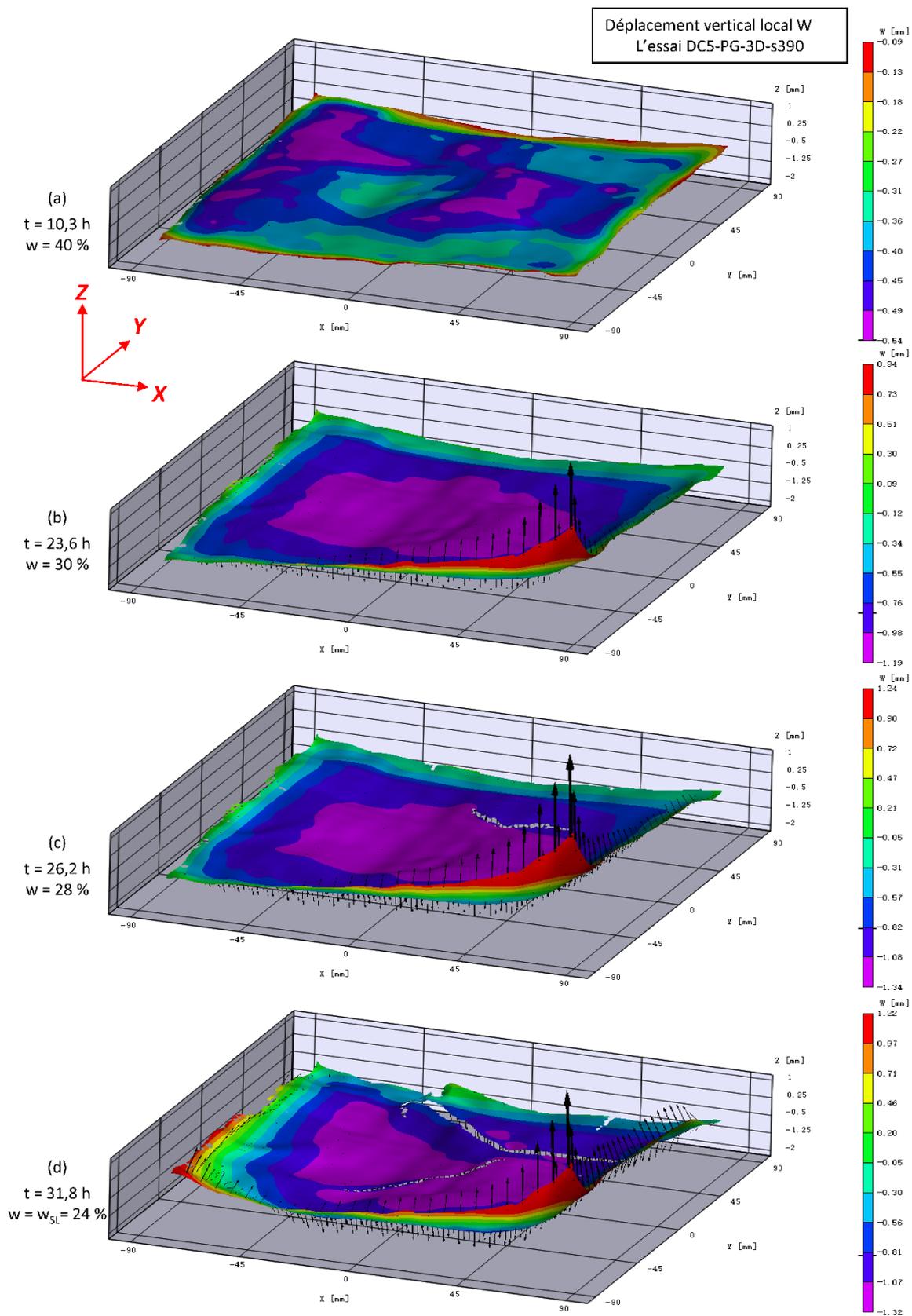


Figure V.17 : Topographies aux différentes teneurs en eau indiquant des fissures et du retrait de l'essai DC5-PG-3D-s390.

En comparant le retrait contrarié avec le retrait libre, on constate que le soulèvement se produit plus tôt et perturbe la déformation des bords de l'échantillon. L'effet de limiter le retrait, qui agit principalement sur la déformation horizontale, provoque un soulèvement plus important au niveau des bords. En revanche, le déplacement vertical est quasiment sans effet sur la fissure qui se propage horizontalement.

2 Poutrelles d'argile non saturée en flexion 3 points

Les essais de flexion 3 points sur les poutrelles d'argile sous une succion initiale donnée, ont été effectués dans la machine d'essai *Zwick Roell* équipée d'un capteur de force 1KN. La figure V.18 (a) représente la position de la poutrelle d'argile dans la machine d'essai. La poutrelle est positionnée sur un support métallique sur deux appuis simples situés à une distance de 20 mm. La partie haute de la poutrelle est en contact avec un capteur de force fixé sur un plateau amovible. Entre le capteur et la surface de l'argile un cylindre métallique permet une transmission de la charge au milieu de la portée avec une vitesse de chargement de 0,02 à 0,06 mm/min. Pendant les essais, des images de la surface de la poutrelle d'argile perpendiculaire au plan X-Y (Fig.V.18 b) ont été prises à raison de 4 images/s pour un traitement CIN.

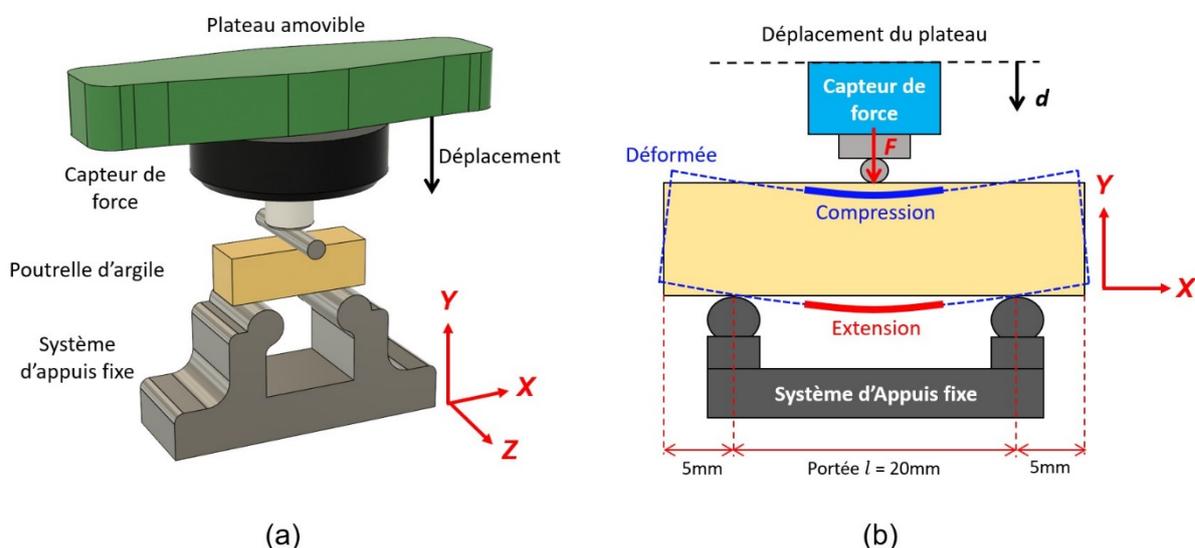


Figure V.18 : Essai de flexion 3 points :
 (a) Schéma du dispositif expérimental et position de la poutrelle d'argile
 (b) Illustration de la flexion.

La figure V.18 (b) illustre l'état déformé de la poutrelle sous la flexion trois points. Lorsqu'une poutrelle se déforme la partie supérieure de la poutrelle est en compression tandis que la partie inférieure est en extension. La partie inférieure est donc sous traction indirecte, et doit générer des déformations de traction. Lorsque la résistance à la traction du sol est dépassée, des fissures sont amorcées dans cette partie tendue.

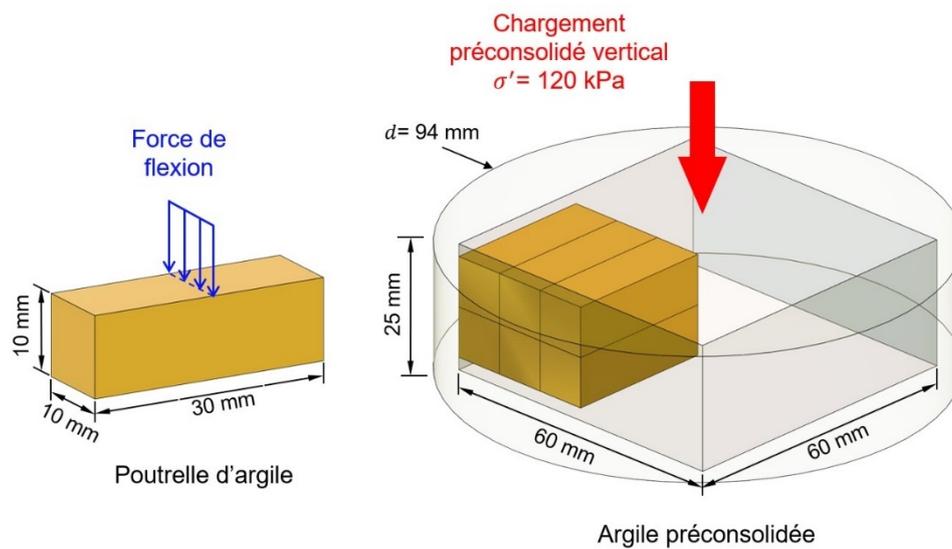


Figure V.19 : Schéma de fabrication et dimensions de la poutrelle.

La figure V.19 représente la méthode de fabrication des poutrelles d'argile. L'argile préalablement consolidée en compression unidimensionnelle, est découpée en petites poutrelles avec une longueur de 30 mm et une section de 10 x 10 mm. La direction longitudinale de la poutre est perpendiculaire à la direction de la contrainte du chargement qui est de 120 kPa.

Trois solutions salines ont été utilisées permettant d'imposer les trois niveaux de succion différents aux poutrelles. La procédure expérimentale est décrite dans le chapitre III en section 2. La nomenclature et les caractéristiques hydriques des essais de flexion sont reportées dans le tableau V.3. (Noter que *PF* signifie *Poutrelle en Flexion*).

Tableau V.3 : Nomenclature et caractéristiques hydriques des essais de flexion réalisés.

Succion Imposée	38 MPa NaCl	104 MPa K ₂ CO ₃	364 MPa KOH
Noms des essais	PF1-s38	PF1-s104	PF1-s364
	PF2-s38	PF2-s104	PF2-s364
w _f (%)	3	2,6	2,1
HR (%)	75,5	46,5	6,8

Les essais ont été réalisés avec des cycles de charge-décharge sauf l'essai *PF1-s104* qui est monotone.

2.1 Comportement mécanique des poutrelles d'argile sous succion en flexion

- Poutrelle d'argile initialement sous un environnement de succion de 38 MPa

Les deux essais présentés dans la figure V.20 concernent les essais *PF1-s38* et *PF2-s38*, la résistance maximum est de 13,8 N et 13,6 N respectivement, associée à des déflexions respectivement de 0,26 mm et 0,25 mm.

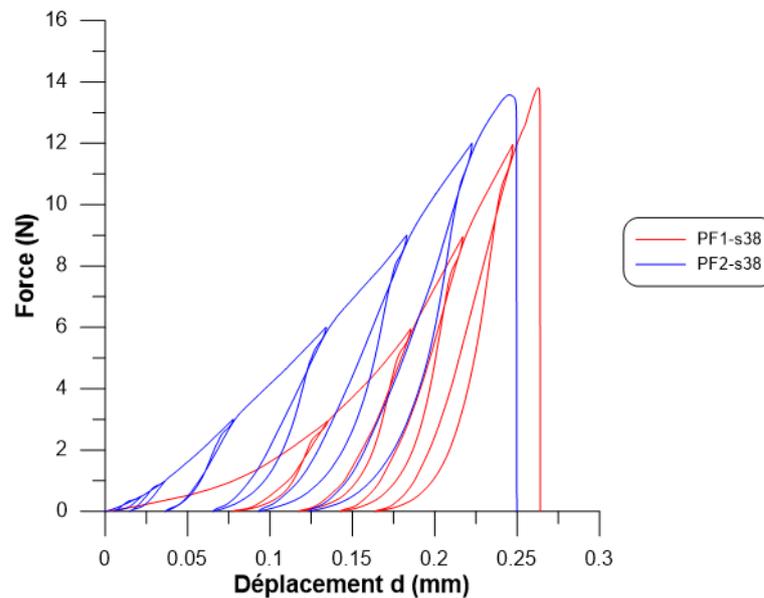


Figure V.20 : Évolution de la force de flexion en fonction du la déflexion Poutrelles sous un environnement initial de succion de 38 MPa.

L'essai *PF2-s38* comporte deux cycles de plus en début de chargement comparé à l'essai *PF1-s38*. Nous constatons que des parties non-linéaires, très incurvées, existent dans les courbes en tout début du chargement. Nous pouvons constater également qu'en fin de déchargement cette même forme incurvée est reproduite, alors qu'en début du chargement nous sommes sur une évolution plutôt linéaire. Il se peut que cela soit dû à des problèmes de contact entre la poutrelle et les appuis. Néanmoins, nous n'avons pas réussi à régler ce problème et une étude plus approfondie doit être menée pour régler cette question.

- Poutrelle d'argile initialement sous un environnement de succion de 104 MPa

La figure V.21 représente les résultats des essais *PF1-s104* et *PF2-s104*. L'essai *PF1-s104* est monotone, et l'essai *PF2-s104* est soumis à des cycles de charges-décharges.

La force maximale de flexion obtenue à la rupture sur l'essai *PF1-s104* est de 16,9 N, la déflexion associée est de 0,26 mm. Pour l'essai *PF2-s104* la force de flexion maximale est

de 17,6 N, elle est légèrement supérieure à celle de l'essai *PF1-s104*. La déflexion maximale à la rupture de l'essai *PF2-s104* est de 0,21 mm, légèrement inférieure à la déflexion maximale de l'essai *PF1-s104*.

Les deux courbes de la figure V.21 présentent une même tendance de croissance qui semble être linéaire à partir de 0,1 mm de déflexion jusqu'à la rupture. Dans cet intervalle de déflexion, cette linéarité est plus claire dans l'essai *PF2-s104*. Dans les chemins de déchargement la non-linéarité est retrouvée à la fin de la décharge.

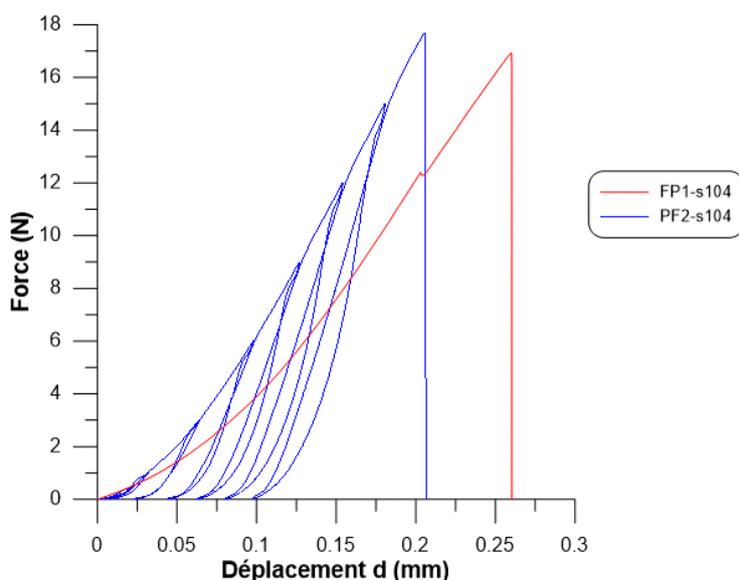


Figure V.21 : Évolution de la force en fonction de la déflexion Poutrelles sous un environnement initial de succion de 104 MPa.

- *Poutrelle d'argile initialement sous un environnement de succion de 364 MPa*

La figure V.22 représente les résultats des essais *PF1-s-364* et *PF2-s364*. La force maximale de flexion est de 16,9 N et 17,7 N pour respectivement *PF1-s-364* et *PF2-s364*. Les poutrelles sont associées à une déflexion maximale de 0,24 mm et 0,21 mm respectivement. Du point de vue de la forme des courbes, ces essais affichent globalement les mêmes allures que les deux autres essais réalisés sous des niveaux de succion différents.

La force de rupture est similaire pour les essais *PF1-s-364* et *PF1-s104*, et affiche environ 17 N, par contre elle est plus faible dans le cas de l'essai *PF2-s38* où l'environnement de succion est plus faible, et affiche une force de rupture de 13,6 N environ.

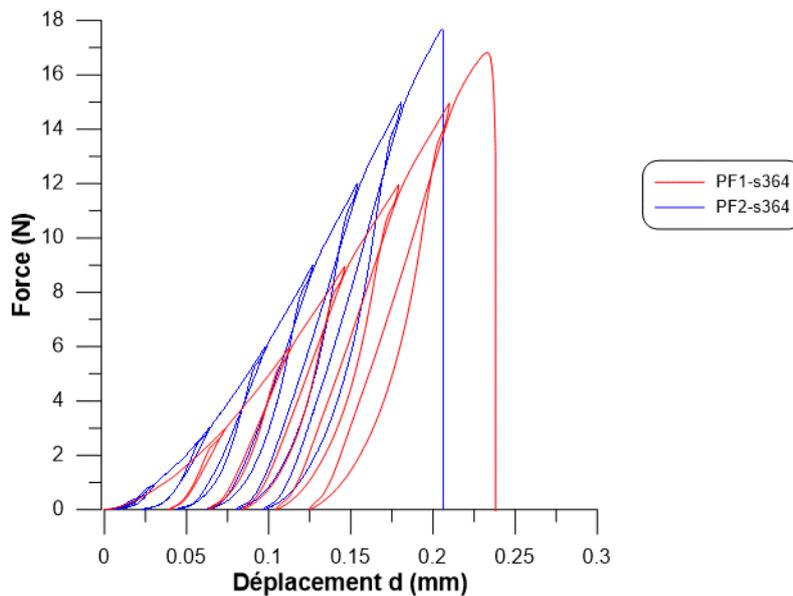


Figure V.22 : Évolution de la force en fonction de la déflexion Poutrelles sous un environnement initial de succion de 364 MPa.

2.2 Analyse par la CIN de la déformation locale liée à la fissuration

Cette partie concerne l'analyse avec la CIN en vue de suivre l'initiation et le développement des fissures pendant les essais de flexion. Rappelons que la partie inférieure de la poutrelle est en tension, on s'attend donc à ce que le développement de la déformation dans cette région puisse entraîner une fissure qui se développe depuis la zone tendue jusqu'à la zone comprimée.

La figure V.23 présente les exemples des cartographies des déformations locales ε_{xx} , ε_{yy} et ε_{xy} . La poutrelle présentée est sous succion initiale, l'essai est *PF1-s38*.

La figure V.23 (a) montre les déformations locales ε_{xx} dans la poutrelle. Nous pouvons observer 4 zones où la déformation se développe en extension (zones en couleur rouge). Ces zones sont situées au niveau de la charge (partie haute de la poutrelle), au niveau des deux appuis, et entre les deux appuis vers le milieu de la portée.

Les déformations observées au niveau de la charge et des appuis sont probablement dues à la surface de contact avec l'échantillon qui est faible. La partie métallique a tendance à entrer dans l'argile et s'enfonce dans l'échantillon. La même chose est observée dans la cartographie de déformation ε_{yy} (extension) sur la figure V.23 (b) et dans la carte de déformation ε_{xy} (distorsion) sur la figure V.23 (c).

En effet, comme la partie inférieure de la poutre est soumise à des contraintes de traction indirectes où doit se développer une contrainte de traction maximale au centre de la poutrelle, nous allons dans notre analyse nous concentrer sur cette zone.

- Poutrelle d'argile avec succion de 38 MPa - essai PF1-s38

La figure V.24 présente l'évolution de ε_{xx} de façon à pouvoir détecter l'initiation puis la propagation de la fissure.

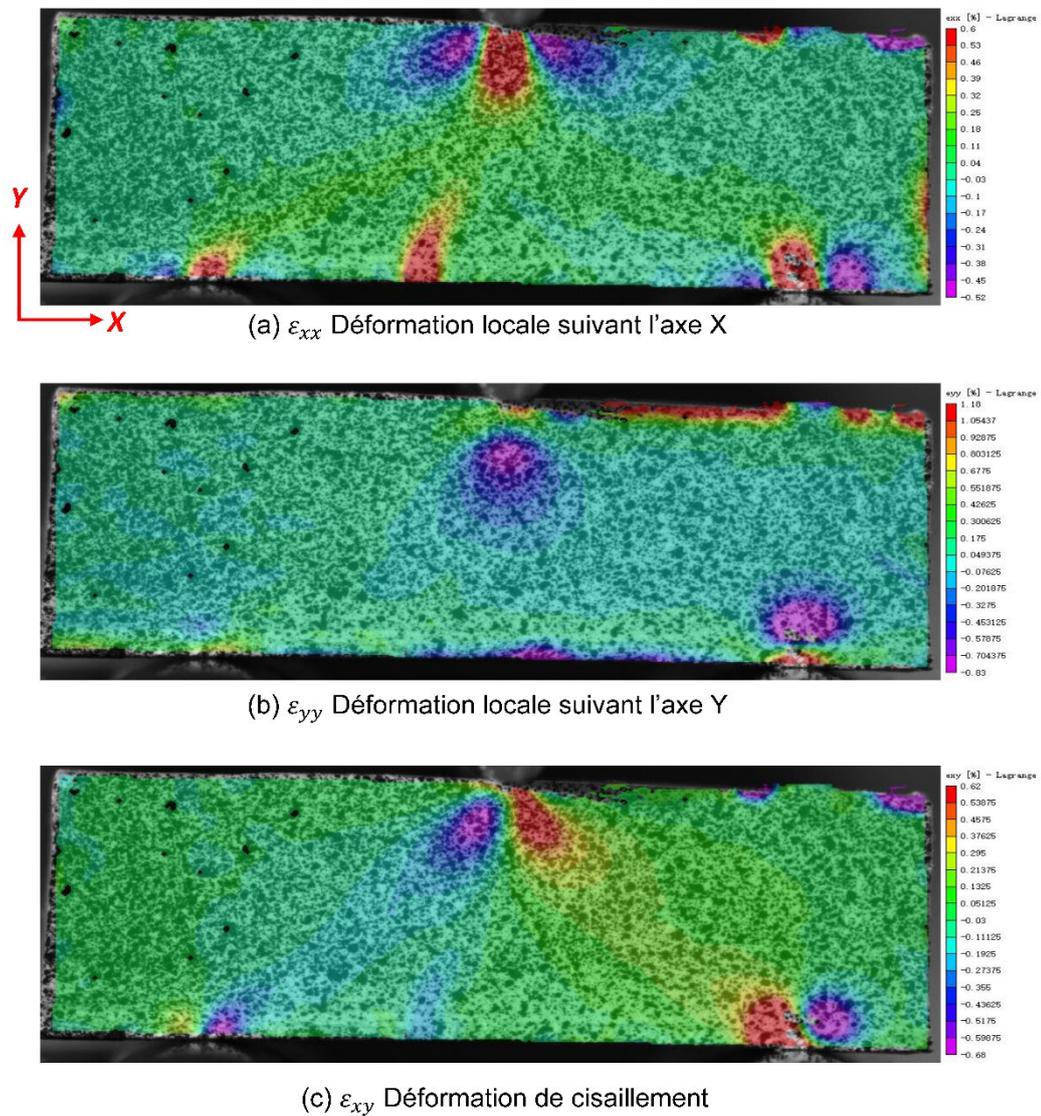


Figure V.23 : Cartographies des déformations locales dans la poutrelle de l'essai *PF1-s38* avant la fissuration.

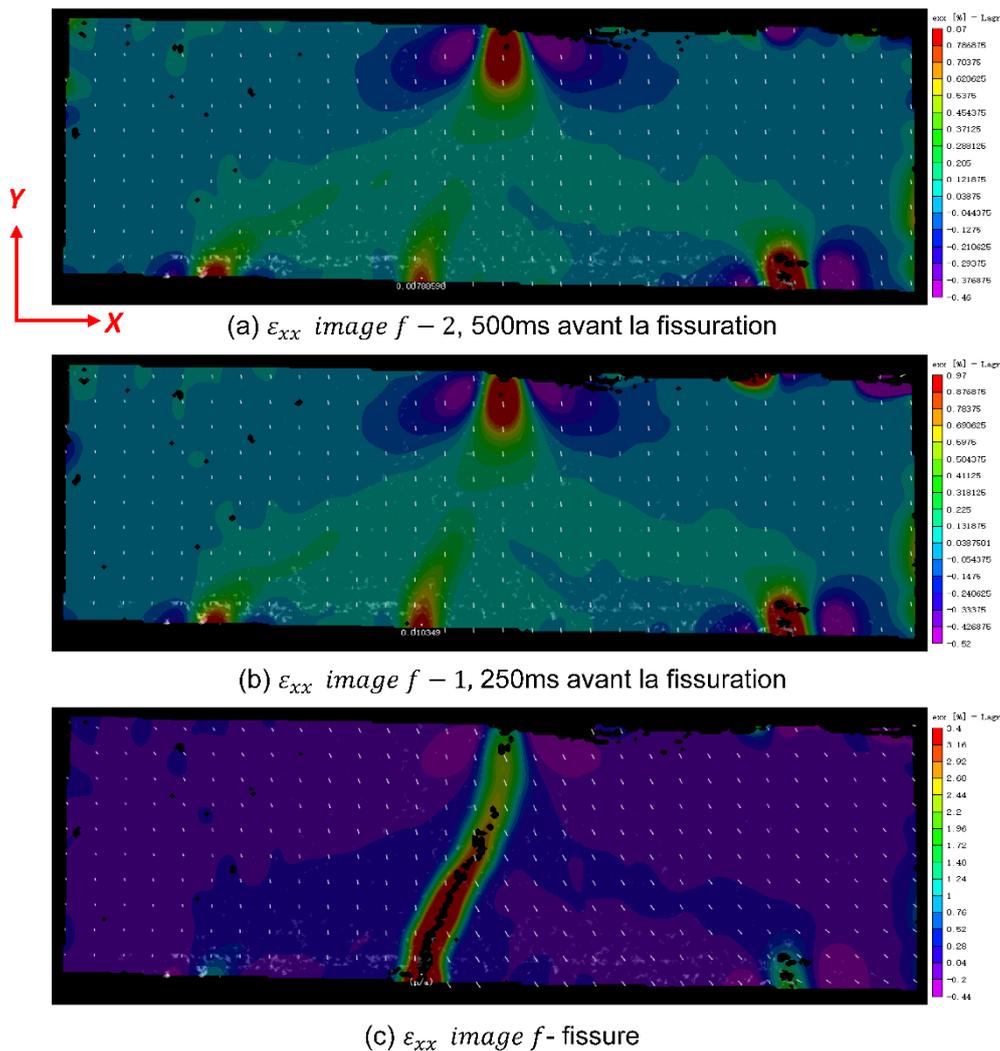


Figure V.24 : Évolution de la déformation locale ε_{xx} pendant la fissuration essai *PF1-s38*.

En utilisant l'instant de la fissuration comme référence (*image f*), deux images à des instants proches de la fissuration ont été choisies, l'*image f - 1* et l'*image f - 2*. L'intervalle du temps entre les trois cartographies représentant ε_{xx} dans la figure V.24 est de 250 ms.

A (*f - 2*) (Fig. V.24 a), nous observons une zone de fortes déformations ε_{xx} positives (extension) dans la partie tendue de la poutrelle. La déformation maximale est de +0,789 %. Un autre bulbe (en vert clair) de déformation positive, mais plus faible d'environ +0,15 %, apparait à la périphérie de la zone.

A *f - 1* (Fig. V.24 b) la zone d'extension de fortes déformations augmente rapidement jusqu'à atteindre +1,035 %. Cette déformation maximale de cette zone correspond très probablement à la résistance à la traction du matériau. La force appliquée sur la poutre atteint sa valeur maximale qui est de 13,8 N.

La figure V.24 (c) montre la morphologie de la fissure qui se développe du bas vers le haut

de la poutrelle au niveau du point d'application de la force. Cette fissure divise complètement l'échantillon en deux parties.

- Poutrelle d'argile avec succion de 104 MPa - essai PF2-s104

A son état initial la poutrelle d'argile est à un environnement de succion de 104 MPa. L'évolution de ε_{xx} au cours du chargement en flexion est représentée dans la figure V.25.

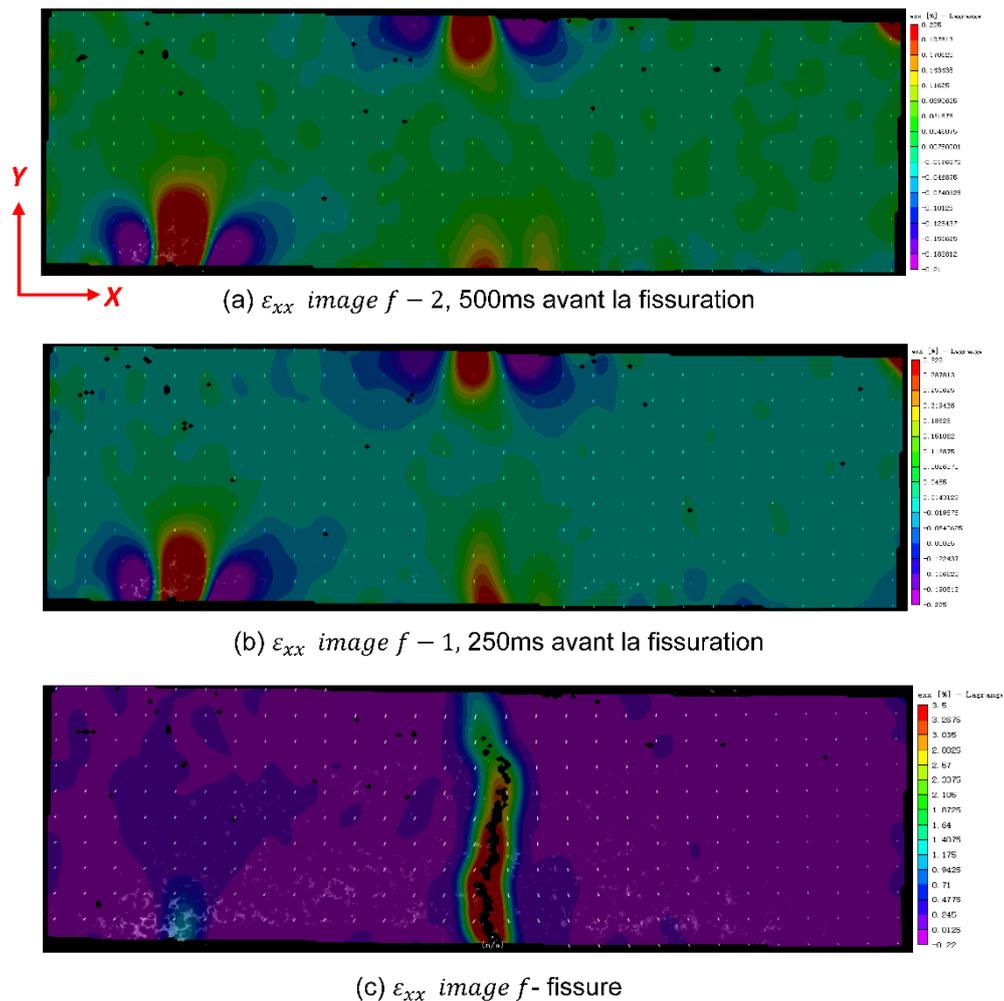


Figure V.25 : Évolution de la déformation locale ε_{xx} pendant la fissuration essai *PF2-s104*

La cartographie de ε_{xx} montre une zone d'extension qui se développe sur la partie basse de l'échantillon. A ($f - 1$) (Fig. V.25 b), le maximum de déformation dans la zone a atteint la valeur maximale de 0,354 %. C'est à cet endroit que la fissure s'initie.

La figure V.25 (c) montre le développement de la fissure qui est quasiment perpendiculaire à l'axe X .

- Poutrelle d'argile avec succion de 364 MPa - essai FP2-s364

La figure V.26 représente les trois états successifs de la déformation locale ε_{xx} de la poutrelle au moment de l'initiation et propagation de la fissure. Le comportement est similaire à celui des deux autres essais vus précédemment.

La déformation positive maximale dans la zone d'extension est déterminée à l'instant ($f - 1$) (Fig. V.26 b), elle affiche une valeur maximale de 0,354 %.

- Étude de la distribution des déformations locales en différentes parties de la poutrelle.

Afin de caractériser le mécanisme de fissuration, ainsi que l'influence de la déformation locale sur la fissuration de la poutrelle, nous proposons dans cette partie d'analyser la distribution de la déformation le long de la partie comprimée, le long de la partie tendue et au milieu de la poutrelle comme illustré dans la figure I.27, et ce juste avant la rupture.

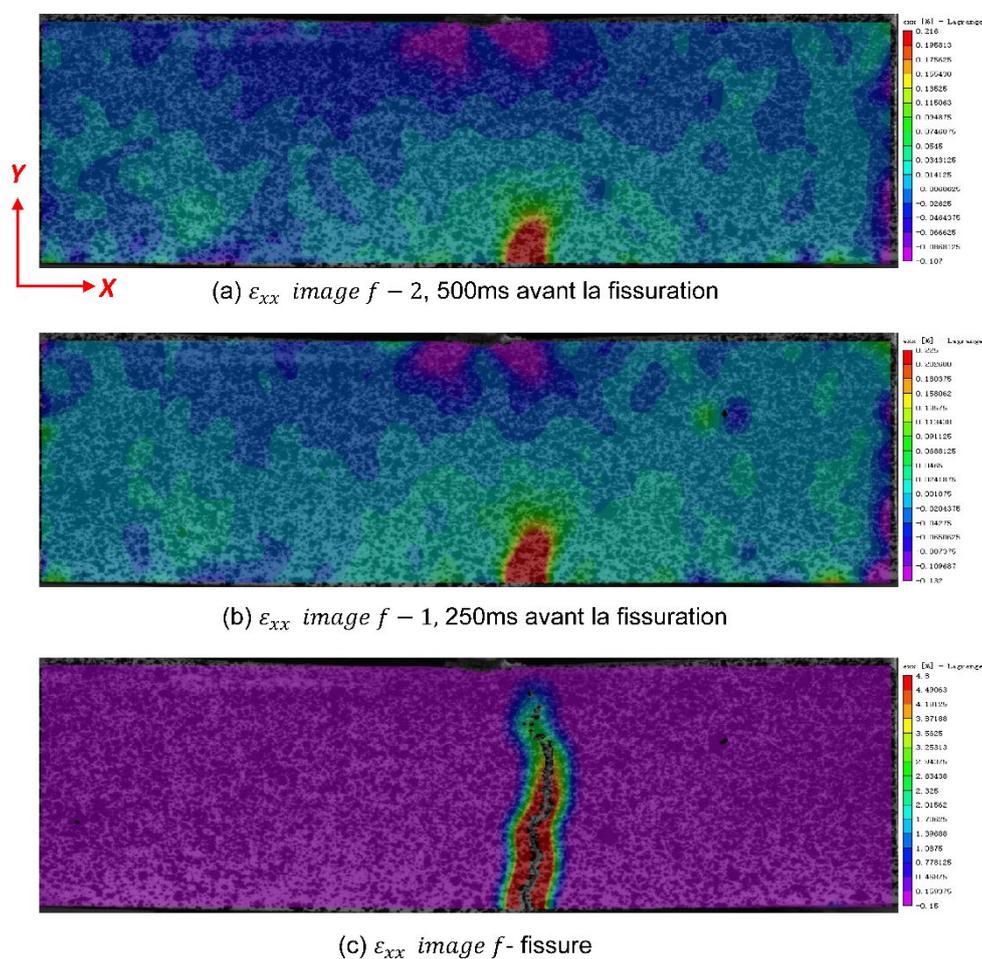


Figure V.26 : Évolution de ε_{xx} pendant la fissuration essai PF2-s364.

- Les déformations locales ε_{xx} :

La figure V.27 (a) représente ε_{xx} a ($f - 1$) (c'est-à-dire 250 ms avant la fissuration).

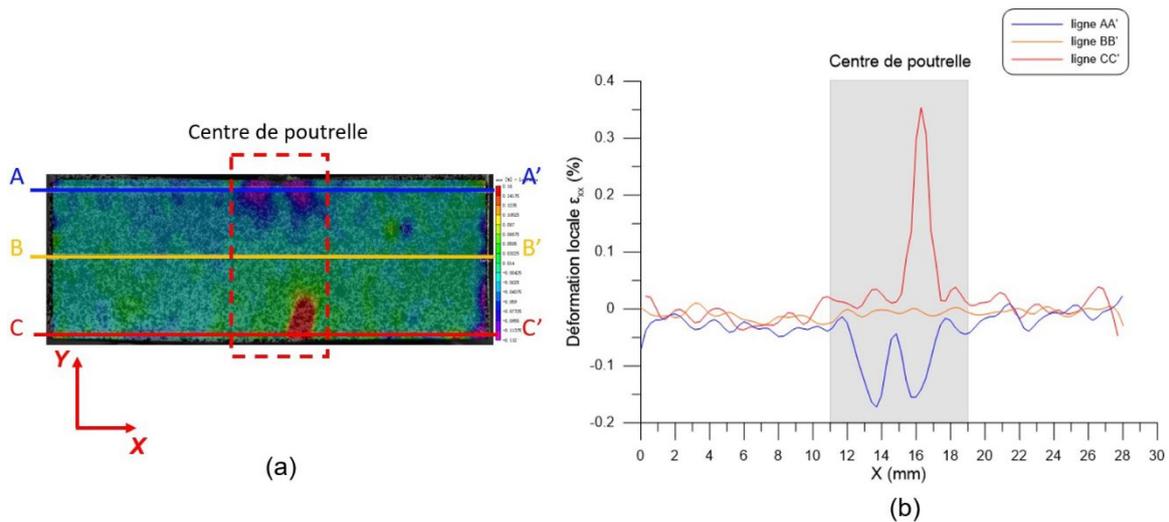


Figure V.27 : Distribution des déformations locales ϵ_{xx} , essai PF2-s364
 (a) Positions des lignes analysées
 (b) Distributions de la déformation locale.

Dans la figure V.27 (b), les courbes représentent la distribution de la déformation locale ϵ_{xx} sur les trois lignes horizontales AA', BB' et CC'.

Le long de la ligne AA', les déformations locales ϵ_{xx} sont globalement en compression, la déformation maximale se situe au milieu et affiche une valeur maximale de -0,172%. Les deux pics correspondent aux zones de compression (les deux bulbes violets de part et d'autre du point d'application de la force) représentés sur la figure V.27 (a).

Sur la ligne CC' la distribution des déformations locales est analysée en différentes zones, la zone proche du centre de l'échantillon, et les zones sur les côtés de l'échantillon. Les déformations locales ϵ_{xx} sur les deux côtés de la poutrelle sont proches de zéro, elles présentent des fluctuations inférieures de $\pm 0,05$ %. Dans la partie centrale ϵ_{xx} est en extension, le pic correspond à une zone où la déformation atteint la valeur maximale de 0,352 % (Fig. V.27 a). La fissure se produit dans cette zone.

ϵ_{xx} mesurées le long de la ligne BB' sont proches de zéro, les fluctuations sont très faibles.

- Les déformations locales ϵ_{yy} :

Le long des mêmes droites horizontales AA', BB' et CC', nous avons analysé la distribution de la déformation locale ϵ_{yy} . La figure V.28 présente les résultats de cette analyse. La force de flexion est parallèle à la direction Y.

La figure V.28 (b) montre que les déformations locales ϵ_{yy} sont globalement en compression sur la ligne AA', cette compression est importante au milieu de AA', et atteint

-0,382 %.

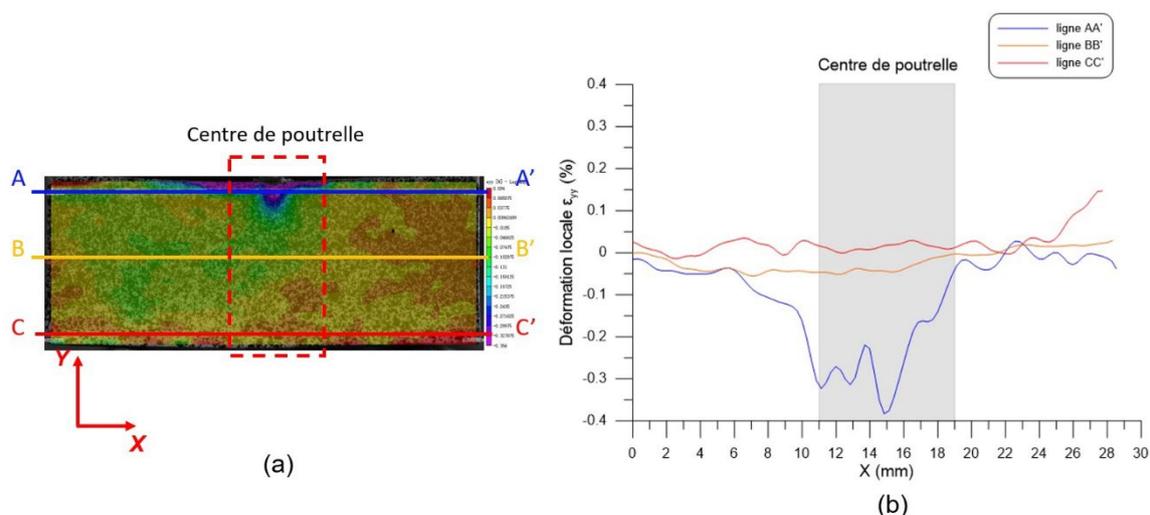


Figure V.28 : Distribution des déformations locales ϵ_{yy} essai PF2-s364
(a) Positions des lignes analysées ;
(b) Distributions de la déformation locale.

Les déformations ϵ_{yy} le long de BB' et CC' sont proches de zéro avec des fluctuations très faibles.

- Les déformations de cisaillement ϵ_{xy} :

La figure V.29 montre les distributions de la déformation de cisaillement ϵ_{xy} le long de AA' , BB' et CC' .

Le long de AA' nous observons des déformations de cisaillement ϵ_{xy} vers le milieu de la droite (Fig. V.29 b). Ces déformations sont dues à la surface de contact très étroite entre la barre de chargement et l'échantillon. Lorsque la force est appliquée, il y a une tendance de cisailier au niveau du contact. ϵ_{xy} varie de -0,1 % à +0,1 %.

Le long des lignes BB' et CC' , les déformations ϵ_{xy} sont proches de zéro.

En comparant avec la distribution de ϵ_{xx} et de ϵ_{yy} , ϵ_{xy} est bien plus faible le long de ces trois droites.

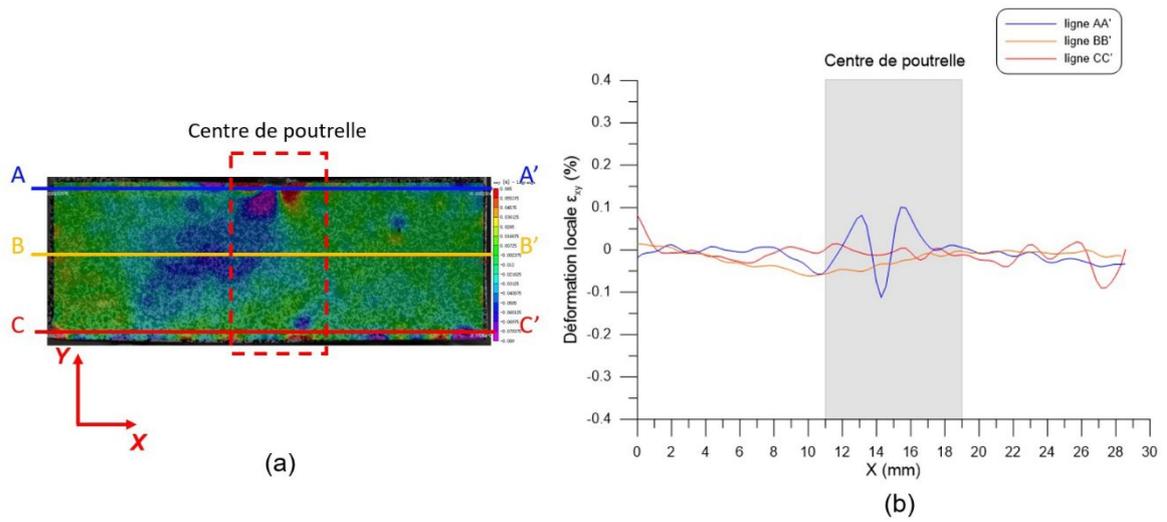


Figure V.29 : Distribution des déformations de cisaillement ϵ_{xy} l'essai PF2-s364
 (a) Positions des lignes analysées
 (b) Distributions de la déformation locale.

Conclusion

Dans ce chapitre, l'initiation et la propagation des fissures observées dans les essais de dessiccation contrôlée et les essais de flexion trois points sont analysées à échelle globale et à échelle locale. L'analyse des résultats expérimentaux nous permet de tirer les conclusions suivantes concernant les mécanismes de fissuration sous différentes sollicitations :

- Pour les mêmes conditions aux limites, les échantillons d'argile soumis au même chemin de séchage peuvent produire la même surface totale fissurée, mais le nombre et la morphologie des fissures individuelles sont aléatoires

- L'effet du support qui empêche le retrait horizontal entraîne la propagation des fissures dans la direction horizontale et leur influence sur la direction verticale se manifeste principalement sous la forme de uplift de l'échantillon.

- Le mécanisme de fissuration identifié est le mode I représentant l'ouverture par extension, où la fissure se développe perpendiculairement à la direction de la déformation principale. D'autres modes de rupture peuvent être présents dans le même échantillon avec des mécanismes de rupture plus complexes mais sous une forme mixte avec le mode I.

- Comme la partie inférieure de la poutrelle est en tension, nous avons observé une zone d'extension avec une concentration de déformation locale ε_{xx} . Lorsque la résistance à la traction est dépassée, la fissure en mode I est amorcée dans cette zone.

- L'effet de la succion initiale sur le comportement mécanique de la poutrelle d'argile lors des essais de flexion trois points est résumé ci-dessous :

- La résistance maximale à la traction est directement proportionnelle à la succion initiale imposée.
- La flexion maximale observée est plus petite dans le cas d'une forte succion initiale.
- La déformation critique avant la fissuration (ε_{xx}) est plus importante, dans le cas d'une faible succion initiale.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette thèse contribue à la caractérisation du retrait de dessiccation et de la fissuration sous sollicitation hydrique et mécanique de l'argile remaniée. Elle a permis le développement d'une méthode rigoureuse pour l'utilisation de la CIN en optimisant les paramètres de *VIC-2D* et *VIC-3D* ainsi que la méthode de réalisation des essais.

L'argile étudiée est le *Kaolin K13* qui contient un pourcentage élevé de particules Kaolinite. L'étude consiste principalement à l'investigation expérimentale de différents échantillons d'argile saturés et non saturés. Nous avons étudié trois types d'échantillons d'argile : les petits échantillons pour l'identification de la courbe de rétention d'eau et de la courbe de retrait, les grands échantillons pour les essais de dessiccation contrôlée et les poutrelles d'argile pour les essais de traction indirecte.

Les résultats analysés dans notre étude sont les suivants : (1) mesures de la teneur en eau, de l'indice des vides, du degré de saturation et de la succion lors du séchage afin d'obtenir la courbe de retrait et les courbes de rétention d'eau du sol. Cette partie a permis de mieux comprendre l'interaction entre le retrait, le séchage et la succion ; (2) mesures des déformations globales et locales dans l'échantillon au cours de la dessiccation contrôlée pour étudier le comportement de retrait, l'initiation et la propagation des fissures, et l'effet des conditions aux limites (supports) sur le retrait et la fissuration de l'échantillon ; (3) détermination de la teneur en eau et de la succion locales des échantillons pour analyser leur hétérogénéité durant le séchage ; (4) analyse quantitative et morphologique des fissures pour identifier leur propagation ; (5) détermination de la direction principale de la déformation afin d'étudier le mécanisme de fissuration ; (6) réalisation des essais de traction indirecte afin d'identifier les propriétés en traction et la fissuration de l'argile.

Des relations ont été établies entre la succion imposée à l'échantillon et la résistance à la traction ainsi que la propagation des fissures. La perspective la plus importante c'est de pouvoir renforcer la méthode d'observation 3D et d'entamer un travail de modélisation d'une manière approfondie.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

A :

Aitchison, G. D. (1965). *Soil properties, shear strength and consolidation*. In proceeding 6th Interational Conference Soil Mechanic Foundations Engineering, 3, pp. 318-321.

Ajaz, A., & Parry, R. H. G. (1975). *Stress–strain behaviour of two compacted clays in tension and compression*. *Geotechnique*, 25(3), pp. 495-512.

Albrecht, B. A., & Benson, C. H. (2001). *Effect of desiccation on compacted natural clays*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(1), pp. 67-75.

Al-Hussaini, M. M., & Townsend, F. C. (1973). *Tensile testing of soils, a literature review*. *Soils and Pavement Laboratory*. US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.

Alonso, E. E., Gens, A. & Hight, D. W. (1987). *Special probrem soils, General Report*. In Proc. 9th European Conf. SMFE, 3, pp. 1087-1146.

Andrei, P. S. (1977). *Propriétés hydrauliques et mécaniques des sols non saturés*. *Revue Française de Géotechnique*, (2), pp. 49-78.

Avila, G. (2004). *Study of shrinkage and cracking of clays-application to clay in Bogota*. Polytechnic University of Catalunya, Barcelona, Spain.

B :

Bailey, S. W. (1980). *Structures of layer silicates*. Crystal Structures of Clay Minerals and their X-ray Identification, Mineralogical Society, London, England.

Bazant, Z. P. & Cedloin, L., (1991). *Stability of Structures : Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories*. Oxford University Press, New York.

Bergaya, F., & Lagaly, G. (2006). *General introduction : clays, clay minerals, and clay science*. *Developments in clay science*, 1, pp. 1-18.

Bernier, F., Volckaert, G., Alonso, E., & Villar, M. (1997). *Suction-controlled experiments on Boom clay*. *Engineering Geology*, 47(4), pp. 325-338.

Besnard, G., Hild, F., Lagrange, J. M., Martinuzzi, P., & Roux, S. (2012). *Analysis of necking in high speed experiments by stereocorrelation*. *International journal of impact engineering*, 49, pp. 179-191.

Borsic, A., Comina, C., Foti, S., Lancellotta, R., & Musso, G. (2005). *Imaging*

heterogeneities with electrical impedance tomography: laboratory results. Géotechnique, 55(7), pp. 539-547.

Boynton, S. S., & Daniel, D. E. (1985). *Hydraulic conductivity tests on compacted clay.* Journal of Geotechnical Engineering, 111(4), pp. 465-478.

Brace, W. F. (1960). *An extension of the Griffith theory of fracture to rocks.* Journal of Geophysical Research, 65(10), pp. 3477-3480.

Braudeau, E. (1988). *Equation généralisée des courbes de retrait d'échantillons de sols structurés.* CR Acad. Sci. Paris, 307(27), p. 11.

Brindley, G. W., & Pedro, G. (1973). *Rapport du Comité international de nomenclature (AIPEA), Madrid 1972.* Bulletin du Groupe français des Argiles, 25(1), pp. 37-41.

Broek D. (1984). *Elementary Fracture Mechanics.* Martinus Nijhoff Publishers, Boston.

Bronswijk, J. J. B. (1991). *Relation between vertical soil movements and water - content changes in cracking clays.* Soil Science Society of America Journal, 55(5), pp.1220-1226.

C :

Caillère, S., Hénin, S., & Esquevin, J. (1959). *Essai de synthèse de phyllites manganésifères.* Bulletin du Groupe français des Argiles, 11(6), pp. 53-56.

Cheng, J. X., Jia, Y. K., Zheng, G., & Xie, X. S. (2002). *Laser-scanning coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy and applications to cell biology.* Biophysical journal, 83(1), pp. 502-509.

Chertkov, V. Y. (2002). *Modelling cracking stages of saturated soils as they dry and shrink.* European Journal of Soil Science, 53(1), pp. 105-118.

Corte, A., & Higashi, A. (1960). *Experimental research on desiccation cracks in soil-research Report 66.* Wilmette, Illinois : US Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment.

Coussy, O. (1991). *Mécanique des milieux poreux.* Editions Technip, Paris, France

Coussy, O. (1995). *Mechanics of porous continua.* John Wiley & Sons, Chichester, England.

Coussy, O. (2004). *Poromechanics.* John Wiley & Sons, Chichester, England.

Coussy, O., Dangla, P., Lassabatère, T., & Baroghel-Bouny, V. (2004). *The equivalent pore pressure and the swelling and shrinkage of cement-based materials.* Materials and structures, 37(1), pp.15-20.

Cui, Y. J. (1993). *Etude du comportement d'un limon compacté non saturé et de sa modélisation dans un cadre élasto-plastique.* Thèse de doctorat. Ecole Nationale des

Ponts et Chaussées, France.

Cui, Y. J., Yahia-Aissa, M., & Delage, P. (2002). *A model for the volume change behavior of heavily compacted swelling clays.* Engineering geology, 64(2-3), pp. 233-250.

Cuisinier, O., & Masroui, F. (2001). *Study of the hydromechanical behaviour of a swelling soil from low to very high suctions.* 6th Int. Workshop on Key Issues in Waste Isolation Research, Paris, France.

D :

Degarmo, E. P., Black, J. T., & Kohser, R. A. (2003). *Materials and Processes in Manufacturing.* 9th Ed., John Wiley & Sons, Chichester, England.

Delage, P., & Cui, Y. J. (2000). *L'eau dans les sols non saturés.* Techniques de l'Ingénieur. In traité Construction, C301.

Delage, P., & Cui, Y. J. (2008). *A novel filtration system for polyethylene glycol solutions used in the osmotic method of controlling suction.* Canadian Geotechnical Journal, 45(3), pp. 421-424.

Delage, P., & Lefebvre, G. (1984). *Study of the structure of a sensitive Champlain clay and of its evolution during consolidation.* Canadian Geotechnical Journal, 21(1), pp. 21-35.

Delage, P., Audiguier, M., Cui, Y. J., & Howat, M. D. (1996). *Microstructure of a compacted silt.* Canadian Geotechnical Journal, 33(1), pp. 150-158.

Delage, P., Cui, Y. J., & De Laure, E. (2001). *Récents développements de la technique osmotique de contrôle de suction.* In International Conference on soil mechanics and geotechnical engineering, pp. 575-578.

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(1-2), pp. 31-48.

Drumm, E. C., Reeves, J. S., Madgett, M. R., & Trolinger, W. D. (1997). *Subgrade resilient modulus correction for saturation effects.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123(7), pp. 663-670.

Dyer, M. R. (2005). *Further tests on the fissuring of clay fill at the Thorngumbald flood embankment.* Advanced experimental unsaturated soil mechanics EXPERUS 2005, pp. 501-504.

F :

Fang, H. Y., & Chen, W. F. (1971). *New method for determination of tensile strength of soils.* National Research Council, Washington, DC : Highway Research Board, pp. 62-68.

Fang, H. Y., & Chen, W. F. (1972). *Further study of double-punch test for tensile strength of soils.* Proc1 3rd Southeast Asian Conf1 on Soil Engineering, 19721, pp. 236-242.

Fédérale de Lausanne, Switzerland, pp. 72-91.

Fleureau, J. M., & Kheirbek-Saoud, S. (2001). *Retrait et Gonflement des sols soumis à un cycle de drainage humidification.* Colloque international Génie Civil et Construction, Université de Damas, Syrie, pp. 1-3.

Fleureau, J. M., Kheirbek-Saoud, S., Soemitro, R., & Taïbi, S. (1993). *Behavior of clayey soils on drying–wetting paths.* Canadian geotechnical journal, 30(2), pp. 287-296.

Fleureau, J. M., Verbrugge, J. C., Huergo, P. J., Correia, A. G., & Kheirbek-Saoud, S. (2002). *Aspects of the behaviour of compacted clayey soils on drying and wetting paths.* Canadian geotechnical journal, 39(6), pp. 1341-1357.

Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils.* John Wiley & Sons, New York.

Fredlund, M. D., Wilson, G. W., & Fredlund, D. G. (2002). *Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve.* Canadian Geotechnical Journal, 39(5), pp. 1103-1117.

Fripiat, J. J., & Gattineau, L. (1984). *Interactions eau-argiles/Clay-water Interactions.* Sciences Géologiques, bulletins et mémoires, 37(4), pp. 283-296.

Frydman S. (1967). *Triaxial and Tensile Strength Tests on Stabilized Soil.* Proc. 3rd Asian Reg. Conf. Soil Mech. Found. Eng. (Haifa), 1, pp. 269-271.

Fukue, M., Minato, T., Horibe, H., & Taya, N. (1999). *The micro-structures of clay given by resistivity measurements.* Engineering geology, 54(1-2), pp. 43-53.

G :

Gao, Q. F. (2018). *Micro-macro approach of dilatancy phenomenon in remoulded clays-Study of the behaviour under saturated and unsaturated conditions.* Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, Metz, 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 Pierre et Marie Curie – Paris 6, France.

Gautier, M. (2008). *Interactions entre argile ammoniée et molécules organiques dans le contexte du stockage des déchets. Cas de molécules à courtes chaînes.* Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, France.

Griffith, A. A. (1921). *The phenomena of rupture and flow in solids*. Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character, 221(582-593), pp. 163-198.

Griffith, A. A. (1924). *The theory of rupture*. First Int. Cong. Appl. Mech, pp. 55-63.

Grim, R. E. (1968). *Clay Mineralogy (2nd edition)*. McGraw-Hill, New York.

Grunberger D. (1995). *Etude expérimentale de l'évolution des microstructures et des propriétés physiques et mécaniques des argiles au cours de la compaction*. Thèse de Doctorat. Université de Montpellier II. France.

H :

Hahn, H. G. (1970). *Spannungsverteilung an Rissen in festen Körpern*. VDI-Forschungsheft, Nr. 542.

Haines, W. B. (1923). *The volume-changes associated with variations of water content in soil*. The Journal of agricultural science, 13(3), pp. 296-310.

Hammad, T. (2010). *Comportement des sédiments marins de grande profondeur : approche multiéchelle*. Thèse de doctorat. Ecole centrale de Paris, Châtenay-Malabry, France.

Hattab, M., & Fleureau, J. M. (2011). *Experimental analysis of kaolinite particle orientation during triaxial path*. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 35(8), pp. 947-968.

Hattab, M., Bouziri-Adrouche, S., & Fleureau, J. M. (2010). *Évolution de la microtexture d'une matrice kaolinique sur chemin triaxial axisymétrique*. Canadian geotechnical journal, 47(1), pp. 34-48.

Hicher, P. Y., Wahyudi, H., & Tessier, D. (1994). *Microstructural analysis of strain localisation in clay*. Computers and geotechnics, 16(3), pp. 205-222.

Hicher, P. Y., Wahyudi, H., & Tessier, D. (2000). *Microstructural analysis of inherent and induced anisotropy in clay*. Mechanics of Cohesive - frictional Materials: An International Journal on Experiments, Modelling and Computation of Materials and Structures, 5(5), pp. 341-371.

Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*. Vol. 733, Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

Horn, B. K., & Schunck, B. G. (1981). *Determining optical flow*. Artificial intelligence, 17(1-3), pp. 185-203.

I :

Ighil Ameur, L. (2016). *Étude expérimentale du phénomène de l'endommagement et de la fissuration d'une matrice poreuse.* Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, Metz, France.

Ighil Ameur, L., & Hattab, M. (2017). *Crack initiation and propagation of clays under indirect tensile strength test by bending related to the initial suction.* Advances in Laboratory Testing and Modelling of Soils and Shales, pp. 173-180. Springer, Cham.

Indarto, I. (1991). *Comportement mécanique et compactage des matériaux de barrages.* Thèse de doctorat. Ecole centrale de Paris, Châtenay-Malabry, France.

Irwin, G. R. (1957). *Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate.* ASME J. Appl. Mech., 24, pp. 361–364.

K :

Kodikara, J. K., Barbour, S. L., & Fredlund, D. G. (2000). *Desiccation cracking of soil layers.* Unsaturated soils for Asia, 90(5809), p. 139.

Kodikara, J., Barbour, S. L., & Fredlund, D. G. (1999). *Changes in clay structure and behaviour due to wetting and drying.* Proceedings 8th Australia New Zealand conference on geomechanics: consolidating knowledge p. 179. Barton, ACT : Australian Geomechanics Society.

Konrad, J. M., & Ayad, R. (1997). *Desiccation of a sensitive clay: field experimental observations.* Canadian Geotechnical Journal, 34(6), pp. 929-942.

Kouadio, K. C. (2010). *Élaboration et caractérisation de blocs d'argile stabilisée au ciment (Cimarg) : influence de l'apport de dégraissant sur les caractéristiques physiques et mécaniques des blocs.* Thèse de Doctorat des Sciences de la Terre option Géomatériaux, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire.

Krahn, J., & Fredlund, D. G. (1972). *On total, matric and osmotic suction.* Soil Science, 114(5), pp. 339-348.

L :

Lau, J. T. K. (1987). *Desiccation cracking of soils.* Master thesis. Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Canada.

Leavell, D. A., & Peters, J. F. (1987). *Uniaxial Tensile Test for Soil.* Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg Ms Geotechnical Lab.

Lee, I. K., & Ingles, O. G. (1968). *Strength and Deformation of Soils and Rocks*. Chapter 4 of Soil Mechanics Selected Topics, edited by IK Lee, pp. 195-295.

Leong, E. C., & Wijaya, M. (2015). *Universal soil shrinkage curve equation*. *Geoderma*, 237, pp. 78-87.

Li, Z. S. (2015). *Etudes des propriétés hydromécaniques des sols argileux non saturés proches de la saturation*. Thèse de doctorat. Ecole Centrale Paris, France.

Lloret, A., Villar, M. V., Sanchez, M., Gens, A., Pintado, X., & Alonso, E. E. (2003). *Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes*. *Géotechnique*, 53(1), pp. 27-40.

Longwell, C. R. (1928). *Three common types of desert mud cracks*. *American Journal of Science*, 5(86), pp. 136-145.

Low, P. F. (1961). *Physical chemistry of clay-water interaction*. *Advances in agronomy*, 13, pp. 269-327.

M :

Marcial, D., Delage, P., & Cui, Y. J. (2002). *On the high stress compression of bentonites*. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(4), pp. 812-820.

Martin, R. T. (1962). *Adsorbed water on clay: a review*. *Clays and clay minerals*, pp. 28-70.

Miller, C. J. (1988). *Field investigation of clay liner performance*. *Hazardous waste and hazardous materials*, 5(3), pp. 231-238.

Mitchell J. K. (1976). *Fundamentals of soil behavior*. John Wiley & Sons, New York.

Mitchell J. K. (1993). *Fundamentals of soil behavior (2nd edition)*. John Wiley & Sons, New York.

Mitchell, J. K. (1962). *Components of pore water pressure and their engineering significance*. *Clays and clay minerals*, Pergamon, pp. 162-184.

Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior*. Vol. 3, John Wiley & Sons, New York.

Morris, P. H., Graham, J., & Williams, D. J. (1992). *Cracking in drying soils*. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(2), pp. 263-277.

N :

Nahlawi, H., Chakrabarti, S., & Kodikara, J. (2004). *A direct tensile strength testing method for unsaturated geomaterials.* Geotechnical Testing Journal, 27(4), pp. 356-361.

Newmark, N. M. (1960). *Failure hypotheses for soils.* Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, ASCE, pp. 17-32.

P :

Pan, B. (2018). *Digital image correlation for surface deformation measurement : historical developments, recent advances and futurs goals.* Measurement Science and Technology, 29(8), p. 082001.

Pan, B., Xie, H., & Wang, Z. (2010). *Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching.* Applied optics, 49(28), pp. 5501-5509.

Péron, H. (2008). *Desiccation cracking of soils. Doctoral dissertation.* Ecole Polytechnique

Péron, H., Hueckel, T., Laloui, L., & Hu, L. (2009b). *Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils: experimental characterisation and mechanisms identification.* Canadian Geotechnical Journal, 46(10), pp. 1177-1201.

Péron, H., Laloui, L., Hueckel, T., & Hu, L. (2006). *Experimental study of desiccation of soil.* Unsaturated Soils 2006, pp. 1073-1084.

Peron, H., Laloui, L., Hueckel, T., & Hu, L. B. (2008). *Desiccation cracking of soils: modeling of stress generation and crack propagation.* Third International Workshop on Unsaturated Soils, Between Theory and Practice in Unsaturated Soil Mechanics.

Peron, H., Laloui, L., Hueckel, T., & Hu, L. B. (2009a). *Desiccation cracking of soils.* European journal of environmental and civil engineering, 13(7-8), pp. 869-888.

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 Doctorat, Université d'Orléans, France.

Poppe, L. J., Paskevich, V. F., Hathaway, J. C., & Blackwood, D. S. (2001). *A laboratory manual for X-ray powder diffraction.* US Geological Survey open-file report, 1(041), pp. 1-88.

Prost, R. (1990). *Structure et gonflement des matériaux argileux.* Matériaux argileux : Structure, propriété et application, Société Française de Minéralogie et de Cristallographie, p. 88.

R :

Rayhani, M. H., Yanful, E. K., & Fakher, A. (2007). *Desiccation-induced cracking and its effect on the hydraulic conductivity of clayey soils from Iran.* Canadian geotechnical journal, 44(3), pp. 276-283.

Richard, L. A. (1931). *Capillary conduction of liquids through porous mediums.* physics, 1(5), pp. 318-333.

Richards, L. A., & Gardner, W. (1936). *Tensiometers for Measuring the Capillary Tension of Soil Water 1.* Agronomy Journal, 28(5), pp. 352-358.

Rodríguez-Cruz, M. S., Sánchez-Martín, M. J., Andrades, M. S., & Sánchez-Camazano, M. (2007). *Modification of clay barriers with a cationic surfactant to improve the retention of pesticides in soils.* Journal of hazardous materials, 139(2), pp. 363-372.

S :

Senior, R. B. (1981). *Tensile strength, tension cracks, and stability of slopes.* Soils and foundations, 21(2), pp. 1-17.

Sherard, J.L. (1973). *Embankment Dam Cracking.* Embankment-dam engineering (Casagrande Volume), John Wiley & Sons, New York, pp. 271-353.

Sparks, D. L. (2003). *Environmental soil chemistry : An overview.* Environmental soil chemistry, 2, pp. 1-42.

Stirk, G. B. (1954). *Some aspects of soil shrinkage and the effect of cracking upon water entry into the soil.* Australian Journal of Agricultural Research, 5(2), pp. 279-296.

Sutton, M. A., Mingqi, C., 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(3), pp. 143-150.

Sutton, M. A., Wolters, W. J., Peters, W. H., Ranson, W. F., & McNeill, S. R. (1983). *Determination of displacements using an improved digital correlation method.* Image and vision computing, 1(3), pp. 133-139.

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(3), pp. 203-228.

Tang, C. S., Cui, Y. J., Shi, B., Tang, A. M., & Liu, C. (2011). *Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting–drying cycles.* Geoderma, 166(1), pp. 111-118.

Tang, C. S., Cui, Y. J., Tang, A. M., & Shi, B. (2010). *Experiment evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of clayey soils.* Engineering Geology, 114(3-4), pp. 261-266.

Tang, C. S., Cui, Y. J., Tang, A. M., & Shi, B. (2011). *Volumetric shrinkage characteristics of soil during drying.* Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 33(8), pp.1271-1279.

Tang, C. S., Pei, X. J., Wang, D. Y., Shi, B., & Li, J. (2015). *Tensile strength of compacted clayey soil.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 141(4), 04014122.

Tang, C. S., Shi, B., & Wang, B. J. (2008). *Factors affecting analysis of soil microstructure using SEM.* Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 30(4), pp. 560-565.

Tang, G. X., & Graham, J. (2000). *A method for testing tensile strength in unsaturated soils.* Geotechnical Testing Journal, 23(3), pp. 377-382.

Tempany, H. A. (1917). *The shrinkage of soils.* The Journal of Agricultural Science, 8(3), pp. 312-330.

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice.* John Wiley & Sons, New York.

Tessier, D. (1975). *Recherches expérimentales sur l'organisation des particules dans les argiles.* Thèse d'ingénieur, Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, France.

Tessier, D. (1984). *Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation.* Thèse de Doctorat, Université Paris Diderot, France.

V :

Van Damme, H. (2002). *L'eau et sa représentation.* Mécanique des sols non saturés, Lavoisier, Paris, pp. 23-68.

Van Genuchten, M. T. (1980). *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.* Soil science society of America journal, 44(5), pp. 892-898.

Van Olphen, H. (1964). *An introduction to clay colloid chemistry.* Soil Science, 97(4), p. 290.

Van Olphen, H. (1977). *An Introduction to Clay Colloid Chemistry (2nd edition)*. John Wiley & Sons, New York.

Vicol, T. (1990). *Comportement hydraulique et mécanique d'un sol fin non saturé. Application à la modélisation*. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.

W :

Wahib, A. (2013). *Influence des cycles hydriques de la dessiccation et de l'humidification sur le comportement hydromécanique des géomatériaux non saturés*. Thèse de doctorat. INSA de Lyon, France.

Wang, J. P., Gallo, E., François, B., Gabrieli, F., & Lambert, P. (2017). *Capillary force and rupture of funicular liquid bridges between three spherical bodies*. Powder Technology, 305, pp. 89-98.

Wei, X. (2014). *Micro-Macro study of the cracks in clays related to desiccation*. Thèse de doctorat. Ecole Centrale Paris, France.

Wei, X., Bicalho, K. V., El Hajjar, A., Taïbi, S., Hattab, M., & Fleureau, J. M. (2020b). *Experimental techniques for the study of the cracking mechanisms in drying clays*. Geotechnical Testing Journal, 44(2), pp. 323-338.

Wei, X., Gao, C., & Liu, K. (2020a). *A review of cracking behavior and mechanism in clayey soils related to desiccation*. Advances in Civil Engineering, 2020.

Wei, X., Hattab, M., Bompard, P., & Fleureau, J. M. (2016). *Highlighting some mechanisms of crack formation and propagation in clays on drying path*. Géotechnique, 66(4), pp. 287-300.

Wheeler, S. J., Näätänen, A., Karstunen, M., & Lojander, M. (2003). *An anisotropic elastoplastic model for soft clays*. Canadian Geotechnical Journal, 40(2), pp. 403-418.

Willden, R., & Mabey, D. R. (1961). *Giant desiccation fissures on the Black Rock and Smoke Creek deserts, Nevada*. Science, 133(3461), pp. 1359-1360.

Williams, J., & Shaykewich, C. F. (1969). *An evaluation of polyethylene glycol (PEG) 6000 and PEG 20,000 in the osmotic control of soil water matric potential*. Canadian Journal of Soil Science, 49(3), pp. 397-401.

Williams, P. J. (1982). *The surface of the earth: an introduction to geotechnical science*. Vol. 10, Addison-Wesley Longman Limited, New York.

Y :

Yang, J., & Bhattacharya, K. (2019). *Augmented Lagrangian digital image correlation*. *Experimental Mechanics*, 59(2), pp. 187-205.

Z :

Zhao, D. (2017). *Study on the creep behavior of clay under complex triaxial loading in relation to the microstructure*. Thèse de doctorat. Université de Lorraine, Metz, France.

Zienkiewicz O.C. (1977). *The Finite Element Method*. 3rd Ed., McGraw-Hill Co., pp. 664-676.

Zur, B. (1966). *Osmotic control of the matric soil-water potential: I. Soil-water system*. *Soil Science*, 102(6), pp. 394-398.