

Université Mohamed khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et
d'Hydraulique Référence :...../ 2020



جامعة محمد خيضر - بiskra
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
2020 المرجع:...../

Mémoire de Master

Filière : Génie civil

Option : Géotechnique

Thème

**L'étude de la propagation des fissures d'une argile sous
dessiccation**

Etudiante :
M^{elle}. Roufia Belhend

Encadrants :
Dr. Sadok Feia
M^{elle}. Afaf Zeroual

Année universitaire : 2019 - 2020



Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Aux deux âmes

Auxquelles je voulais assister et voir leur joie pour mon mémoire et ma diplômée de

Mon frère **Walid** et du professeur **Belhamra**, que Dieu ait pitié d'eux

Mes parents et mon frère :

Merci pour vos sacrifices au long de ces années...

Papa : Mon premier idole merci pour l'amour et la sagesse que tu procure à notre famille, tu es la lumière

qui me guide aux moments les plus obscures de ma vie je t'aime et je te respecte énormément.

Maman : Ma raison d'exister... la meilleure chose qui m'est arrivé, si je suis en vie, je respire, Je ressens, c'est grâce à toi ; si j'ai l'espoir et l'envie de vivre c'est parce que tu existeras dans mon petit monde...

Merci d'être maman.

Je trouverais jamais les mots qui expriment ma reconnaissance pour vos soutiens moraux et matériels.

Mes grandes parentes

Qui me comble de ses prières et ne cesse plus de m'informer à quel point elle est fière de moi.

Mes deux tantes et mes oncles

Vous faites notre fierté, qu'Allah vous protège ainsi que vos chères familles.

A chaque professeur

Qui a cultivé en moi l'amour du savoir et de la diligence, m'a encouragé, m'a soutenu.

Mes Chères

Merci pour vos encouragements et vos conseils je vous respects tous...

Mes amis

Merci de m'avoir encouragé me soutenir, par un mot, un message, un appelle.

Je vous dédie ce travail en témoignage de mon grand respect et ma profonde estime, que Dieu vous protège...





Remerciements

J'ai l'honneur de m'adresser à tous ceux qui m'ont aidé afin de réaliser ce travail
Je présente mes vifs remerciements, et mon très fort sentiment de gratitude et de reconnaissance à **Dr. Feia Sadok** mon encadrant. Je lui remercie d'avoir accepté
de diriger mon projet de fin d'étude.

J'ai l'honneur d'adresser mes sincères remerciements aux membres du jury qui ont
accepté de juger mon travail.

Je remercie tout le corps professionnel de la filière

« Faculté des sciences et de la technologie, Département de génie civil ».

Le présent travail n'aurait pu être réalisé sans l'aide précieux et inoubliable
de **Melle. Afaf Zeroual**, **Dr. Abdelali Dadda**, **M. Salim Abdelaziz**, **Dr. Foudi l Bouhdjar**,
et bien sûr **Mme Linda Bouassida**, **Mme. Samia Shabee**, **M. Bouziane Tewfik**,
M. Mahdi Bentaleb.

Pour leur confiance en mes capacités, les conseils et les encouragements
à mon égard resteront à jamais gravés dans ma mémoire.

Merci beaucoup.

Résumé

Notre travail a pour objectif une étude géotechnique des argiles de la région de Biskra exactement à Guedila. Ces argiles peuvent avoir une importance économique, ce qui explique leur exploitation comme une matière première pour les briqueteries.

Cette étude porte sur la propagation des fissures d'une argile sous dessiccation qui consiste à des prélèvements des échantillons qui seront soumis à des essais au séchage libre.

Dans le cadre de ce travail un dispositif expérimental a été développé. Les essais réalisés sur ce dispositif permettent d'étudier la propagation des fissures d'une éprouvette d'argile sous dessiccation. Le suivi des fissurations est réalisé à l'aide d'une caméra installée sur le dispositif. A l'aide d'un logiciel de traitement d'images nous pouvons caractériser les fissures développées au cours de séchage et par la suite élaborer une loi empirique qui gère la cinétique de la propagation de ces fissures.

Mots Clés: Argile ; fissuration; propagation ; dessiccation; séchage libre ; coloration d'images ; retrait.

Abstract

Our work aims at a geotechnical study of the clays of the Biskra region exactly in Guedila. These clays can be of economic importance, which explains their exploitation as a raw material for brickyards.

This study focuses on the propagation of cracks in a clay under drying, which consists of taking samples which will be subjected to free drying tests. As part of this work, an experimental device has been developed. The tests carried out on this device make it possible to study the propagation of cracks in a clay test piece under drying. Cracking monitoring is carried out using a camera installed on the device. Using image processing software, we can characterize the cracks developed during drying and subsequently develop an empirical law that manages the kinetics of the propagation of these cracks.

Keywords: clay; cracking; propagation; desiccation; free drying; images coloration; shrinkage.

المخلص:

يهدف عملنا إلى دراسة جيوتقنية لطين منطقة بسكرة بالضبط في جديلة. يمكن أن تكون هذه الطين ذات أهمية اقتصادية ، والتي يشرح استغلالها كمادة خام لصناعة الطوب.

تركز هذه الدراسة على انتشار التشققات في الطين تحت التجفيف ، والتي تكون بأخذ عينات ستخضع لاختبارات التجفيف الحر.

كجزء من هذا العمل ، تم تطوير جهاز تجريبي. الاختبارات التي أجريت على هذا الجهاز تجعل من الممكن دراسة انتشار الشقوق في قطعة اختبار الطين تحت التجفيف. تتم مراقبة التشقق باستخدام كاميرا مثبتة على الجهاز. باستخدام برنامج معالجة الصور ، يمكننا تمييز التشققات التي تم تطويرها أثناء التجفيف ومن ثم تطوير قانون تجريبي يدير حركية انتشار هذه التشققات.

الكلمات الرئيسية: الطين؛ تشقق؛ الانتشار؛ تجفيف؛ تجفيف حر؛ معالجة الصور؛ الانكماش.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
1 INTRODUCTION	3
2 ARGILE.....	3
2.1 DEFINITION D'UNE ARGILE.....	3
2.2 MINERAUX ARGILEUX	4
2.2.1 <i>Couche tétraédrique.....</i>	<i>5</i>
2.2.2 <i>Couche octaédrique (d'aluminium ou éventuellement de magnésium).....</i>	<i>6</i>
2.3 CLASSIFICATION DES MINERAUX ARGILEUX:	7
2.3.1 <i>Classification selon l'AIEPA (Association Internationale Pour l'Etude des Argiles)</i>	<i>7</i>
2.3.2 <i>Classification selon la couleur</i>	<i>8</i>
2.4 TYPES D'ARGILES	9
2.4.1 <i>Kaolinites.....</i>	<i>9</i>
2.4.2 <i>Smectites.....</i>	<i>10</i>
2.4.3 <i>Llites</i>	<i>11</i>
2.4.4 <i>Chlorite.....</i>	<i>11</i>
3 COMPORTEMENT HYDRIQUE DE SOL ARGILEUX.....	12
3.1 RETRAIT GONFLEMENT.....	12
3.1.1 <i>Phénomène du retrait des sols</i>	<i>13</i>
3.1.2 <i>Phénomène de gonflement</i>	<i>14</i>
4 FISSURATION.....	16
4.1 CLASSIFICATION DES FISSURES	17
4.1.1 <i>Classification selon Frookes et Denness, 1969</i>	<i>17</i>
4.1.2 <i>Classification selon Fang, 1997</i>	<i>17</i>
4.2 FISSURATION DUE A LA DESSICCATION.....	18
4.2.1 <i>Cause des fissures dues à la dessiccation</i>	<i>20</i>
4.3 MECANISME DE FISSURATION (ETUDES EXPERIMENTALES ANTERIEURES)	22
4.3.1 <i>Mode d'ouverture des fissures</i>	<i>22</i>
4.3.2 <i>Initiation des fissures</i>	<i>23</i>
4.3.3 <i>Structure et propagation des fissures</i>	<i>25</i>
4.4 PARAMETRES INFLUENÇANT SUR LA FISSURATION : OBSERVATIONS EXPERIMENTALES	28
5 MANIFESTATION DES DESORDRES.....	29
6 RENFORCEMENT DES SOLS ARGILEUX	32
6.1 TRAITEMENT DU SOL PAR L'INJECTION DE LA RESINE.....	33
6.2 RENFORCEMENT DES SOLS ARGILEUX PAR LES FIBRES.....	34
6.2.1 <i>Méthodes du renforcés les sols par fibres.....</i>	<i>36</i>
7 CONCLUSION.....	41
CHAPITRE II : ETUDE EXPERIMENTALE DE LA FISSURATION.....	42
1 INTRODUCTION	42
2 PRELEVEMENT DU SOL	42
3 ESSAIS D'IDENTIFICATION	43
3.1 PROCEDURE EXPERIMENTALES.....	43
3.1.1 <i>Analyse granulométrique par tamisage et sédimentation.....</i>	<i>43</i>

3.1.2	<i>Limite d'Atterberg (Selon NF P 94-051 MARS 1993.)</i>	47
A.	INTERPRETATION DES RESULTATS	50
1.1.1	<i>Valeurs au bleu de méthylène Selon NF P 94-068 Octobre 1998</i>	50
4	PROCOLE EXPERIMENTAL	51
4.1	DISPOSITIF EXPERIMENTAL	51
4.1.1	<i>Rôle de chaque outil/appareillage utilisé</i>	53
4.2	ANALYSE LES FISSURES AVEC LOGICIEL VIC-2D	53
4.2.1	<i>Avantage et convenions de logiciel</i>	54
5	PREPARATIONS DE L'ECHANTILLON	55
5.1	PREPARATION D'ECHANTILLON	55
5.2	PREPARATION D'ECHANTILLON POUR COLORATION D'IMAGE	55
6	CONCLUSION	56
CHAPITRE III : RESULTAT PRELIMINAIRE ET INTERPRETATION		57
1	INTRODUCTION	57
2	VERIFICATION LES PARAMETRES D'INFLUENCE	57
2.1	TEMPERATURE ET L'HUMIDITE	57
3	RESULTAT PRELIMINAIRE DU L'ESSAI DE FISSURATION PAR DESSICCATION	58
3.1	EFFET DU SECHAGE SUR LA MASSE D'ECHANTILLON	58
4	ANALYSE D'IMAGE PAR VIC2D	59
5	CONCLUSION	63
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES		64
Références bibliographique		66

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Recherche bibliographique

<i>Figure I. 1. Argile (CRSTRA, 2020).</i>	4
Figure I. 2. Structure en feuillets des argiles observées microscope électronique à balayage. (Source : Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)).	5
Figure I. 3. Représentation Schématisation d'un feuillet, couche (Hakkoum, 2010).	5
Figure I. 5. (b) octaédriques (Cuisinier, 2002).	6
Figure I. 4. (a) Couches tétraédriques (Cuisinier, 2002).	6
Figure I. 6. Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile	7
Figure I. 7. Classification d'argile selon la couleur (argile-verte.info, 2020).	9
Figure I. 8. (A) Structure de la Kaolinite (El Hachmi, 2013), (B) Photo SEM de kaolinite (Wei et al., 2013; Wei, 2014).	10
<i>Figure I. 9. (A) Structure d'une smectite (Pedro, 1994), (B) Photo SEM de Montmorillonite (Wei et al., 2013; Wei, 2014).</i>	10
Figure I. 11. (A) Structure de chlorite (El Hachmi, 2013) ,(B) Photo micrographie électronique de chlorite (Morel, 1996).	11
Figure I. 10. (A) Structure de l'illite (El Hachmi, 2013), (B) Photomicrographie électronique de l'argile Illite (Bajare, 2014).	11
Figure I. 12. Schéma de principe du phénomène de retrait-gonflement du sol dans la zone active (http://geoscape.nrcan.gc.ca/sask/cracks_f.php).	12
Figure I. 13. Courbe de retrait des sols argileux (Nowamooz, 2007).	14
<i>Figure I. 14. Mécanismes de gonflement des argiles par hydratation.</i>	15
<i>Figure I. 15. Fissures apparaissent dans la maison en raison du sol argileux (Bodin et al., 2015, SEC 2015).</i>	16
Figure I. 16. Dessiccation des sols argileux en période sèche (Source : Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)).	18
Figure I. 17. Quelques paramètres évolutifs de la fissure	19
Figure I. 18. Effets de la succion sur les grains du sol (Ghanem, 2011).	21
<i>Figure I. 19. Schéma avec dispositif pour mesurer directement la résistance à la traction d'un sol (Wei, 2014 ; Avila, 2004).</i>	22
Figure I. 20. Trois modes de propagation de la fissure (Nguyen ,2015).	23
Figure I. 21. Dessin schématique du processus d'initiation des fissures du sol. (a) Sol initial entièrement saturé; (b) le ménisque d'interface eau-air s'est développé entre les particules du sol; (c) succion capillaire entre les particules de sol; (d) contrainte de traction développée dans la couche supérieure; et (e) amorce d'une fissure de surface (Tang et al., 2011).	24
<i>Figure I. 22. Développement des fissures d'une bande de l'argile Werribe (Nahlawi et Kodikara, 2006).</i>	26
Figure I. 23. Evolution de la géométrie des fissures sur la surface de l'échantillon soumis à la dessiccation (Tang et al., 2011).	26
Figure I. 25. La formation progressive des fissures lors du séchage (Barnier ,2015) (Les fissures ont commencé au centre d'échantillon).	27
Figure I. 24. Fissure nucléée au fond de l'échantillon et se propageant vers le haut (Wang et al., 2018).	27

LISTE DES FIGURES

Figure I. 26. Mécanisme d'apparition des fissures (A) mode de déformation provoqué par le tassement d'un mur de façade, (B) mode de déformation provoqué par un retrait périphérique du sol sous la maison, (C) mode de	30
Figure I. 27. Fissuration dans les murs (Le Centre d'Enseignement.....	30
Figure I. 28. Des fissures sont apparues sur la façade de l'immeuble de la rue Paul-Cézanne (Thibaut.C, 2019).	31
Figure I. 29. De longues fissures jonchent le sol menant au parking (SNCF, 2019).	31
Figure I. 30. Fissuration sur les murs site de Sidi-Aissa/M'sila.....	31
Figure I. 31. Dégradation d'une dalle béton par des racines d'arbuste ayant colonisé une fissure (CEIL de l'université de Biskra, Chetma, 2020).	31
Figure I. 33. Fissurations excessive sur les parois d'une cage d'escaliers (Bourabah,.....	32
Figure I. 32. Fissures diagonales	32
Figure I. 34. Mode opératoire de la technique de l'injection de la résine	34
Figure I. 35. Photo les fissures entre la phase avant injection et après	34
Figure I. 36. Schéma montrant les types de fibres utilisées pour renforcer le sol et son rôle.	35
Figure I. 37. Classification des fibres selon leur origine (guz ,2011).	35
Figure I. 38. Schémas présenté les deux types de renforcement par fibre	36
Figure I. 39. Schéma pour Croquis du processus de préparation du moule et des échantillons (ODFS) (Tang et al., 2010).	36
Figure I. 40. Protection d'un réservoir de gaz par un massif de sable renforcé par.....	37
Figure I. 41. Schémas de fissures finales typiques des échantillons de sol avec différents contenus et longueurs de fibres (Tang et al., 2012).	38
Figure I. 42. L'effet de pontage des fibres à travers l'ouverture.....	40
Figure II. 1. Extrait de la zone de prélèvement de l'argile du Biskra à Guedila (À partir de GoogleEarth).....	42
Figure II. 2. Schéma d'analyse granulométrique par tamisage et sédimentation. .	43
Figure II. 3. Photos montrant l'essai de tamisage.	44
Figure II. 4. Préparation du l'échantillon pour l'essai sédimentométrique.	44
Figure II. 5. Photos montrant le mode opératoire de l'essai de sédimentométrique.	45
Figure II. 6. Courbe d'analyse granulométrique de l'échantillon (soil test).	46
Figure II. 7. Exécution de l'essai de la limite de liquidité.	47
Figure II. 8. La mesure des limites de plasticité des différents échantillons.....	48
Figure II. 9. Emplacement de prélèvement d'après le diagramme de plasticité. ...	49
Figure II. 11. Ordres de grandeur (Type de sol en fonction de la valeur «VBS ») (Léreau.J., 2005 : INSA-Institut National Des Sciences Appliqués).	50
Figure II. 10. Application des taches sur papier filtre (Réalisation de l'essai au Bleu de Méthylène).....	50

LISTE DES FIGURES

Figure II. 12. Schéma 3D pour dispositif expérimental.....	52
Figure II. 14. Photos d'une balance électrique et un thermo hygromètre.....	52
Figure II. 13. Photos la caméra et les lampes.....	52
Figure II. 15. Photos de la boîte.....	53
Figure II. 16. L'interface d'utilisateur de logiciel VIC-2D.....	54
Figure II. 17. Préparation d'échantillon.....	55
Figure II. 18. Préparation d'échantillon pour coloration d'image, (A) coupelle vide,(B) L'échantillon est placé dans la coupelle, (C) Pulvé à surface de l'échantillon peinture blanche et points noirs par la peinture noire.....	56
Figure II. 19. Images de l'éprouvette à différents temps obtenus par l'appareil photo (Échantillon au cours du séchage libre pendant 3 jours).....	56

Chapitre III : Résultat préliminaire et interprétation

Figure III. 1. Courbe présenté l'effet de la température et l'humidité en fonction	57
Figure III. 2. La variation de la masse(g) d'un échantillon en fonction du temps (min).....	58
Figure III. 3. L'interface d'utilisateur de logiciel VIC-2D.....	59
Figure III. 4. Image de référence par VIC 2D.....	60
Figure III. 5. Sélectionnez la zone testée.....	60
Figure III. 6. Créer un point de départ.....	61
Figure III. 7. Suggérer la taille du sous-ensemble (pixel).....	61
Figure III. 8. L'analyse d'image d'échantillon par coloration.....	62
Figure III. 9. Aucune fissure n'apparaît à cause de la peinture blanche.....	62

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Recherche bibliographique

Tableau I. 1: Classification des phyllosilicates (D'après Caillère et Hénin, 1959, complété par Mitchell, 1993).....	8
Tableau I. 2: Classification de la taille des fissures (Frookes et Dennes, 1969). ...	17
Tableau I. 3: Classification de l'espacement des fissures (Frookes et Dennes, ...	17
Tableau I. 4: les paramètres d'influence selon des travaux expérimentaux (Vo, 2017).....	28

Chapitre II : Etude expérimentale de la fissuration

Tableau II. 1. Les résultats de l'analyse de granulométrie par tamisage des échantillons.....	44
Tableau II. 2 : Résultats de l'analyse de granulométrie par sédimentation des échantillons.....	45
Tableau II. 3: Présentation des résultats obtenus de limite de liquidité d'argile... 	47
Tableau II. 4 : Les résultats des poids de l'essai de limite de plasticité.	48
Tableau II. 5: Conclusion sue prélèvement.	49

LISTE DES ABRÉVIATIONS

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AIPEA : Association Internationale pour l'Etude des Argiles.

BRGM : Bureau de Recherche Géologiques et Minières.

CEIL : Centre d'Enseignement Intensif des Langues.

CRSTRA : Centre de Recherche sur l'Information Scientifique et Technique.

DIC : Digital Image Corrélation.

INSER : Éditeur de Solutions de Gestion des Ressources Humaines.

IP : Indice de plasticité.

KELLER : Entrepreneur géotechnique, fournissant des solutions géotechniques techniquement avancées à l'industrie de la construction.

MDS : Mécanique de sol.

NF P : Norme Française des bâtiments.

ODFS: Oriented description fiber soil(Anglais)

RDFS: Randomly description fiber soil(Anglais)

SNCF : Société nationale des chemins de fer français.

VBS : Valeur au bleu de méthylène.

V : Volume de bleu de méthylène utilisé.

WL : Limite de liquidité.

WP : Limite de plasticité.

” : Seconde.

' : Minute.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'argile est une matière première utilisée depuis l'antiquité. L'intérêt accordé ces dernières années à l'étude des argiles par de nombreux laboratoires dans le monde se justifie par leur abondance dans la nature (**Bouziane, 2007**), l'étude géotechnique d'un sol argileux comporte une identification de la minéralogie et une détermination des caractéristiques mécaniques, hydriques et hydromécaniques du sol.

Les argiles expansives gonflent en présence de l'eau et rétrécissent en son absence à période de séchage, produisant ainsi des fissures de dessiccation, les fissures affectent la compressibilité du sol, sa résistance et la vitesse à laquelle l'eau peut rentrer, dans le domaine du génie civil, l'effet de la sécheresse se traduit notamment par l'apparition de désordres au niveau des constructions reposant sur des sols argileux, ainsi, de nombreuses constructions géotechniques sont affectées par la présence de fissures dans une masse de sol.

Avec le réchauffement climatique planétaire, la sécheresse est devenue un phénomène de plus en plus préoccupant qui concerne de nombreux pays dans le monde surtout son résultat de la fissuration due à dessiccation ; lors du séchage, l'évaporation de l'eau du sol entraîne un volume rétrécissement et mouvement différentiel et endommage les fondations, les remblais routiers, les bâtiments et autres infrastructures. Une attention particulière a été accordée au cours des dernières décennies sol, où de nombreuses études ont été menées sur ce phénomène (**Boivin et al., 2004; Groenevelt et Grant, 2004; Osinubi et Nwaiwu, 2008; Stirk, 1954; Tay et coll., 2001; Wei, 2014; Wei et al., 2016 ; Cordero et al., 2016**).

L'objectif de ce mémoire de master est la compréhension de mécanismes de la fissuration dans sols argileux de la wilaya de Biskra à partir la présentation des résultats expérimentaux d'essais a été réalisée dans un environnement de laboratoire contrôlé sur des échantillons de boues d'argile séchées dans conditions initiales, avec l'application de la technique de traitement d'images pour mieux identifier comment les fissures se forment et se propagent au cours d'un séchage libre.

Introduction générale

Le manuscrit de ce mémoire se comportant trois chapitres :

CHAPITRE I : le premier chapitre consacré à la présentation d'étude bibliographique sur les argiles, des notions essentielles sur les minéraux argileux où nous décrivons les propriétés structurales, morphologique et les principes familles d'argile, et nous donnons des généralités sur la fissuration de l'argile à cause de la dessiccation.

CHAPITRE II : le deuxième chapitre est consacré à l'étude expérimentale du comportement du sol fissuré avec à la simulation d'un essai de séchage réalisé au laboratoire sur un sol argileux et la caractérisation du sol utilisé à partir des essais géotechniques et la corrélation d'Images. CHAPITRE III : le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats d'essais de la fissuration à partir traitement d'images et discussions.

Ce mémoire se termine par des conclusions générales qui récapitulent les résultats principaux de ce travail.

CHPITREI:RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

1 Introduction

Les sols argileux sont reconnus comme des sols sensibles aux variations hydriques subies au cours des cycles saisonniers, pouvant engendrer des désordres importants sur les constructions à travers le monde. En Algérie, plusieurs gisements d'argile sont exploités industriellement, à l'ouest, les bentonites de Maghnia et de Mostaganem, à l'est, les kaolins de Tamazert, à sud-est d'Alger la wilaya de Biskra au contient les sols au niveau des plaines sont argileux- sodiques (plaine d'Eloutaya) ou halomorphes (Ain Naga et M'ziraa) (Khachai ,2001 ;A.N.A.T ,2003) ; les régions Est de Biskra, sont définies par les sols alluvionnaires et les sols argileux fertiles (Bakroune,2012).

Les argiles se caractérisent par une capacité élevée d'adsorption, d'échange ionique et de gonflement ainsi que par des propriétés rhéologiques particulières. Elles sont employées dans différents domaines ; y compris celles des céramiques, du forage pétrolier, du secteur minier, des peintures, des revêtements, des absorbants, du métal et du papier; les argiles sont difficiles à caractériser dû à leur petite taille, leur composition structurale variable et leur cinétique de formation et d'altération relativement lente. Donc ce premier chapitre a pour but de présenter et de définir les argiles et leurs fissurations avec quelque méthode de renforcements.

2 Argile

2.1 Définition d'une Argile

Le mot argile a deux définitions dans le jargon géologique. La première définit Le terme « Argile » Introduit tout d'abord par les géologues et les pédologues (les spécialistes de la science des sols) pour caractériser les particules élémentaires dont le diamètre des grains est inférieur à 2 micromètre ($<2\mu\text{m}$) il recouvre toutes les petites particules formées par les processus d'érosion ou d'altération des roches et ce, quelle que soit sa nature minéralogique. Pour la deuxième, c'est un minéral (plus exactement une famille de minéraux) de la famille des silicates plus précisément des phyllosilicates (silicates en feuillets) (en général plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée, capacité

Chapitre I: Recherche bibliographique

plastique, ou bien une structure fibreuse, capacité d'absorption). Il est généralement issu de l'altération par l'eau des autres silicates (provenant en général de l'altération de silicates à charpente tridimensionnelle, tels que les feldspaths). C'est pour cette raison qu'on les trouve systématiquement dans lessols et les formations superficielles, on les trouve aussi très fréquemment dans les roches sédimentaires naturelles à base de silicates ou d'aluminosilicates hydratés de structure lamellaire. Mélangée à un autre minéral comme la calcite, elle formera la marne. Si l'argile est seule présente on désignera la roche sous le nom d'argilite. Souvent les deux définitions se rejoignent. (Berrah, 2017).



Figure I. 1. Argile (CRSTRA, 2020).

2.2 Minéraux argileux

Les minéraux argileux constituent un groupe minéralogique complexe, ce sont des phyllosilicates ou des silicates en feuillets de taille inférieure à $2\mu\text{m}$; Leur squelette contient des entités Si O_4 (silicates) et leur structure est lamellaire (« phyllos » en grec signifie feuillets) (Figure I. 2). Les feuillets sont eux-mêmes constitués d'assemblages de couches de tétraèdres Si O_4 (T) et de couches d'octaèdres (O) et un espace inter foliaire qui contient souvent des cations (Figure I.3). Les couches sont à leur tour formées des couches de base par empilement d'ions ou d'hydroxydes en disposition hexagonale ou compacte.

Chapitre I: Recherche bibliographique

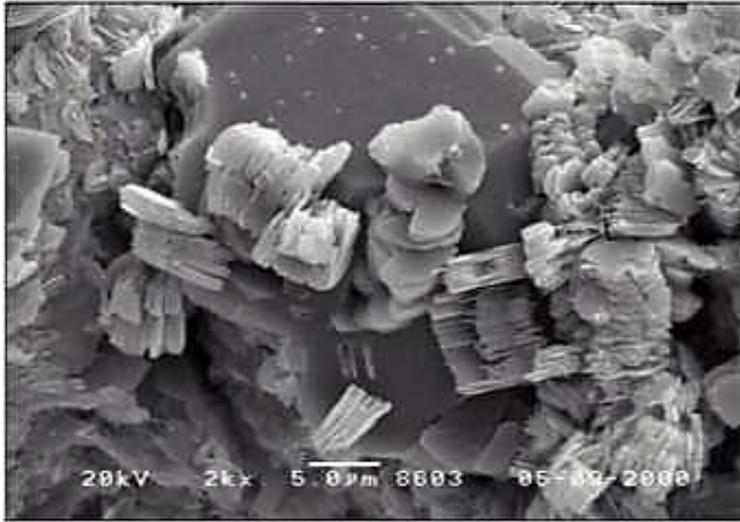


Figure I. 2. Structure en feuillets des argiles observées microscope électronique à balayage. (Source : Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)).

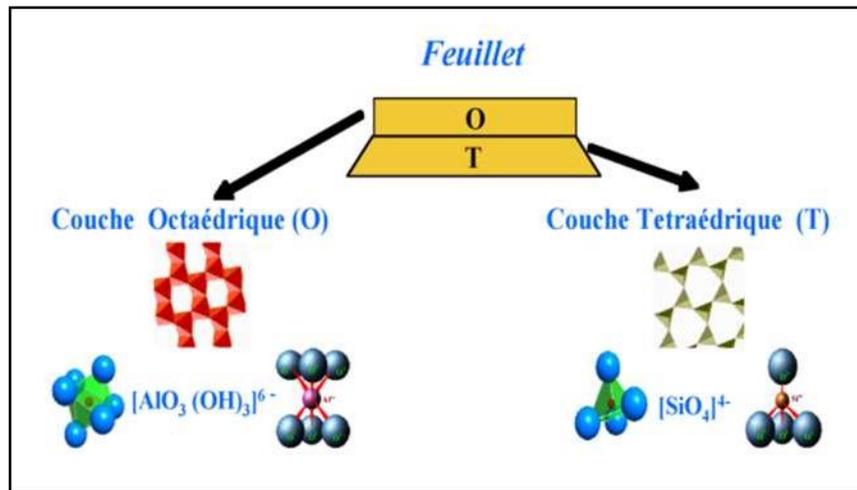


Figure I. 3. Représentation Schématisation d'un feuillet, couche (Hakkoum, 2010).

2.2.1 Couche tétraédrique

Dans l'élément tétraédrique, l'ion central est la silice (Si^{+4}) qui est entouré par 4 ions d'oxygène (O^{-2}) (Figure I.4). Les tétraèdres sont liés ensemble par leurs bases en partageant un ion d'oxygène entre deux tétraèdres pour former une couche tétraédrique. La formule générale de cet ensemble est $n [(\text{Si}_2\text{O}_5)^{-2}]$ (Mekki, 2006, P.6-7-10).

Chapitre I: Recherche bibliographique

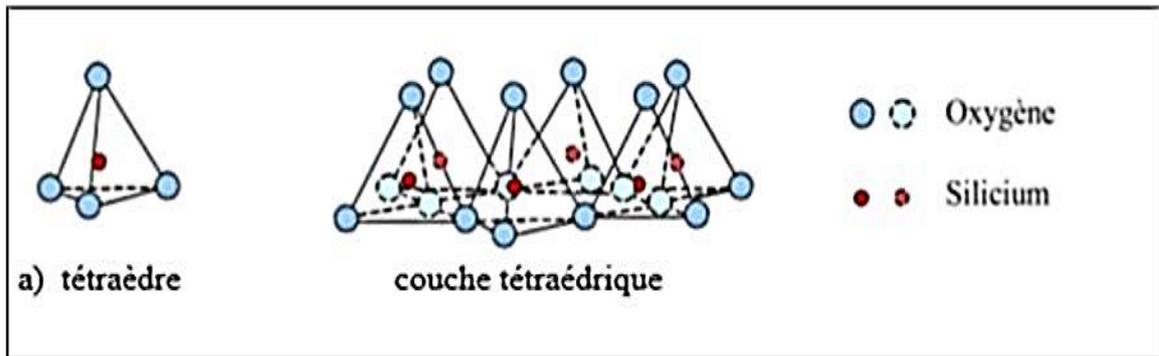


Figure I. 4. (a) Couches tétraédriques (Cuisinier, 2002).

2.2.2 Couche octaédrique (d'aluminium ou éventuellement de magnésium)

Dans l'élément octaédrique, l'ion central est soit un ion d'aluminium (Al^{+3}), soit un ion de magnésium (Mg^{+3}). Ces derniers sont entourés par six ions d'hydroxyde (OH^-) (Figure I.5). Les unités octaédriques sont liées ensemble de telle sorte que chaque groupement fonctionnel (OH^-) est partagé entre 3 unités octaédriques. La formule générale de ce groupement est $n [\text{Al}_2(\text{OH})_6]$ ou $n[\text{Mg}_3(\text{OH})_6]$ (Mekki. P .6-7-10 ,2006).

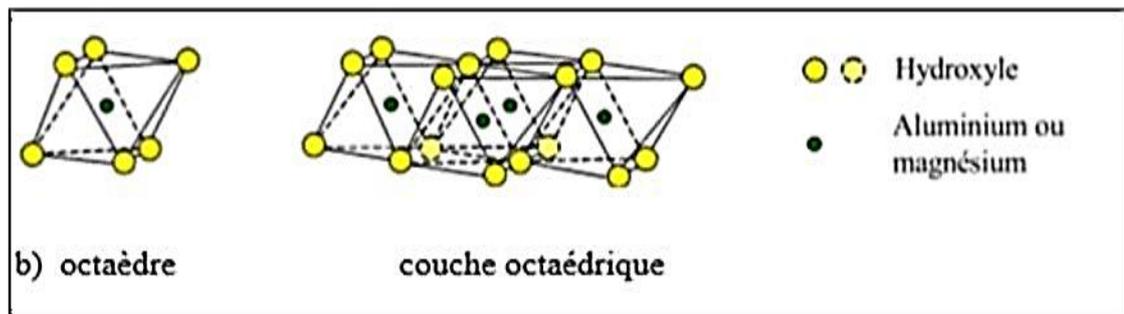


Figure I. 5. (b) octaédriques (Cuisinier, 2002).

La représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile est donnée par l'organigramme suivant (Figure I.6) :

Chapitre I: Recherche bibliographique

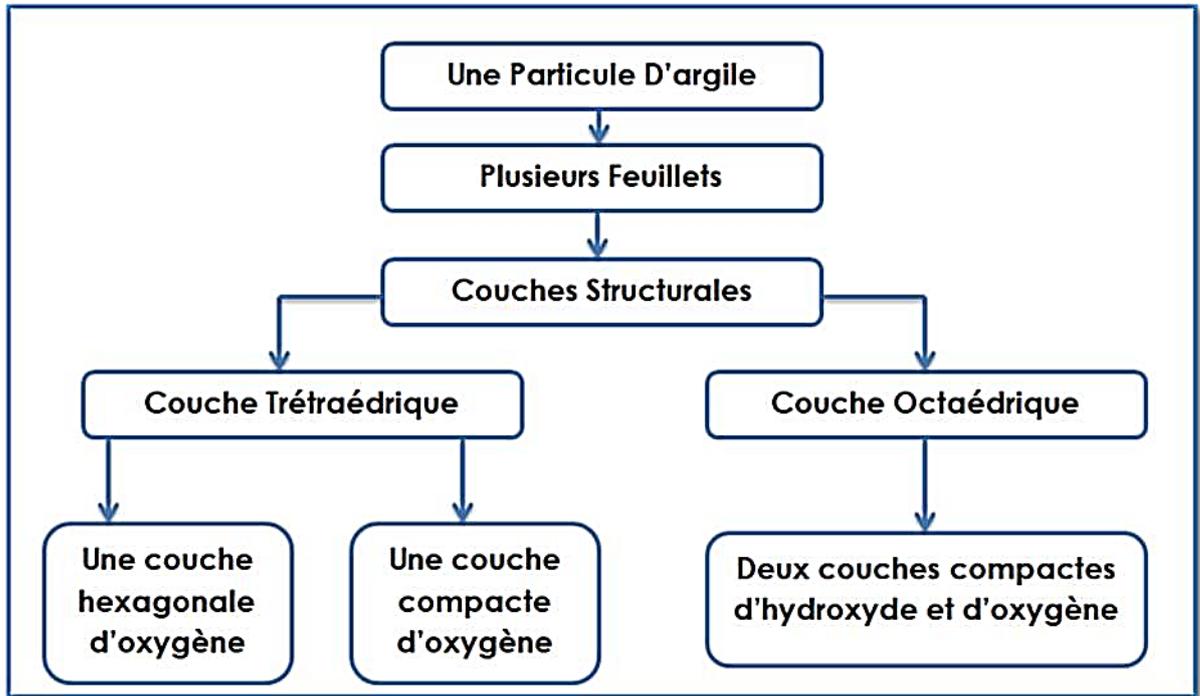


Figure I. 6. Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile (Holtz et Gibbs, 1991).

2.3 Classification des minéraux argileux:

2.3.1 Classification selon l'AIPEA (Association Internationale Pour l'Etude des Argiles)

La classification des argiles et leur nomenclature dépendent de leur composition chimique et de l'ordre structural. La classification adoptée par le comité de nomenclature de l'Association Internationale pour l'Etude des Argiles (AIPEA) varie avec les données structurales. Suivant le mode d'agencement des tétraèdres et des octaèdres et les cations inter foliaires ont permis d'aboutir à une classification du tableau suivante :

Chapitre I: Recherche bibliographique

Tableau I. 1: Classification des phyllo silicates (D'après Caillère et Hénin, 1959, complété par Mitchell, 1993).

Nature du feuillet	Nature des cations interfoliaires	Groupe	Nature de la couche octaédrique	Exemples
1/1	Pas de cations ou seulement de l'eau	<i>Kaolinite</i>	Diocatédrigue	Kaolinite, halloysite, nacrite, dickite
2/1	Pas de cations	<i>Pyrophyllites</i>	Diocatédrigue	Talc
	Cations hydratés et échangeables	<i>Smectites</i>	Diocatédrigue	Montmorillonite, nontronite, beidellite, saponite
		<i>Vermiculites</i>	Diocatédrigue	Vermiculite diocatédrigue à trioctatédrigue
	Cations monovalents non-hydratés	<i>Micas</i>	Diocatédrigue	Muscovite, Illite, Paragonite, biotite
	Cations divalents non-hydratés	<i>Micas durs</i>	Diocatédrigue	Margarite, clintonite
	Hydroxyles	<i>Chlorites</i>	Diocatédrigue	Donbassite, sudoite, Clinochore
2/1 fibreux	/	<i>Palygorskites, Sépiolites</i>	Diocatédrigue	Sépiolite, Palygorskite

2.3.2 Classification selon la couleur

La couleur n'est pas suffisante pour identifier le type d'argiles parce qu'elle peut être attribuée à plusieurs types d'argiles. Par exemple, la couleur verte par exemple est retrouvée chez la montmorillonite, l'illite ou encore le chlorite, etc. Ainsi, (Villieras, 2008) a montré que la concentration en oxyde de fer (Fe O) est responsable de la variation de couleur de l'argile comme va l'expliquer ci-dessous.

a) Argile verte

Les argiles vertes présentent une faible teneur en fer, ce sont généralement les montmorillonites, les illites et les smectites.

b) Argile blanche

Les argiles blanches sont le plus souvent des kaolinites et également des smectites (Merabet et Belkacemi, 2003).

c) Argile rose

Ces roches argileuses ne sont pas retrouvées au naturel. Il s'agit d'un mélange d'argile rouge et d'argile blanche (Cousin, 2013).

Chapitre I: Recherche bibliographique

d) Argile rouge

Généralement des illites, ces argiles sont riches en oxyde de fer (Ségalen, 1969).

e) Argile jaune

Ces illites riches en oxyde de fer et magnésie (Ségalen, 1969).



Figure I. 7. Classification d'argile selon la couleur (argile-verte.info, 2020).

2.4 Types d'argiles

Il existe de nombreux types d'argiles dans la nature en raison de la diversité de leurs caractéristiques et il est difficile de les énumérer, mais nous mentionnerons les groupes souvent rencontrés en géotechnique.

2.4.1 Kaolinites

Les kaolinites appartiennent à la famille des phyllo silicates (1:1). Le feuillet élémentaire est composé d'une couche tétraédrique de silicium et d'une couche octaédrique d'aluminium. D'un feuillet de kaolinite à l'autre des ions hydroxydes OH des couches octaédriques sont en vis-à-vis d'un plan contenant des ions d'oxygène O^{2-} de la couche tétraédrique ; dans ce cas, les liaisons inter foliaires résultent de l'effet composé de liaisons hydrogène et de forces de Van der Waals (Figure I.8) (Camille, 2010).

Chapitre I: Recherche bibliographique

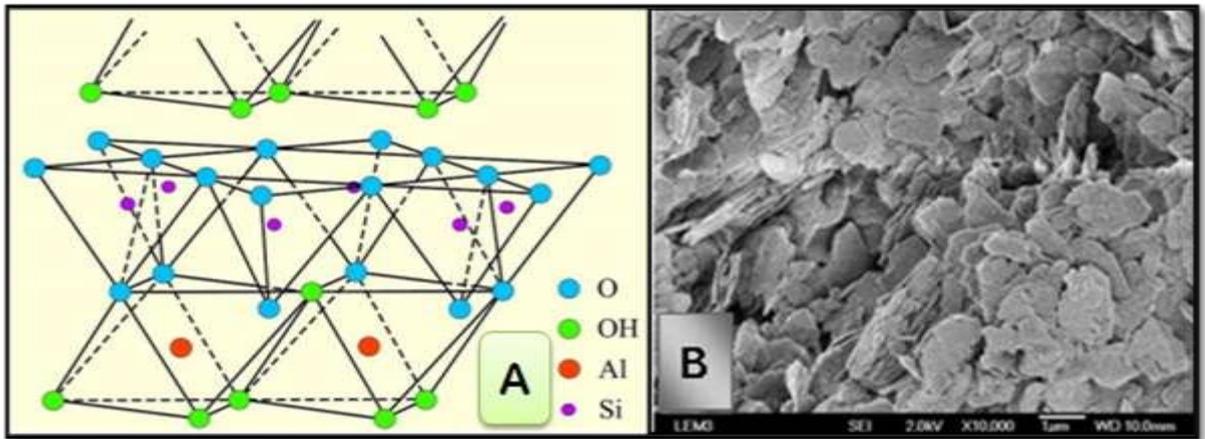


Figure I. 8. (A) Structure de la Kaolinite (El Hachmi, 2013), (B) Photo SEM de kaolinite (Wei et al., 2013; Wei, 2014).

2.4.2 Smectites

Les smectites, dont la montmorillonite et la bentonite, appartiennent à la famille des phyllo silicates (2:1) gonflant. Le feuillet élémentaire est caractérisé par l'empilement de 2 couches tétraédriques séparées par une couche octaédrique. Les atomes de silicium constituent majoritairement les tétraèdres mais des cations (Al, Fe) peuvent se substituer aussi dans ces tétraèdres. Les couches octaédriques sont quant à elles composées d'Al, Mg, Fe^{2+} , Fe^{3+} , (Leger 18 septembre 1997). Les smectites ont, de par leur structure, la nécessité d'équilibrer leur charge dans l'espace inter foliaire par l'insertion de cations dans cet espace. Ces cations, peu liés à la structure, sont susceptibles d'être échangés par d'autres cations (Camille, 2010).

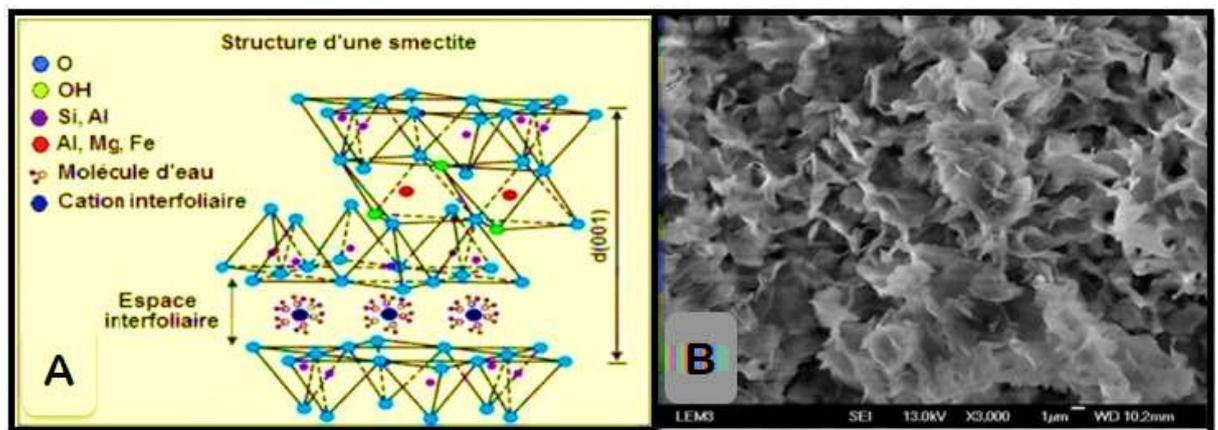


Figure I. 9. (A) Structure d'une smectite (Pedro, 1994), (B) Photo SEM de Montmorillonite (Wei et al., 2013; Wei, 2014).

Chapitre I: Recherche bibliographique

2.4.3 Lites

Les illites appartiennent à la famille des phyllo silicates (2 :1). Le feuillet élémentaire est composé d'une couche octaédrique d'aluminium comprise entre deux couches tétraédriques de silicium. Dans les couches tétraédriques de silicium un ion Si^{4+} sur quatre est remplacé par un ion Al^{3+} . Le déficit de charge qui en résulte est compensé dans l'espace inter foliaire par des ions potassium K^+ qui assurent des liaisons fortes entre les feuillets. (Camille, 2010).

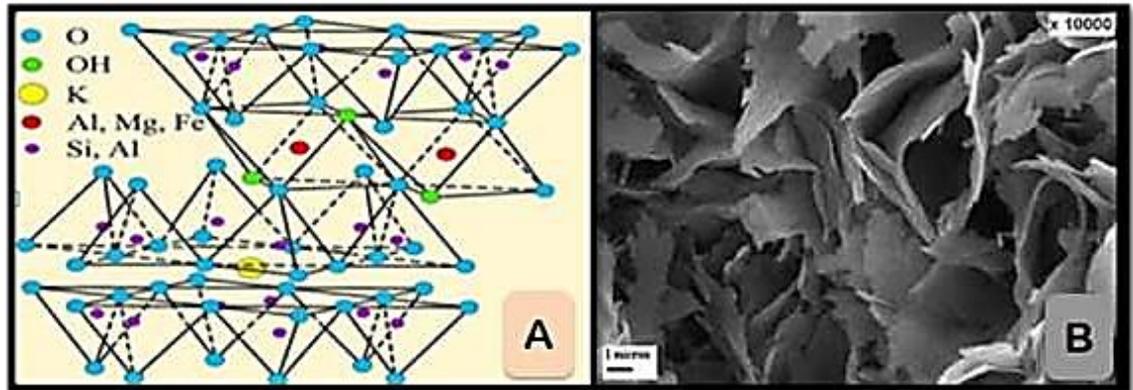


Figure I. 10. (A) Structure de l'illite (El Hachmi, 2013), (B) Photomicrographie électronique de l'argile Illite (Bajare, 2014).

2.4.4 Chlorite

Les chlorites sont des minéraux typiques du métamorphisme. On les trouve, fréquemment, dans les fissures des roches et dans les sédiments récents. Dans les roches sédimentaires, le chlorite riche en fer est issu de l'altération des minéraux ferromagnétiques (pyroxène, biotite...) (Millot, 1964). Elle a un feuillet d'une épaisseur double de celui de la kaolinite, comprenant une couche octaédrique dite brucitique (la brucite : $\text{Mg}(\text{OH})_2$).

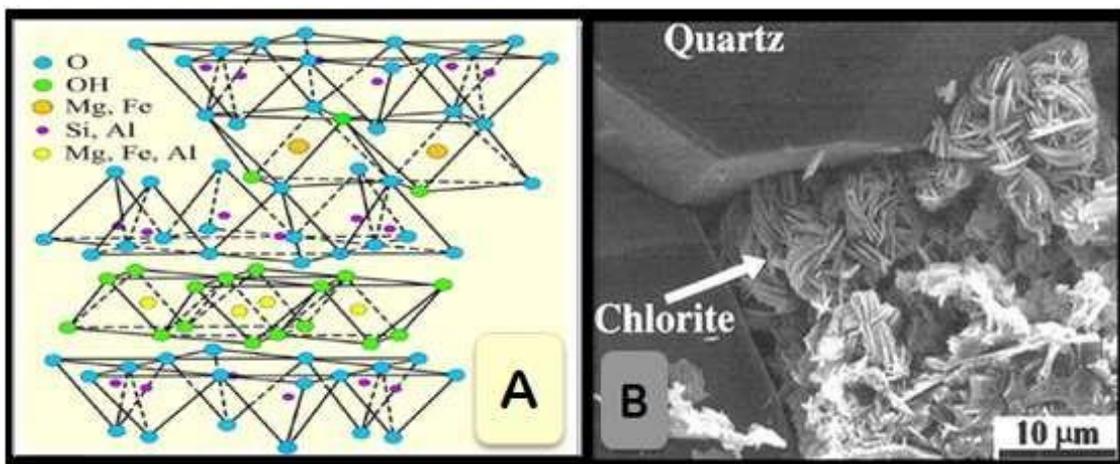


Figure I. 11. (A) Structure de chlorite (El Hachmi, 2013), (B) Photo micrographie électronique de chlorite (Morel, 1996).

Chapitre I: Recherche bibliographique

3 Comportement hydrique de sol argileux

La connaissance des propriétés hydriques des sols, est nécessaire à la description des transferts d'eau et de solutés. En effet, le sol joue un rôle de rétention déterminant puisqu'il constitue le substrat des cultures et conditionne ainsi les prélèvements d'eau et de nutriments. Il est également le siège de phénomènes d'adsorption, de filtration physique et de dégradation biologique (cité par Laurent et Rossignol, 2003).

3.1 Retrait gonflement

Des sols argileux est un phénomène étudié depuis plus d'une soixantaine d'années, mais dont tous les secrets n'ont pas été percés à ce jour, tant la problématique est complexe et met en jeu de multiples mécanismes. Le retrait-gonflement est en effet un problème multidimensionnel dont tous les composants sont couplés à différents niveaux et jouent un rôle essentiel dans sa manifestation et son ampleur (Tessier et al., 2006).

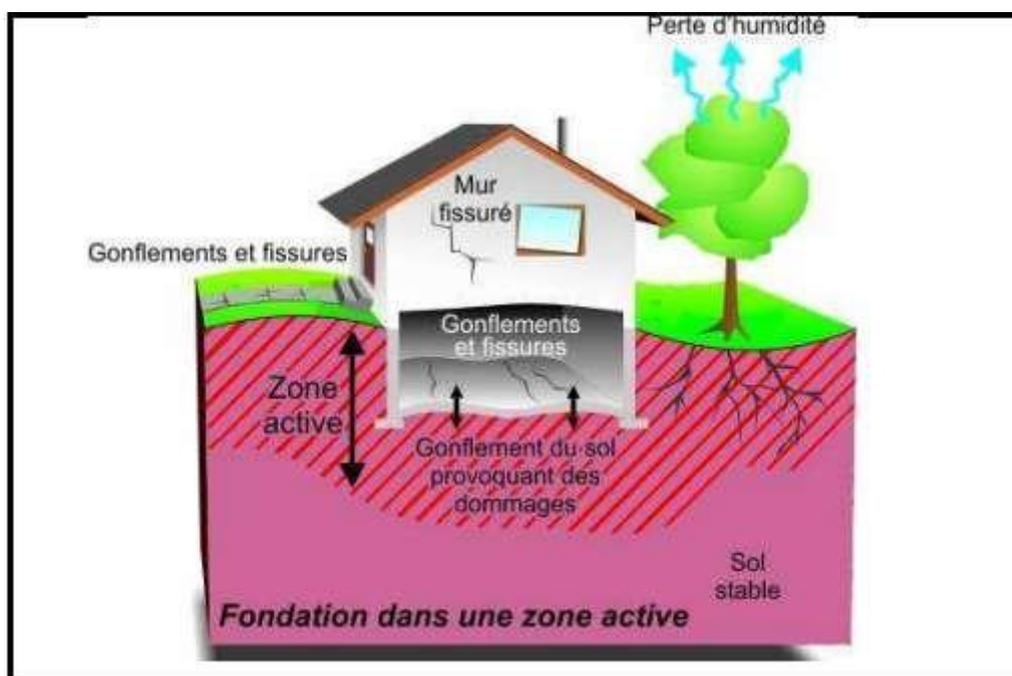


Figure I. 12. Schéma de principe du phénomène de retrait-gonflement du sol dans la zone active (http://geoscape.nrcan.gc.ca/sask/cracks_f.php).

Chapitre I: Recherche bibliographique

La majorité des sols argileux est sensible au phénomène de retrait gonflement car les argiles réagissent chimiquement et physiquement en fonction du milieu, mais cette sensibilité au gonflement varie selon les proportions et les variétés minéralogiques des argiles en présence. Une première définition simple de la consistance d'un matériau argileux donnée par **Caillere et al., 1959** : « Le phénomène de retrait gonflement des sols est lié à la consistance du matériau argileux qui varie selon sa teneur en eau : il est dur et cassant lorsqu'il est desséché, plastique et malléable à partir d'un certain degré d'humidité ». Et il y a autre définition plus complète du phénomène de retrait gonflement est donnée par **Audiguieret al., 2007** qui tient compte de la complexité d'un sol détritique et de son passé : « Les processus de retrait gonflement des sols argileux, générateurs de tassements différentiels et de dommages au bâti, trouvent leur origine dans des facteurs de prédisposition relatifs à la composition minéralogique et la texture des sols concernés. Ces facteurs résultent de l'histoire géologique des sols argileux – sédimentation, diagenèse, altération – et des sollicitations hydriques, thermiques et mécaniques correspondantes, passées et actuelles, (**Audiguieret al., 2007**) ».

3.1.1 Phénomène du retrait des sols

Le retrait consiste en une diminution du volume du sol due à l'évaporation de l'eau présente dans ses pores. L'assèchement progressif du sol provoque des tensions capillaires et la formation de ménisques autour des particules du sol. Les tensions capillaires sont à l'origine de contraintes de cisaillement. Plus l'eau s'évapore, plus les tensions capillaires augmentent et plus le rayon des pores diminuent. Parallèlement, la résistance à la traction du sol augmente.

Quand cette résistance atteint les contraintes engendrées par les tensions capillaires, le retrait s'arrête, le volume du sol ne diminue plus. La teneur en eau pour laquelle le retrait cesse correspond à la limite de retrait (**Nowamoozet al., 2009**).

Trois phases de retrait sont distinguées à travers l'étude du changement du volume associé à la variation de la teneur en eau dans le sol (**Haines, 1921**): phase de retrait normal, retrait résiduel et sans retrait (Figure I.13).

Chapitre I: Recherche bibliographique

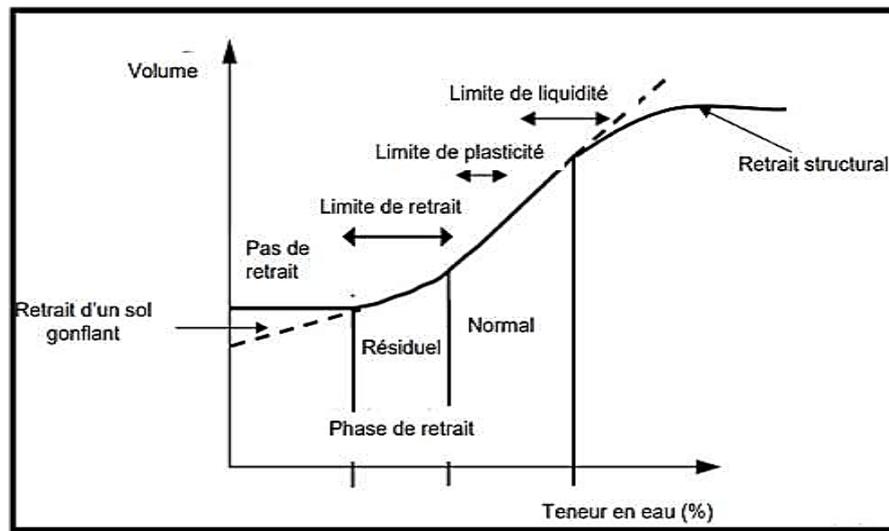


Figure I. 13. Courbe de retrait des sols argileux (Nowamooz, 2007).

Durant la première phase de séchage, le volume d'eau évaporé est compensé par une égale diminution des volumes des porosités internes (retrait normal). Les pores restent saturés en eau. Pendant la seconde phase, l'air pénètre dans les réseaux des pores (point d'entrée d'air). Les pores commencent à se toucher ce qui limite la réduction de volume possible. C'est le retrait résiduel. Enfin, dans la dernière phase, l'arrangement des particules cesse puisque le retrait est terminé. Les sols se désaturent en eau sans déformation et l'eau résiduelle est contenue dans les pores.

Dans les sols naturellement structurés, il y a aussi une quatrième phase appelée retrait structural (Figure I.13). Le volume d'eau perdu est supérieur à la diminution du volume de sol (Yule et Richie, 1980). Les sols restructurés n'ont pas cette étape (Bronswijk, 1988). Pour les sols gonflants, les variations de volume continuent même pour les teneurs en eau inférieures à celles de limite de retrait (Figure I.13).

3.1.2 Phénomène de gonflement

Un sol argileux change de volume selon son degré d'humidité comme le fait une éponge : il gonfle avec l'humidité et se rétracte avec la sécheresse, le gonflement se produit en présence d'humidité et l'hydratation se fait par l'hydratation des espaces inter foliaire (attraction des particules d'eau) ou par la répulsion des particules argileuses appelées aussi le gonflement osmotique, expliqués précédemment (Bekhouch, 2017).

Chapitre I: Recherche bibliographique

Plusieurs études ont expliqué le phénomène du gonflement de diverses manières

➤ **Selon Van olphen (1963)** a expliqué le processus de gonflement par deux étapes:

- La première étape serait due à la capacité d'absorptions monocouche successives et d'eau à la surface des particules.

- La seconde étape serait quant à elle due aux forces de répulsion qui sont dominants dans ce stade.

- **Selon Mouroux et al (1988)** ont distingué deux gonflements, un gonflement intraparticulaire (interfoliaire) et un gonflement interparticulaire (FigureI.14) :

- Le gonflement interfoliaire résulte de la cassure des faibles liaisons entre les feuillets des particules d'argile, et permettant ainsi l'acquisition d'eau au sein de la structure des particules, quoique ce gonflement est assez rapide, dont l'amplitude est en revanche très notable.

- Le gonflement interparticulaire résulte de l'apport d'eau supplémentaire en écartant les plaquettes (assemblage de feuillets) les unes des autres. Sa réaction est lente (peut durer des années, même lorsque la succion devient nulle). Contrairement au gonflement interfoliaire, le gonflement interparticulaire a une ampleur assez limitée et affecte toutes les argiles.



Figure I. 14. Mécanismes de gonflement des argiles par hydratation.

(Cité par Bengraa, 2004).

Chapitre I: Recherche bibliographique

4 Fissuration

Le phénomène de fissuration dans les sols constitue un des plus importants problèmes géo environnemental. Celle-ci affecte par exemple la perméabilité et peut compromettre l'intégrité des structures. Dans les travaux d'ingénierie, la fissuration rompt l'intégrité des sols et peut conduire à diverses défaillances géotechniques et géo-environnementales. La réduction de la résistance

des sols due à la fissuration par dessiccation peut entraîner la rupture des structures terrestres exposées (Morris et al., 1992), des glissements de terrain (Tang et al., 2011) et des coulées de boue (Wang et al., 2016). Les fissures fournissent des canaux préférentiels pour le transfert de masse qui affectent négativement la fonctionnalité des barrages, levées, remblais et barrières de décharge (Ye et al., 2017). La présence de fissures augmente la profondeur d'altération du sol et aggrave l'érosion du sol sur les pentes (Tang et al., 2018). Le processus de fissuration endommage également les racines des plantes et réduit le rendement des cultures. Ces dernières années, en raison du changement climatique mondial, les sécheresses se produisent avec une intensité et une fréquence croissantes (Pachauri et al., 2014). Une étude systématique du comportement de fissuration par dessiccation du sol est donc fondamentale pour évaluer et prédire l'influence des sécheresses sur les structures terrestres (barrages, remblais et barrières de décharge) et les systèmes écologiques.



Figure I. 15. Fissures apparaissent dans la maison en raison du sol argileux (Bodin et al., 2015, SEC 2015).

Chapitre I: Recherche bibliographique

4.1 Classification des fissures

4.1.1 Classification selon Frookes et Denness, 1969

Les discontinuités dans les argiles ont été classées en fonction de leur taille et espacement des fissures. Les tableaux I. 2 et I. 3 présentent en détail les classifications expliquées précédemment.

Tableau I.2: Classification de la taille des fissures (Frookes et Denness, 1969).

Type	Taille (zone)
Très Grande fissure	$\geq 100\text{m}^2$
Grande fissure	1 - 100 m ²
Fissure normal	0,01 - 1 m ²
Petite fissure	1 - 100 cm ²
Très petite fissure	$\leq 1\text{ cm}^2$

Tableau I. 3: Classification de l'espacement des fissures (Frookes et Denness, 1969).

cription	Escapement des fissures
Très épais	> 2 m
Lit épais	0,6 m - 2 m
Lité moyenne	0,2 m - 0,6 m
Lit mince	60 mm - 0,2 m
Lit très fin	20 mm - 60 mm
Laminé	6 mm - 20 mm
Finement laminé	<6 mm

4.1.2 Classification selon Fang, 1997

Les types de fissuration du sol ont été classés en quatre types:

- Fissuration de retrait.
- Fissuration en traction.
- Fissuration due à l'effet climatique.
- Fissuration thermique.

Chapitre I: Recherche bibliographique

4.2 Fissuration due à la dessiccation

La dessiccation est définie comme le processus de perte d'eau d'un sol en assèchement ou exposé à un environnement chaud (Péron et al., 2006). En période de sécheresse, les sols sont soumis à des succions matricielles croissantes dues à l'évaporation qui provoque une perte progressive de l'eau. Les sols argileux, à grains fins, sont caractérisés par une aptitude à variation de volume lorsqu'ils sont soumis à des succions élevées (diminution de volume) (Boivin et al., 2006). Cette diminution de volume s'effectue à la fois verticalement, se traduisant par un tassement différentiel et horizontalement par l'ouverture de fissures de retrait à la surface du sol. Le développement des fissures dans les sols à grains fins peut être causé par plusieurs processus dont la dessiccation, le tassement différentiel, la pénétration par les racines des plantes.

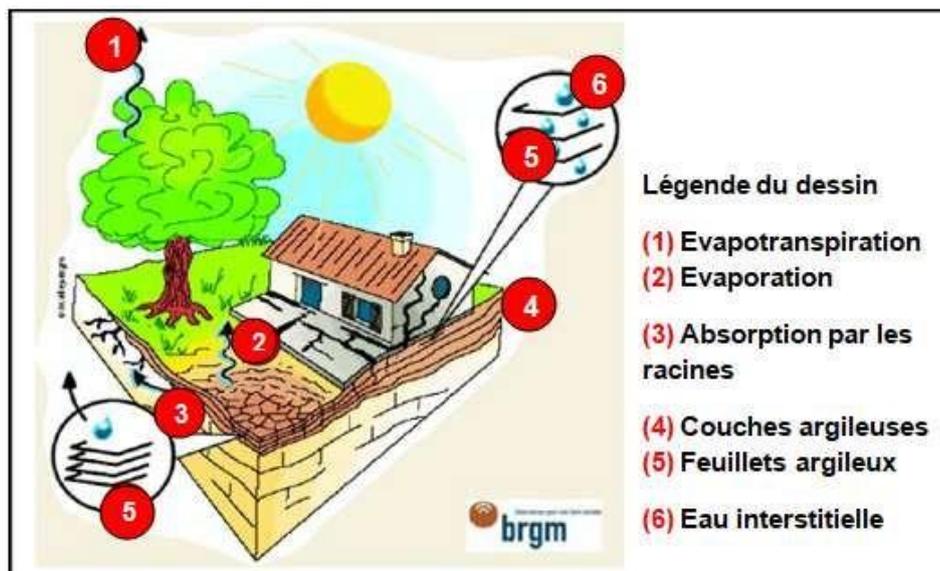


Figure I. 16. Dessiccation des sols argileux en période sèche (Source : Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)).

La fissuration accélère le phénomène d'évaporation à la surface de sol. En effet, les fissures exposent le sol en profondeur aux effets climatiques et créent de nouvelles surfaces d'évaporation. Ainsi, l'évaporation ne se fait plus seulement à travers la surface du sol, mais aussi à travers les surfaces créées par la fissuration. Il en résulte alors des variations des propriétés thermiques, hydrauliques et mécaniques du sol, en cours d'assèchement notamment au niveau de sa conductivité hydraulique et sa capacité de rétention d'eau (Liu et al., 2004 ;

Chapitre I: Recherche bibliographique

Rayhani et al., 2007 ; Azam et al., 2011).

Dans un autre contexte, les fissures de dessiccation affectent les barrières argileuses mises en place pour l'isolation des déchets nucléaires. La perméabilité peut s'accroître dramatiquement; ce qui peut faire perdre à la barrière sa fonction protectrice. La dessiccation est aussi la cause d'une dégradation irréversible des propriétés des sols agricoles. Les fissures de dessiccation engendrées par le retrait sont encore susceptibles d'occasionner un accroissement de l'oxydation des sulfures en favorisant un apport d'eau et d'air.

Un certain nombre d'études sur le phénomène de retrait et de fissuration a été réalisé sur des matériaux argileux. Cependant, la majorité de ces études sont à la base des essais expérimentaux. Ces essais visent à comprendre le mécanisme de retrait, à étudier des conditions qui mènent à l'apparition des fissures de dessiccation, ainsi que de suivre le réseau fissuré dans le sol à partir de différents paramètres évolutifs tel que : la teneur en eau, la surface totale de fissures, la largeur moyenne des fissures, le nombre de segments et le taux de fissures... (Nahlawi et Kodikara, 2006 ; Rayhani et al., 2007; Tang, 2009 ; Tang et al., (2008,2010,2011); Chaduvula et al.,2017; Zeng .H et al ., 2019).

La fissuration de sol due à la dessiccation est donc un phénomène d'une importance certaine en géotechnique et en géotechnique environnementale.

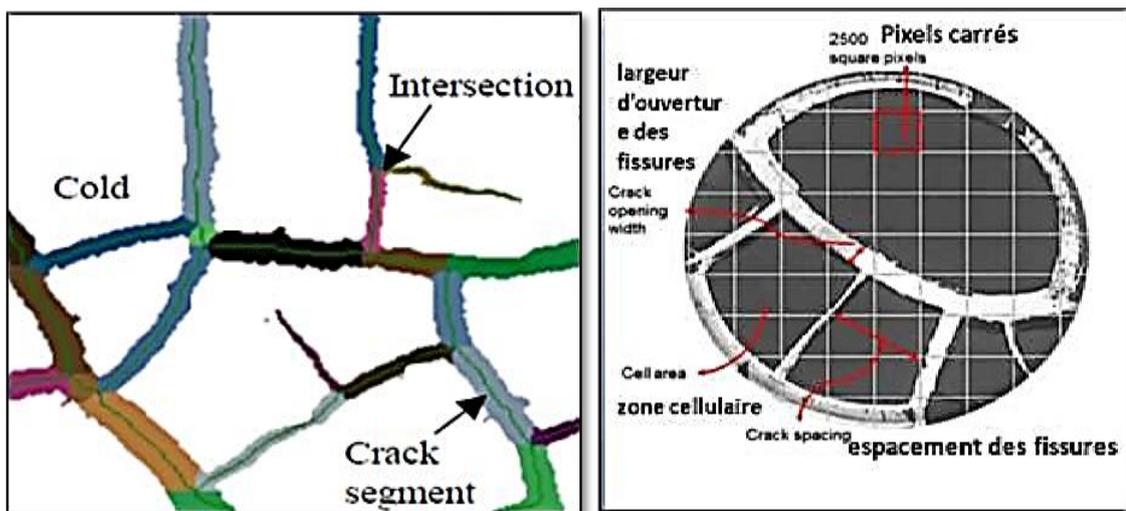


Figure I. 17. Quelques paramètres évolutifs de la fissure

(Zeng et al., 2019 ; Chaduvula et al., 2017).

Chapitre I: Recherche bibliographique

4.2.1 Cause des fissures dues à la dessiccation

► **Williams et Jennings, 1977** (cité par [**Vallejo, 1994**]) Ont constaté que des fissures se développent argile dans, entre autres, les circonstances suivantes:

- Des fissures se développent au cours du processus de consolidation.
- À la suite d'une diminution de la pression du mort-terrain lors du gonflement de l'argile.
- Des fissures se développent au fur et à mesure que l'argile sèche.
- De grandes contraintes latérales peuvent induire une fissuration de l'argile.

Il existe plusieurs causes de dessiccation et de fissuration, les chercheurs ont tenté de se concentrer sur chacune d'elles, la sous-section suivante explique les causes principales de la dessiccation de la fissuration :

A. **Succion**

La succion est une pression plus faible que celle de l'air qui s'exerce sur l'eau à l'intérieur des grains, conduit à des mouvements de l'eau donc c'est une pression négative de l'eau des pores. D'après **Bakkari, 2007** la succion est une mesure de l'attraction entre le sol et l'eau. Ce phénomène permet à l'eau de s'élever à une hauteur supérieure à celle de l'état naturel. La succion est le paramètre le plus important du comportement hydraulique et mécanique des sols non saturés. Dans un sol non saturé, on peut admettre que les pores jouent un rôle semblable aux tubes capillaires. Les tensions superficielles dues aux ménisques trouvent une réaction sur les particules solides (Figure I. 18). Ces réactions engendrent certaines contraintes supplémentaires sur le squelette du sol. Elles modifient le champ de déformations et le comportement mécanique en général.

Chapitre I: Recherche bibliographique

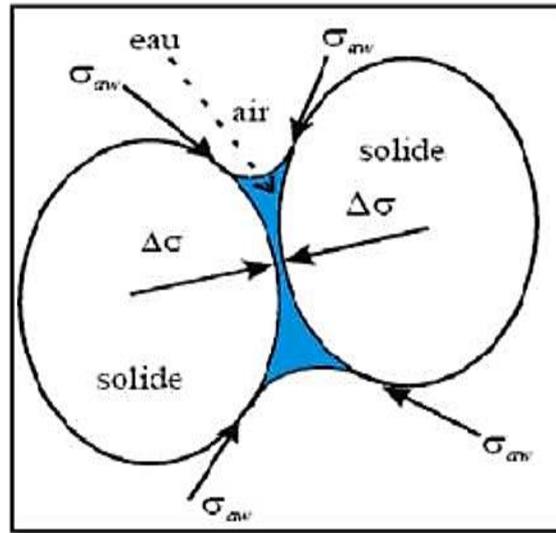


Figure I. 18. Effets de la succion sur les grains du sol (Ghanem, 2011).

B. La résistance à la traction

La résistance à la traction des sols est un indicateur important, car elle dépend de diverses autres propriétés du sol, et un des paramètres mécaniques les plus importants contrôlant le développement des fissures dans le sol. La fissuration en traction se produit lorsque la contrainte de traction induite atteint la résistance à la traction du sol ou la tension de traction atteint la rupture par rupture du sol. La contrainte et la déformation de traction peuvent être induites par le retrait dû à l'évaporation de l'humidité du sol, la flexion des couches de sol comme résultant de tassements différentiels ou de charges externes. Les méthodes couramment utilisées pour mesurer la résistance à la traction des matériaux peuvent être classées en catégories directes (par exemple, **Leavell et Peters 1987; Wallace, 1998.**) et indirectes (test brésilien de traction, par exemple, **Frydman, 1964;** essai du faisceau de flexion, par exemple, **Krishnayya, 1974;** essai du cylindre creux, par exemple, **Al-Hussaini, 1981;** méthode d'essai à double poinçon, par exemple, **Liang et al., 2014.**) Exemple **Avila, 2004** et **Wei, 2014** ont effectué des tests de flexion et de traction pour mesurer la résistance à la traction. Ils ont développé une nouvelle technique pour mesurer directement la résistance à la traction des sols. Le dispositif consiste à placer l'argile dans un moule composé de deux compartiments triangulaires (Figure I. 19). Les compartiments tirent de côtés opposés et un comparateur mesure le déplacement à leur intersection (Figure I. 19). **Wei, 2014** a étudié la résistance à la traction de trois sols argileux : une kaolinite P300, une montmorillonite et un mélange de montmorillonite avec de la

Chapitre I: Recherche bibliographique

kaolinite. Elle a déduit que la résistance à la traction augmente avec la diminution de l'indice de liquidité de l'échantillon. Pour un indice de liquidité donné, la résistance diminue lorsque le pourcentage de montmorillonite augmente.

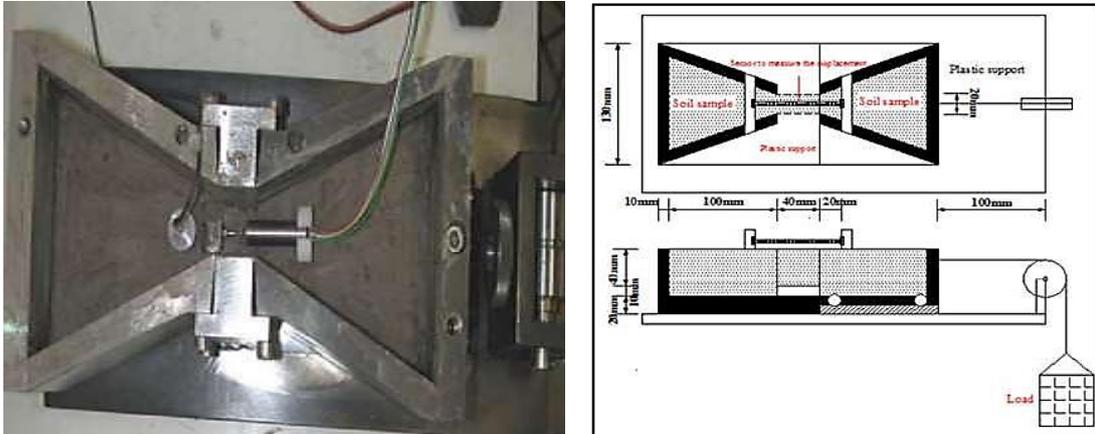


Figure I. 19. Schéma avec dispositif pour mesurer directement la résistance à la traction d'un sol (Wei, 2014 ; Avila, 2004).

C. Composition de sol argileux

La composition du sol (contenu d'argile, minéralogie argileuse, structure du sol et la propriété du sol (densité, compacité)) incidence directe sur les propriétés de retrait et de gonflement, qui à leur tour influencent le comportement de fissuration.

4.3 Mécanisme de fissuration (études expérimentales antérieures)

4.3.1 Mode d'ouverture des fissures

La prédiction du seuil de propagation des réseaux de fissures est un élément essentiel de la mécanique des matériaux. Il est possible de diviser les modèles de propagation de fissures en trois catégories distinctes (Figure I. 20) :

A. Le mode I (en traction): il s'agit du mode d'ouverture. Les surfaces des fissures se propagent dans des directions opposées et parallèlement au plan de propagation de la fissure. Dans ce mode, la contrainte tend à ouvrir la fissure et à rompre en traction les liaisons entre deux faces de la fissure.

B. Le mode II (en cisaillement): il s'agit du mode de glissement de translation. Les surfaces des fissures se déplacent dans la même direction.

Chapitre I: Recherche bibliographique

C. **Le mode III (en mixte) :** il s'agit du mode de glissement de rotation. Les fissures observées lors du séchage des sols argileux dans la plupart des expériences sont principalement du mode I (par l'ouverture) (Amarasiri et al. 2011; Stirling, 2014).

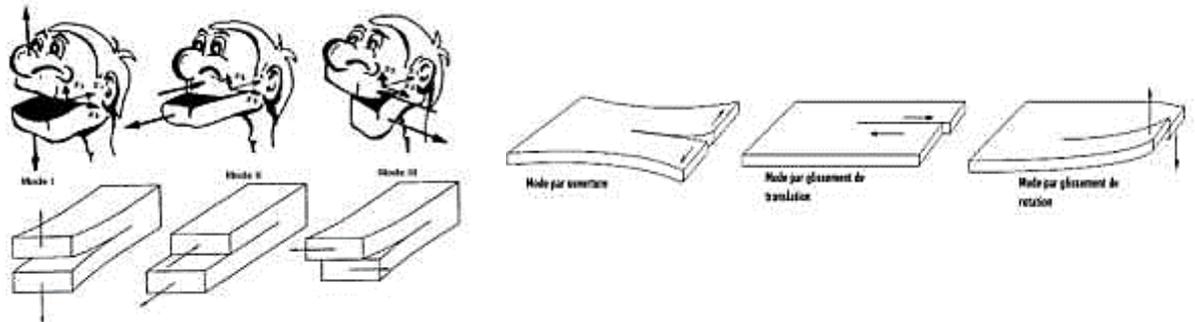


Figure I. 20. Trois modes de propagation de la fissure (Nguyen, 2015).

Dans l'étude de la fissuration due au séchage des sols, les mécanismes sont expliqués essentiellement en se basant sur les propagations et l'initiation des fissures. On trouve dans la littérature un nombre importants d'études réalisées sur le phénomène de retrait et de fissuration pour des matériaux argileux. De nombreuses recherches ont été consacrées à l'analyse des mécanismes d'amorçage et de développement des fissures dans les sols.

4.3.2 Initiation des fissures

L'initiation de la fissure est une des observations essentielles dans l'étude de la fissuration due au séchage de sol. Il y a deux facteurs principale qui contrôlent l'initiation des fissures (Kodikara et Costa ,2013) le premier facteur c'est la distribution de la contrainte en traction qui est le résultat d'un retrait restreint. La fissure se propage quand la contrainte en traction atteint la résistance du sol. En conséquence, la fissuration peut souvent commencer à partir du centre d'un massif de sol où la contrainte en traction est maximale (Kodikara etChoi, 2006 ; Nahlawi et Kodikara ,2006; Peronet al., 2009 ; Tang et al., 2011) et le deuxième concerne l'hétérogénéité du matériau. En effet, les ouvertures de fissures se produisent en général là où l'énergie est minimale pour se propager. Les microfissures peuvent être considérées comme des défauts existants dans la structure (Shin et Santamarina,2011; Tang et al., 2011; Kodikara et Costa,

Chapitre I: Recherche bibliographique

2013). Une série d'expériences ont été menées sur des échantillons du sol soumis au séchage pour étudier les conditions qui mènent à l'apparition des fissures du dessiccation (Morris et al., 1992 ; Nahlawi et Kodikara, 2006; Péron, 2008 ; Tang et al., 2011; Divya et al., 2014; Tang et al., 2016; Li, Y et al., 2018; Li, H et al., 2019 ; Chebbi et al., 2020).

Les essais montrent que les fissures dues à la dessiccation sont susceptibles de se produire si les contraintes de traction générées dans le sol dépassent sa résistance à la traction.

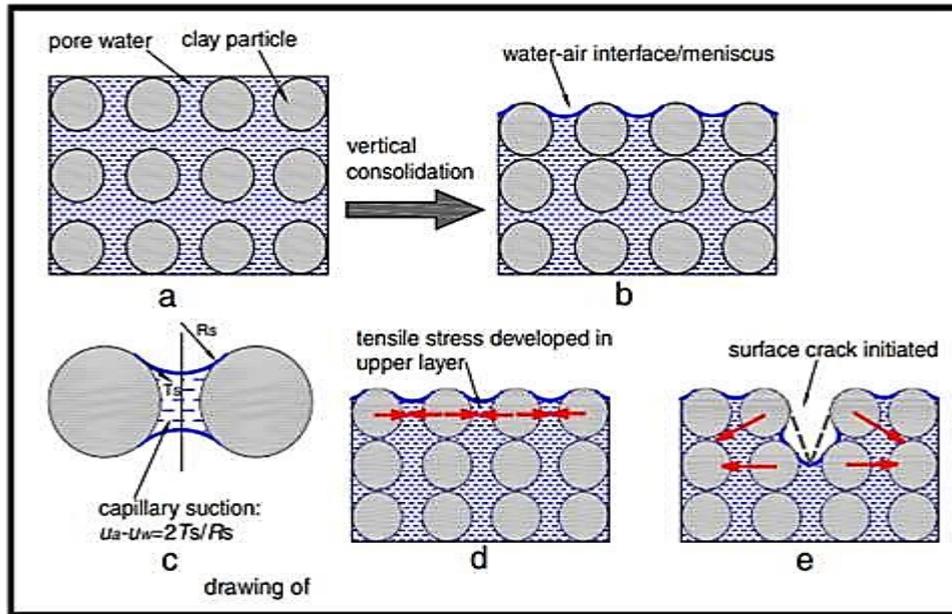


Figure I. 21. Dessin schématique du processus d'initiation des fissures du sol. (a) Sol initial entièrement saturé; (b) le ménisque d'interface eau-air s'est développé entre les particules du sol; (c) succion capillaire entre les particules de sol; (d) contrainte de traction développée dans la couche supérieure; et (e) amorce d'une fissure de surface (Tang et al., 2011).

Lorsqu'une couche d'argile homogène entièrement saturée initiale est sous conditions de séchage ouvertes, l'évaporation de l'eau commence à la surface. En général, l'eau à la surface s'évapore en premier. Au cours de cette période, la couche d'argile et les états contrainte- déformation ne sont pas affectés. Comme l'eau-air l'interface atteint progressivement la surface de la couche (Fig1.21 (a)), un ménisque entre les particules d'argile commence à se former (Fig1.22 (b)). La succion capillaire se développe dans la couche supérieure (Fig1.21 (c)). Quand l'eau continue de s'évaporer, le ménisque capillaire augmente et s'accompagne d'une augmentation de

Chapitre I: Recherche bibliographique

la succion capillaire et de la contrainte effective entre les particules d'argile. Par conséquent, la couche d'argile se consolide et se rétrécit. Du niveau des particules, on peut imaginer que chaque particule à la surface de la couche subit une force de traction, qui est induite par la succion capillaire développée des particules environnantes. Par conséquent, un champ de contraintes de traction est créé dans la couche supérieure (Fig1.21 (d)). Une fois que la contrainte de traction croissante dépasse la résistance à la traction de la couche d'argile, une fissuration se produit à la surface (Fig1.21 (e))(Tang et al.,2011).

4.3.3 Structure et propagation des fissures

La formation et la propagation des fissures liées au séchage ont été étudiées par de nombreux travaux expérimentaux. Les travaux au laboratoire se concentrent essentiellement sur le comportement des sols à l'état liquide sous le séchage.

Au cours du séchage, les fissures se développent horizontalement (ouverture) et verticalement (en profondeur). Les fissures se produisent souvent progressivement et forment différentes familles : primaires, secondaires et tertiaires (Kodikara et al., 2000; Nahlawi et Kodikara 2006; Stirling ,2014; Peron, 2009 ; Laloui, et al., 2009; Amarasiri et al., 2010; Konrad et Ayad ,1997). Théoriquement, l'apparition des fissures secondaires et tertiaires peut être considérée comme la bifurcation à partir des cellules créées par des fissures primaires (Kodikara et al., 1998; Bazant et Cedolin ,1991).

Pour une bande de sol (éprouvette de grande longueur et petite épaisseur), la fissuration se déroule par la subdivision de l'éprouvette en petits blocs (Fig1.22). Les fissures primaires se sont créées premièrement, souvent à partir des bords, aux défauts sur la surface ou au centre de l'éprouvette. Ces fissures primaires se propagent perpendiculairement à l'épaisseur de la bande. Les fissures secondaires apparaissent au milieu de l'intervalle entre des fissures primaires. Les fissures primaires et secondaires se développent et séparent l'échantillon en petits blocs. Finalement, les fissures tertiaires peuvent être créés ou non, entre des fissures primaires et des fissures secondaires existantes, ou entre des fissures secondaires (Vo, 2017).

Chapitre I: Recherche bibliographique

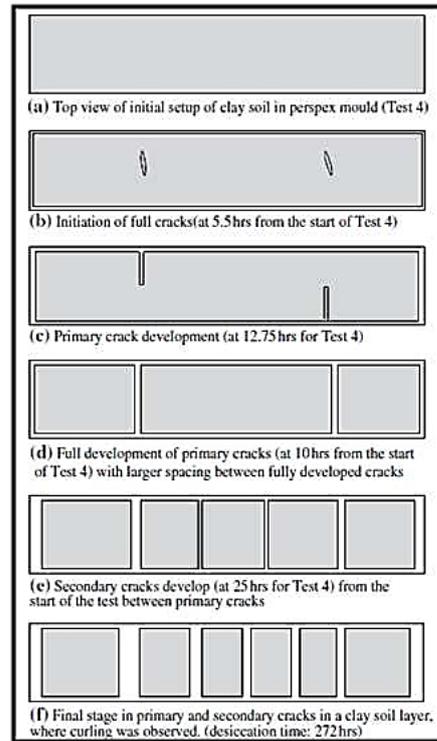


Figure I. 22. Développement des fissures d'une bande de l'argile Werribe (Nahlawi et Kodikara, 2006).

► Müller et Dahm ,2000 ;Tang et al., 2011; Tollenaar et al.,2017 ont reconnu que la majorité des fractures (propagation et initiation) dans leurs expériences sur l'amidon ont commencé à la surface.

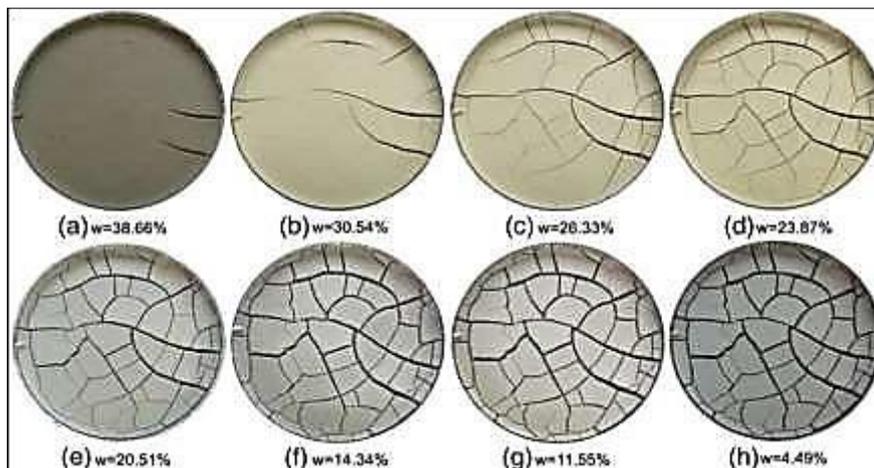


Figure I. 23. Evolution de la géométrie des fissures sur la surface de l'échantillon soumis à la dessiccation (Tang et al., 2011).

► Weinberger ,2001 ; Lakshmikantha et al., 2013 ; Wang et al., 2018 ont remarqué au cours de leurs expériences que des fissures ont commencé au

Chapitre I: Recherche bibliographique

fond des échantillons, se propageant verticalement vers le haut puis horizontalement.

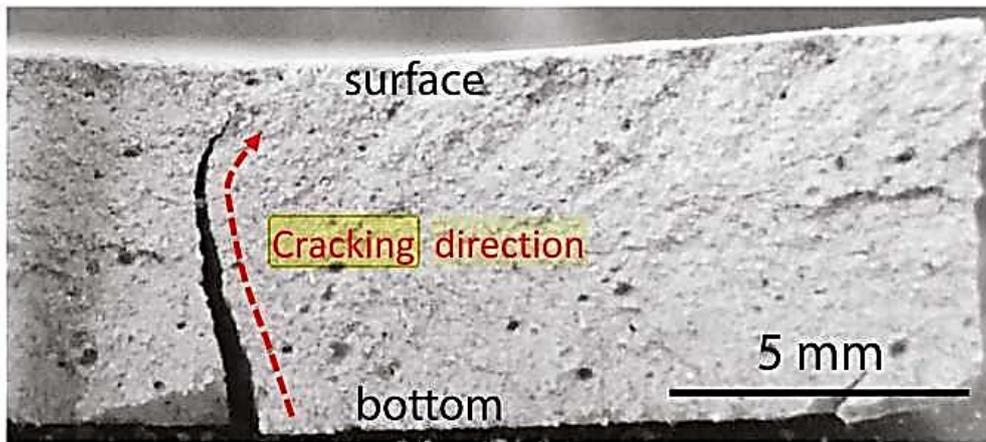


Figure I. 24. Fissure nucléée au fond de l'échantillon et se propageant vers le haut (Wang et al., 2018).

► **Corte et Higashi (1960)** se sont référés à la description de la fracture plumeuse faite par **Kies et al., 1950**. Ils ont émis l'hypothèse que les fissures ont commencé au centre de la couche de sol et se sont propagées à la surface ou au fond.

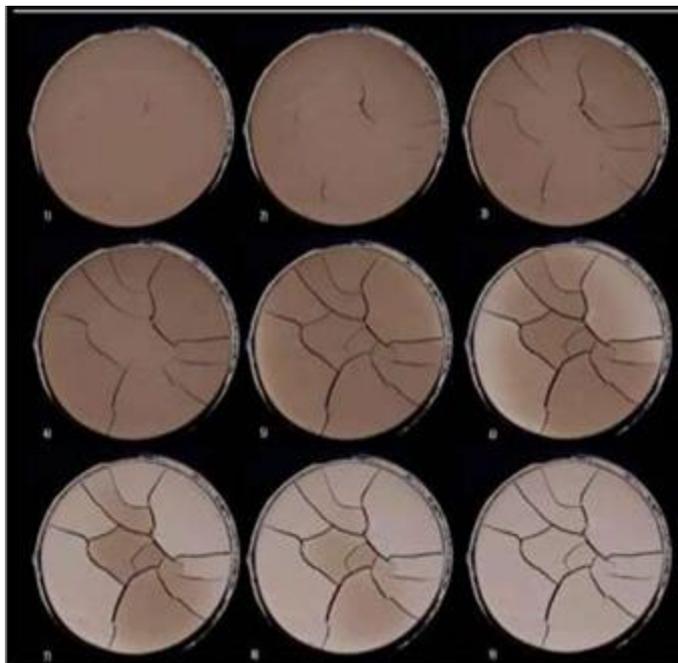


Figure I. 25. La formation progressive des fissures lors du séchage (Barnier, 2015) (Les fissures ont commencé au centre d'échantillon).

► Quelque chose de similaire a été remarquée par **Lakshmikantha et**

Chapitre I: Recherche bibliographique

al., 2013 lors de leurs expériences. Peron et al., 2009 n'ont pas pu déterminer si des fractures ont commencé en haut ou en bas de la couche dans leurs tests sur dalles d'argile. Cependant, Kitsunozaki ,2009 ; Shin et Santamarina ,2011 et Tang et al. (2010b, 2011) ont mentionné que les fissures commencent toujours à la surface de la couche.

4.4 Paramètres influençant sur la fissuration : Observations expérimentales

Une série d'études expérimentales récentes cherchent à caractériser le phénomène de fissuration des sols argileux. La méthode expérimentale a pour objectifs principaux d'étudier les conditions de température et d'humidité relative contrôlés et observer l'influence des paramètres comme le type du sol, l'épaisseur de l'échantillon et les conditions aux limites sur la morphologie du réseau des fissures créé (Nahlawi et Kodikara, 2006 ; Min et Nhat 2007 ; Rayhani et al.,(2007,2008) ; Péron et al., 2009 ; Tang et al. (2008,2010, 2011)).

Le tableau suivant résumé les paramètres d'influence selon des travaux expérimentaux :

Tableau I.4: les paramètres d'influence selon des travaux expérimentaux (Vo, 2017).

Type des tests	Références	Paramètres investigués
En rectangulaire	(Yesiller et al., 2000)	Effet du cycle de séchage/humidification et de la teneur en particules fines. Calcul de facteur d'intensité des fissures.
	(Lakshmikantha ,2009)	Fissuration avec des différentes tailles et épaisseurs de l'échantillon.
	(Tang et al., 2008)	Effet de la température, de l'épaisseur de l'échantillon et du cycle de séchage/humidification sur la fissuration.
En circulaire	(Tang, Cui, et al., 2011), (Cordero et al.,2014)	Effet du cycle de séchage/humidification
	(Tang, Shi, et al., 2011)	Définition des différentes phases de la fissuration.
	(Auvray et al.,2017)	Impacts des différents facteurs (succion, état initial de l'éprouvette) sur la fissuration du sol
	(Costa et al., 2013)	Effet de l'épaisseur de l'échantillon, du taux d'évaporation. Etude de l'initiation des fissures et de la présence des défauts

Chapitre I: Recherche bibliographique

En bande	(Nahlawi et Kodikara ,2006)	Processus de fissuration, effet de l'épaisseur de l'échantillon sur l'espacement entre les fissures
In situ	(Konrad et Ayad ,1997)	Processus de fissuration in situ. Espacement et profondeur des fissures
	(Cordero et al., 2016)	Evolution des paramètres du sol et morphologie du réseau de fissures

5 Manifestation des désordres

Les désordres aux constructions pendant une sécheresse intense sont dus aux natures du sol, par leur structure, certains sols argileux présentent de très forts gonflements en présence d'eau et inversement se rétractent en période de sécheresse. Ces variations de volume sont rarement uniformes et se traduisent par des tassements différentiels entre les secteurs qui sont soumis à une sécheresse accrue (par l'évaporation, par un drainage ou à cause de la succion des racines d'arbres) et ceux qui en sont protégés. Des maisons individuelles légères et fondées superficiellement résistent parfois mal à de tels mouvements de sol. Cela peut alors se traduire par des désordres fissurations des façades, des dallages; des soubassements ou des cloisons; décollements entre corps de bâtiments ; distorsion des huisseries; ruptures de canalisations terrées.

Ces fissures présentent une forme particulière (Figure I.26). En effet, lorsque le terrain se rétracte ou gonfle de manière hétérogène sous la maison, les fondations se retrouvent en porte-à-faux. Des efforts supplémentaires apparaissent alors dans la structure de la maison et les fissures vont apparaître là où la maison présente des défauts ou des faiblesses de résistance. Les zones de faiblesse comme les ouvertures de fenêtres et de portes ou les zones marquées par l'absence de chaînage ou par des défauts d'exécution vont donc être concernées par ces fissures. En fait, sous l'effet du retrait ou du gonflement du terrain, la maison va se « découper » en blocs délimités par des fissures. Les fissures traduisent donc le mouvement d'un bloc par rapport à l'autre.

Chapitre I: Recherche bibliographique

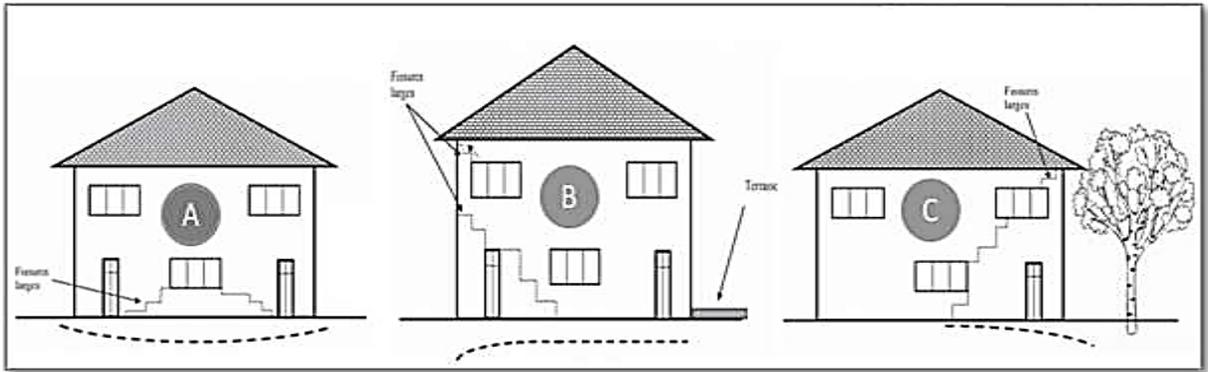


Figure I. 26. Mécanisme d'apparition des fissures (A) mode de déformation provoqué par le tassement d'un mur de façade, (B) mode de déformation provoqué par un retrait périphérique du sol sous la maison, (C) mode de déformation provoqué par un retrait localisé du sol induit par la présence d'un arbre (Analyse et traitement des désordres créés par la sécheresse, guide 3. Marne la Vallée : Ifsttar, 2017).

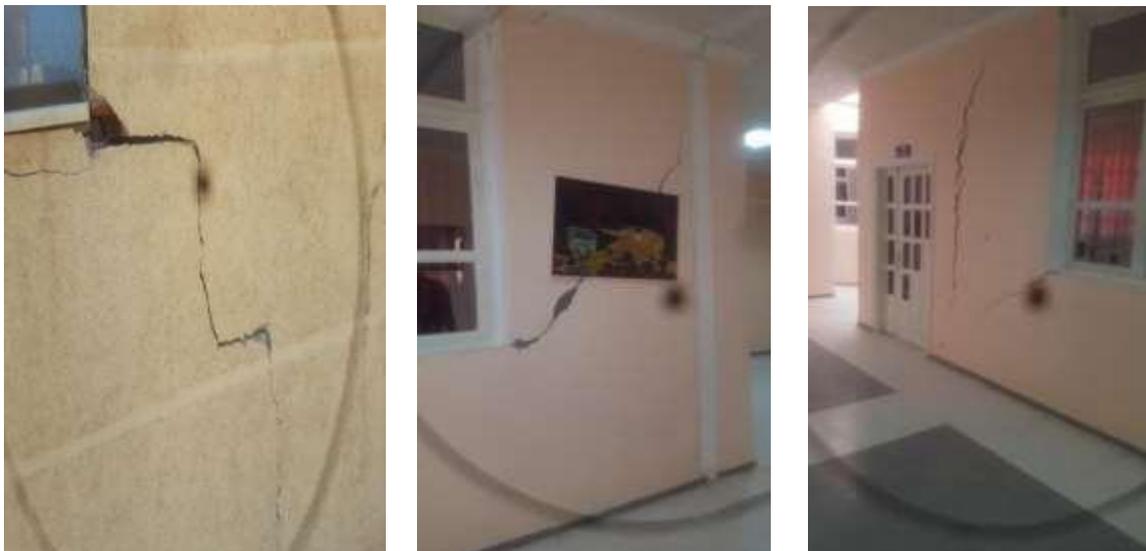


Figure I. 27. Fissuration dans les murs (Le Centre d'Enseignement Intensif des Langues(CEIL) de l'université de Biskra /Chetma).



Figure I. 29. De longues fissures jonchent le sol menant au parking (SNCF, 2019).



Figure I. 30. Fissuration sur les murs site de Sidi-Aissa/M'sila (Salem, 2018).



Figure I. 31. Dégradation d'une dalle béton par des racines d'arbuste ayant colonisé une fissure (CEIL de l'université de Biskra, Chetma, 2020).



Figure I. 28. Des fissures sont apparues sur la façade de l'immeuble de la rue Paul-Cézanne (Thibaut.C, 2019).

Chapitre I: Recherche bibliographique

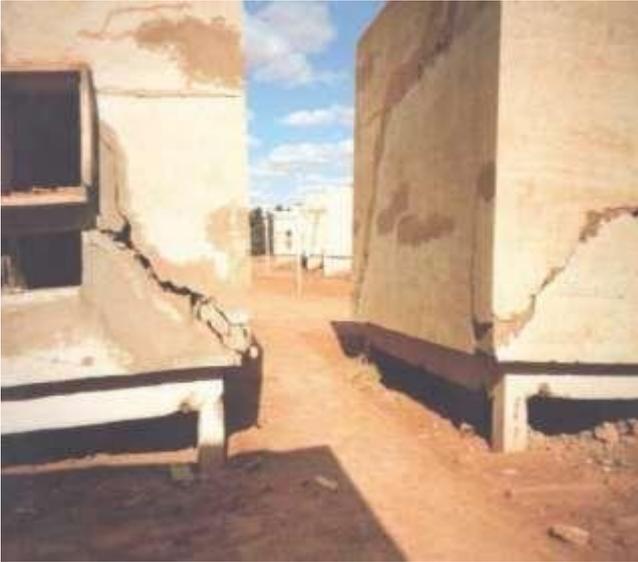


Figure I. 33. Fissures diagonales (Cité par Djaani et Benmansour, 2011).



Figure I. 32. Fissurations excessive sur les parois d'une cage d'escaliers (Bourabah, 2006).

6 Renforcement des sols argileux

Dans la construction, on peut choisir ses matériaux mais, pour ce qui est du sol, on est bien obligé de faire avec ce que la nature nous offre. Gr ce à des techniques innovantes, il est désormais possible de construire sur tous types de sols. Ainsi, le processus de renforcement des sols entraine des améliorations considérables des paramètres mécaniques tels que la stabilité, la capacité portante, les tassements et les déformations latérales. Le géotechnicien sonde et détermine les caractéristiques des sols afin de concevoir, les fondations des ouvrages. Le renforcement des sols même s'il est généralement invisible est la pierre angulaire de tout ouvrage construit sur un sol aux caractéristiques mécaniques médiocres. Les développements technologiques actuels en matière de renforcement des sols s'orientent vers des solutions techniques plus économiques et plus respectueuses de l'environnement.

- Les techniques de renforcement des sols communément utilisées sont:

Chapitre I: Recherche bibliographique

6.1 Traitement du sol par l'injection de la résine

La société procède aux tests qui permettent de calculer la résistance du sol , réalisés à intervalles réguliers, ils déterminent les niveaux d'injection pour chaque percement.

Des percements de \varnothing 18 mm sont effectués tous les 45 cm au perforateur-burineur, avec un angle de 10° par rapport au mur, afin d'optimiser la pénétration de la résine expansive, après ça dans chacun des trous qui serviront à acheminer la résine injectée dans le sol, l'opérateur introduit, à la main ou par "vibro-fonçage" – en s'aidant du perforateur en mode percussion – les tubes d'injection en acier, ensuite des bouchons de sécurité sont placés à l'extrémité de chaque tube pour éviter aux techniciens de se blesser durant l'opération. L'usage d'un niveau laser permet de suivre en temps réel l'effet des injections de résine, mais aussi de surveiller le comportement global du bâtiment ; l'injection de la résine à l'état liquide permet sa diffusion dans tous les vides et les interstices , les injections sont stoppées dès que le bâtiment est stabilisé , a la fin les tubes d'injection sont ensuite sectionnés à la base et les trous rebouchés ; la résine de polyuréthane est formulée de façon à présenter une poussée limitée, l'expansion définitive se faisant au bout de quelques secondes(Figure I. 34(H)). Cette technique à Figure I. 34.

- Après intervention, les fissures sont le plus souvent réduites, comme on le voit à Figure I. 35entre la phase avant injection et après. Comme pour l'extérieur, l'entreprise conseille d'attendre une année avant d'entreprendre des travaux de réfection, le temps que le bâtiment se soit parfaitement stabilisé.

Chapitre I: Recherche bibliographique



Figure I. 35. Mode opératoire de la technique de l'injection de la résine

(Source : ©2020 PGV Maison).

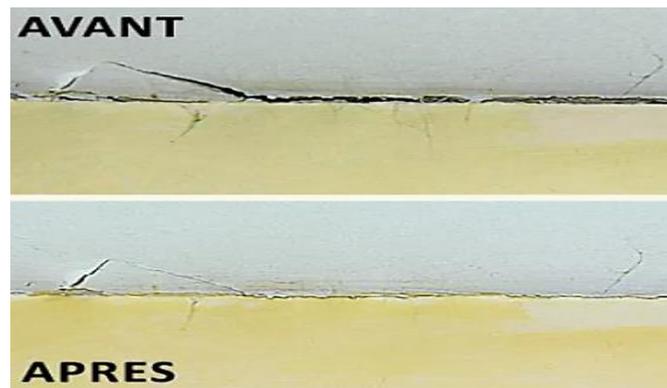


Figure I. 36. Photo les fissures entre la phase avant injection et après

(Source : ©2020 PGV Maison).

6.2 Renforcement des sols argileux par les fibres

Le sol standard renforcé par des fibres est défini comme une masse de sol contenant des éléments discrets distribués de manière aléatoire comme dans le cas d'utilisation des fibres qui améliorent le comportement mécanique du composite (sol-fibres). De plus, le sol renforcé par des fibres comporte comme un matériau composite dans lequel des fibres de résistance à la traction relativement élevée sont incorporées dans une matrice de sol.

Chapitre I: Recherche bibliographique

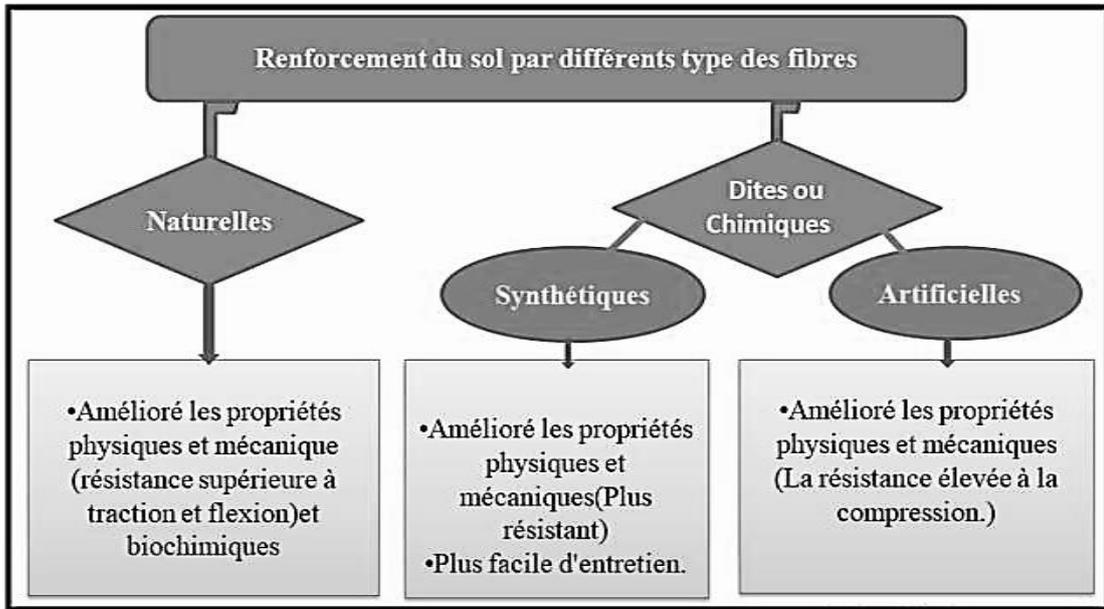


Figure I. 37. Schéma montrant les types de fibres utilisées pour renforcer le sol et son rôle.

On peut dire que sous l'appellation " fibres" se cache une grande famille de matériau qui a été introduite dans le commerce comme des nouvelles applications. Les fibres sont classées selon leurs origines :

- Naturelles
- Dites « Chimiques » : synthétiques et artificielles.

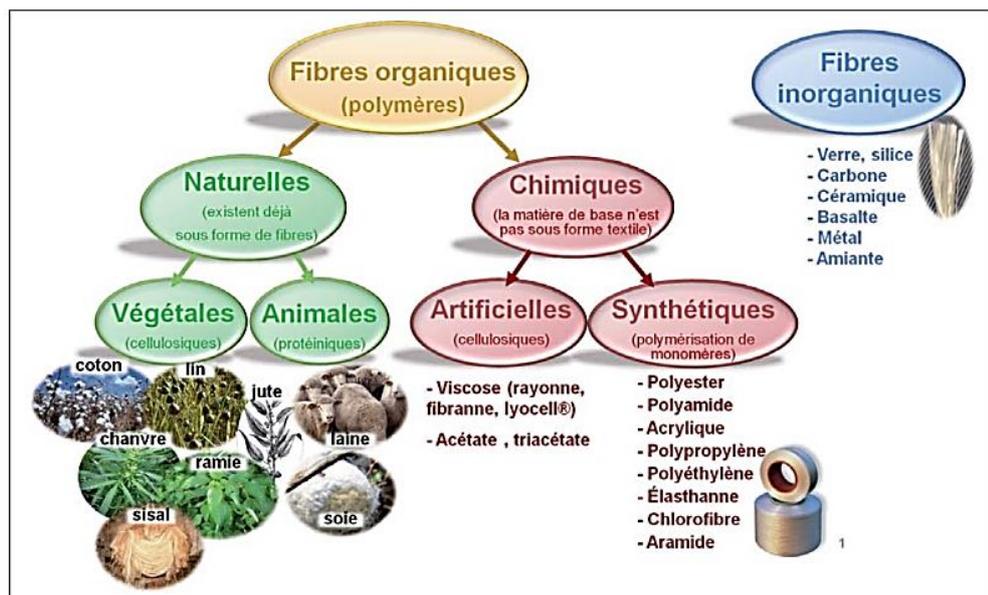


Figure I. 38. Classification des fibres selon leur origine (guz, 2011).

Chapitre I: Recherche bibliographique

6.2.1 Méthodes du renforcés les sols par fibres

Les sols renforcés de fibres peuvent être classés en deux types en fonction de leur méthode d'application :

- 1) Sol renforcé de fibres réparties orientées ODFS (Figure1.38 (a)), exemple de Tang, C et al ., 2010(Figure1.39).
- 2) Sol renforcé de fibres réparties de manière aléatoire RDFS (Figure1.38 (b)).

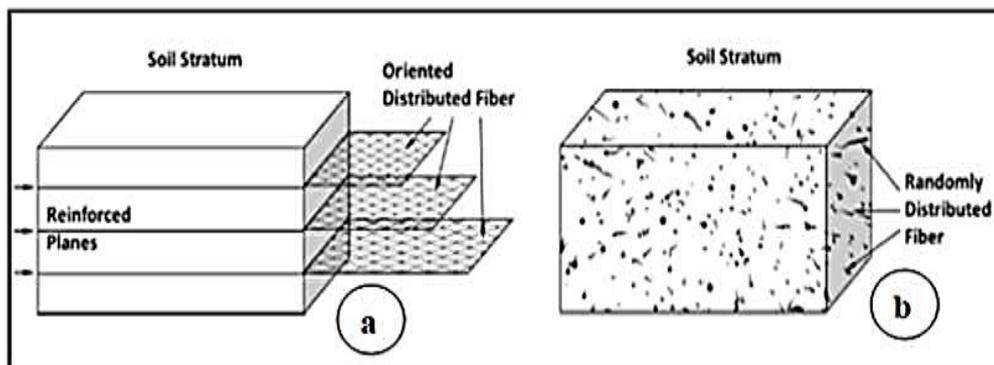


Figure I. 39. Schémas présentés les deux types de renforcement par fibre ODFS et (b) RDFS (Gowthaman et al., 2018).

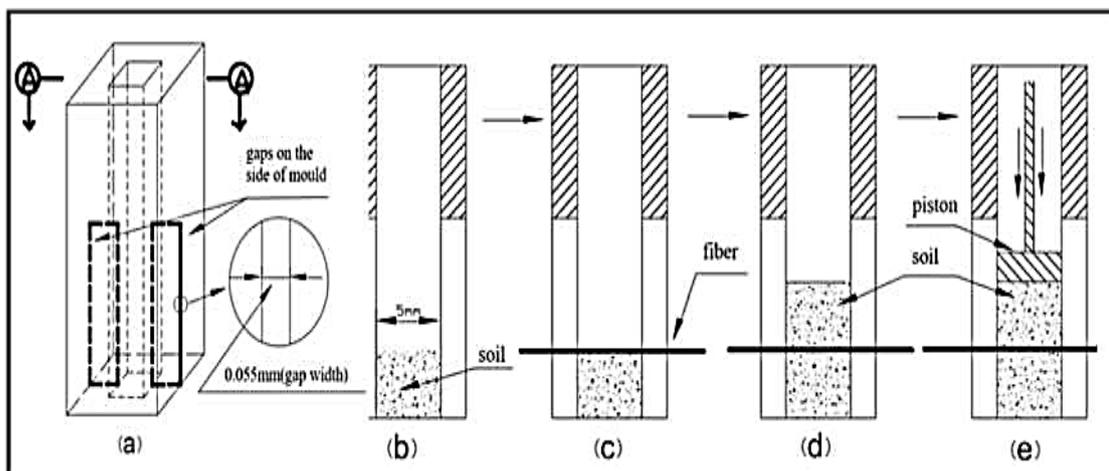


Figure I. 40. Schéma pour Croquis du processus de préparation du moule et des échantillons (ODFS) (Tang et al., 2010).

L'incorporation de RDFS est devenue plus populaire de nos jours, les fibres discrètes peuvent être simplement ajoutées et mélangées au hasard avec le sol, un peu comme le ciment, la chaux ou d'autres additifs, Figure I. 40 présente une méthode

Chapitre I: Recherche bibliographique

de RDFS utilisé pour mélange sol/fibre, les fibres sont mélangées de façon homogène dans le sol et jouent localement le rôle de renfort. De par la capacité du mélange sol/fibre à dissiper de l'énergie, cette technique est utilisée, entre autre, pour limiter les dommages qui pourraient survenir suite à l'explosion d'un réservoir de gaz. Là encore la mise en tension des éléments de renforcement est possible grâce au frottement entre les fibres et les grains ou par enserrement des grains dans le cas des fibres longues.



Figure I. 41. Protection d'un réservoir de gaz par un massif de sable renforcé par des fibres continues – Procédé Texsol [Source : © Photothèque J.P. Gourc]

Plusieurs études, portant sur le comportement de la fissuration des sols argileux renforcés par ajout des fibres, ont été effectués (Al Wahab et al., 1995 ; Bhadriraju et al., 2005 ; Freilich et al., 2008 ; Hariantoet al., 2008 ; Tang et al., 2012 ; Chaduvula et al., 2017).

Chapitre I: Recherche bibliographique

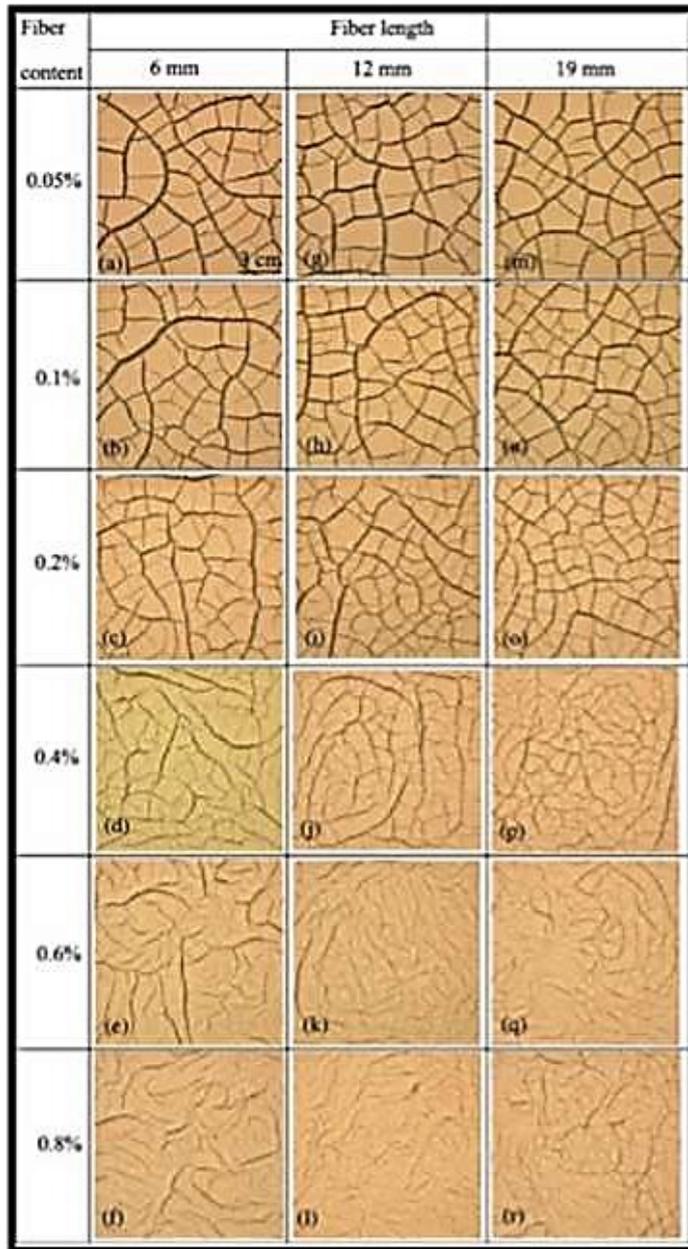


Figure I. 42. Schémas de fissures finales typiques des échantillons de sol avec différents contenus et longueurs de fibres (Tang et al., 2012).

A titre d'exemple **Tang et al ., 2012** ont étudié le comportement de la fissuration par dessiccation d'un sol argileux renforcée par ajout des fibres de type polypropylène en utilisant un système d'images numériques pour capturer l'évolution et la propagation des fissures dans le sol soumis à la dessiccation. Des différents essais expérimentaux en laboratoire ont été effectués en examinant les paramètres évolutifs des fissures qui ont constaté que l'augmentation du contenu en fibres de type polypropylène entraîne une diminution du ratio de surface de

Chapitre I: Recherche bibliographique

fissure (la surface des fissures sur la surface totale), du nombre de mottes, de la longueur des fissures, de la largeur moyenne des fissures et de la connectivité du réseau de fissures tandis que la surface moyenne des mottes, le nombre de nœuds par unité de surface, le nombre de segments de fissure par unité de surface et la densité de fissure augmentaient.

Les résultats obtenus ont montré que l'intégrité du sol avec l'ajout de fibres a été améliorée en raison de l'effet de pontage des fibres et la réduction de la fissure dans les échantillons renforcés de fibres a été d'environ 40% dans la plage de teneur en fibres de 0% à 0,8%.

Dans une autre étude, **Tang et al.,2016** ont enquêté sur le comportement en traction de sols renforcés avec des fibres de polypropylène dans une tentative à quantifier la contribution des fibres à la résistance à la traction des sols en effectuant une série d'essais de traction et de dessiccation sur des échantillons de sol renforcés / non renforcés. L'accent a été mis sur l'évaluation des effets de la teneur en fibres, teneur en eau et densité sèche. Une série d'essais de traction directe a été réalisé pour étudier la résistance à la traction de sols renforcés par fibres répartis de manière aléatoire RDFS. Les résultats obtenus indiquent que le comportement en traction du sol était influencé de manière significative par l'inclusion de fibres. La présence de fibres entraîne une augmentation de la résistance à la traction et une réduction de la fragilité à la rupture pour les éprouvettes sans inclusion de fibres, la contrainte de traction est tombée à zéro après rupture, par contre les éprouvettes renforcées par fibres reste certaines contraintes de traction résiduelles subsistaient après la rupture. La contrainte de traction résiduelle diminue progressivement avec l'augmentation du déplacement de traction. L'augmentation de la teneur en fibres à un effet bénéfique sur la résistance à la traction et la contrainte de traction résiduelle des sols renforcés avec les fibres. Il a été constaté que lorsque la teneur en fibres augmentait de 0 à 0,2% pour les échantillons compactés à 16,5% d'eau et 1 700 kg /m³ de densité sèche, la résistance à la traction augmentait à 51, 69 %.

Chapitre I: Recherche bibliographique

De plus, avec l'augmentation de la teneur en eau, la résistance à la traction des sols non renforcés et renforcés a diminué. Ainsi, avec augmentation de la densité sèche, la résistance à la traction des sols non renforcés et renforcés a augmenté de manière exponentielle.

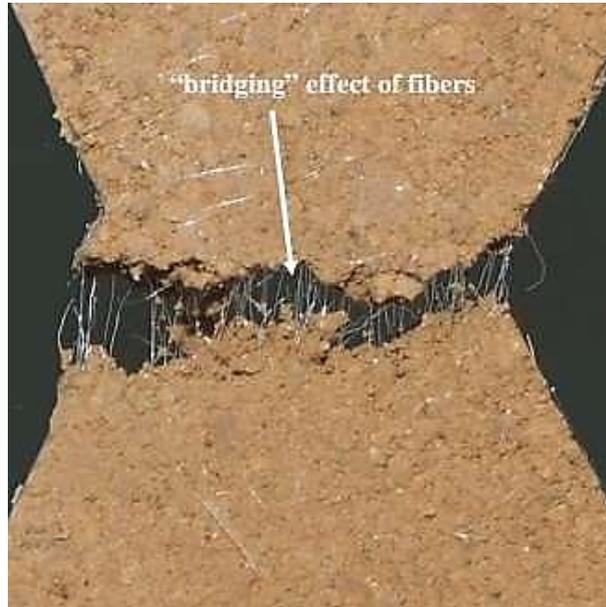


Figure I. 43. L'effet de pontage des fibres à travers l'ouverture des fissures (Tang et al., 2016).

Chapitre I: Recherche bibliographique

7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rapporté une étude bibliographique, il contient un aperçu de la littérature existante concernant la macroscopie et recherches microscopiques de fissures dans des matériaux argileux. Au niveau macroscopique, la définition des fissures dans un matériau argileux, les observations in situ et en laboratoire des fissures, le retrait et la dessiccation des sols, la Comportement hydrique des matériaux argileux, et la fissuration du sol, et les facteurs affectant sur la fissuration du sol sont présentés. La minéralogie des argiles, différentes techniques pour étudier la microstructure des argiles, l'influence des contraintes de traction et la succion sur le sol argileux, ont également été observé formation et le développement de fissures dans le sol argileux.

Le chapitre suivant est consacré à l'étude expérimentale menée au laboratoire de mécanique du sol à « MDS » situé au département du génie civil à Biskra. Nous allons mener des essais d'identification après nous allons préparer l'échantillon pour le tester, ensuite ont réalisé le type d'expérience indépendante et complémentaire l'analyse d'image des échantillons au cours du séchage sur matériaux argileux pour étudier le phénomène de dessiccation en parallèle avec le développement des fissures au cours du processus du séchage des sols argileux. Ces matériaux sont préparés sous forme de pâte et soumis au séchage à l'air libre et dans une boîte au bois. Un appareil photo numérique a été utilisé pour réaliser des successions de photos lors du processus de fissuration. Ces photos numériques sont analysées à l'aide du logiciel de traitement d'images. Ceci a permis de décrire qualitativement le développement des fissures au cours du retrait de ces matériaux de la région de Biskra à Guedila. Enfin, une conclusion générale clôture pour ce modeste travail.

CHAPITRE II : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA FISSURATION

1 Introduction

Quels que soient les objectifs recherchés dans une étude géotechnique, il est de règle d'effectuer initialement l'identification des sols concernés. Cette procédure permet d'orienter les analyses géotechniques ultérieures et surtout d'effectuer une classification des matériaux rencontrés; nous présentons dans ce chapitre les caractéristiques d'argile étudiées dans la wilaya de Biskra à Guedila et les dispositifs expérimentaux utilisés. Nous décrivons brièvement les procédures d'essais réalisés dans le cadre de ce travail et les raisons d'utilisation de chaque essai, ainsi que les protocoles expérimentaux développés dans le cadre de cette étude et dans ce travail un dispositif couplé à une méthode d'analyse d'images a été développé afin de quantifier l'aire des fissures et le retrait des éprouvettes de sol soumises à des sollicitations hydriques. Ce dispositif permet d'étudier l'évaporation de l'eau sur la fissuration d'éprouvettes de sol argileux et l'utilisation de la technique de traitement d'images pour quantifier et caractériser les motifs de fissures obtenus.

2 Prélèvement du sol

Le matériau utilisé pour l'étude des mécanismes de fissuration due à la dessiccation est l'argile naturelle venant de la région de Biskra à Guedila (Figure II.1).



Figure II. 1. Extrait de la zone de prélèvement de l'argile du Biskra à Guedila

(À partir de Google Earth).

Chapitre II : Étude expérimentale de la fissuration

3 Essais d'identification

3.1 Procédure expérimentales

Pour une bonne étude, il est nécessaire de disposer de certaines données relatives aux propriétés différentes tailles qui le compose. Les essais qui conduisent à cette étude portent les noms d'Essais d'identification et l'objet est d'introduire les paramètres d'état et d'identification menant à la classification géotechnique des sols. Voilà je vais commencer par les essais comme suit:

3.1.1 Analyse granulométrique par tamisage et sédimentation

Méthode par sédimentation selon NF P 94-057/mai1992.

Méthode par tamisage à sec après lavage selon NF P 94-056/mars 1996.

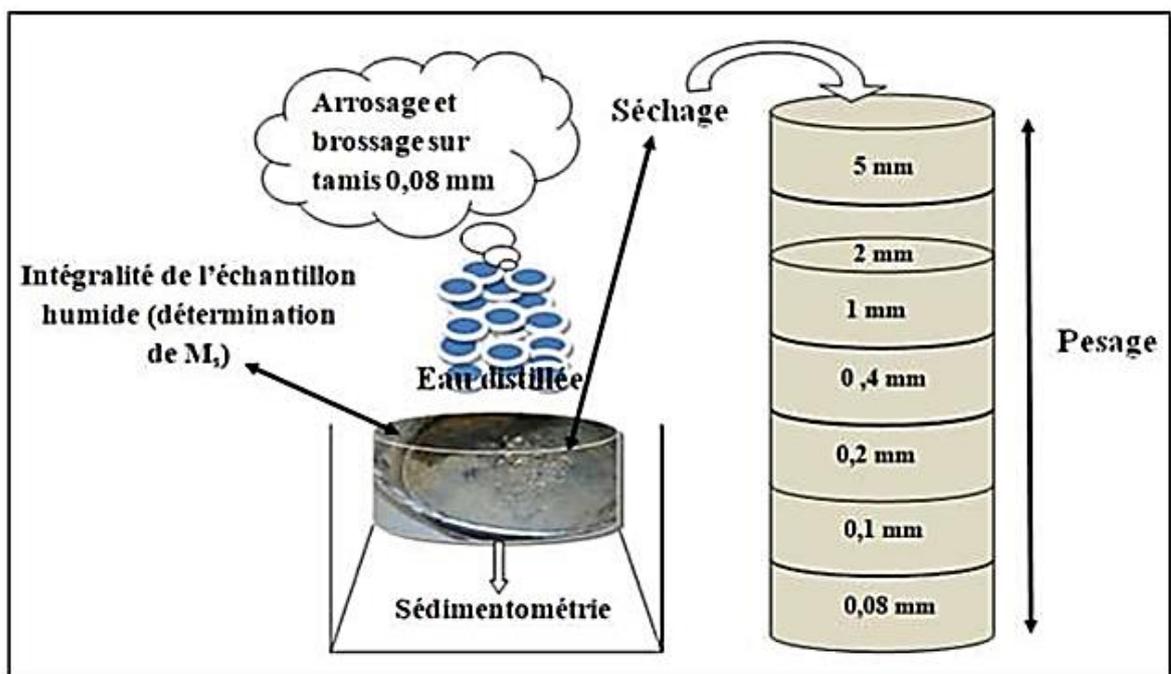


Figure II. 2. Schéma d'analyse granulométrique par tamisage et sédimentation.

Chapitre II : Étude expérimentale de la fissuration



Figure II. 3. Photos montrant l'essai de tamisage.

Tableau II. 1. Les résultats de l'analyse de granulométrie par tamisage des échantillons.

Poids de l'échantillon (g)	Tamis (mm)	Poids refus partiel(g)	Poids refus cumulés(g)	Poids refus cumulés (%)	Tamis âtes (%)
500	5	1,27	1,27	0,254	100
	2	4,42	5,69	1,14	99
	1	1,41	7,1	1,42	99
	0,4	1,33	8,43	1,69	98
	0,2	0,46	8,89	1,78	98
	0,1	1,31	10,2	2,04	98
	0,08	0,05	10,25	2,05	98



Figure II. 4. Préparation de l'échantillon pour l'essai sédimentométrique.

Chapitre II : Étude expérimentale de la fissuration

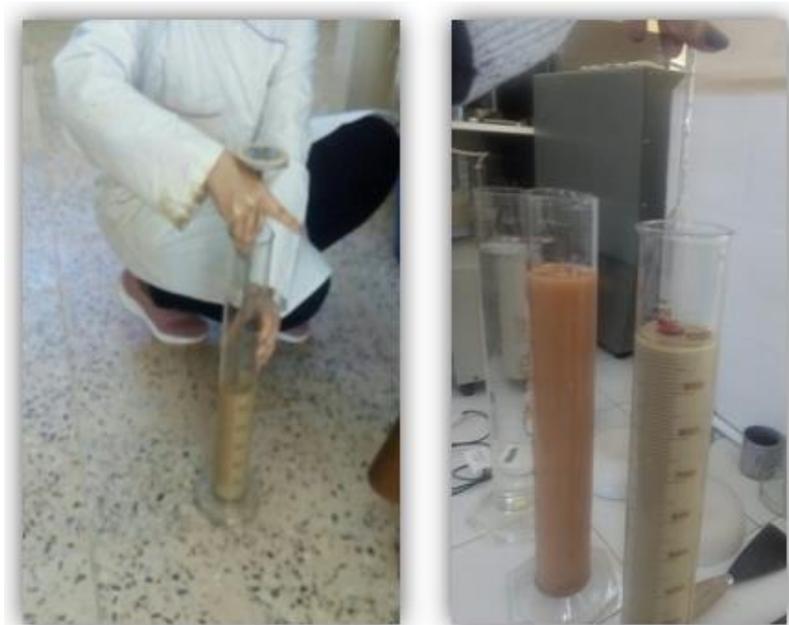


Figure II. 5. Photos montrant le mode opératoire de l'essai de sédimentométrie.

Tableau II. 2 : Résultats de l'analyse de granulométrie par sédimentation des échantillons.

Poids de l'échantillon (g)	Essai Sédimentométrique	Durée ''=Seconde '= Minute	Date 4/02/2020	Lecture	Diamètre équivalent	Tamisât (%)
40 g	Température C°	Durée Seconde, Minute, heure	Heure	Lecture	75µm	98
	18,9	30''	10,41	24	55µm	94,05
	18,7	1'	10,42	24	38µm	94,05
	18,5	2'	10,43	23	25µm	94,05
	18,6	5'	10,46	23	17µm	90,1
	18,5	10'	10,51	23	12µm	86,15
	18,7	20'	11,01	22	8µm	82,21
	18,5	40'	11,21	21	5µm	78,26
	19,4	80'	12,01	20,5	2µm	58,52
	19,3	240 h	14,40	20		
	19,4	1440 h	10,40	20		

Chapitre II : Étude expérimentale de la fissuration

Après avoir fait passer le matériau dans une série de tamis de différents diamètres, et le tamisât qui passe par le dernier tamis 0,08, il s'incorpore par la sédimentation comme le montrent les schémas suivants (Figure II. 5):

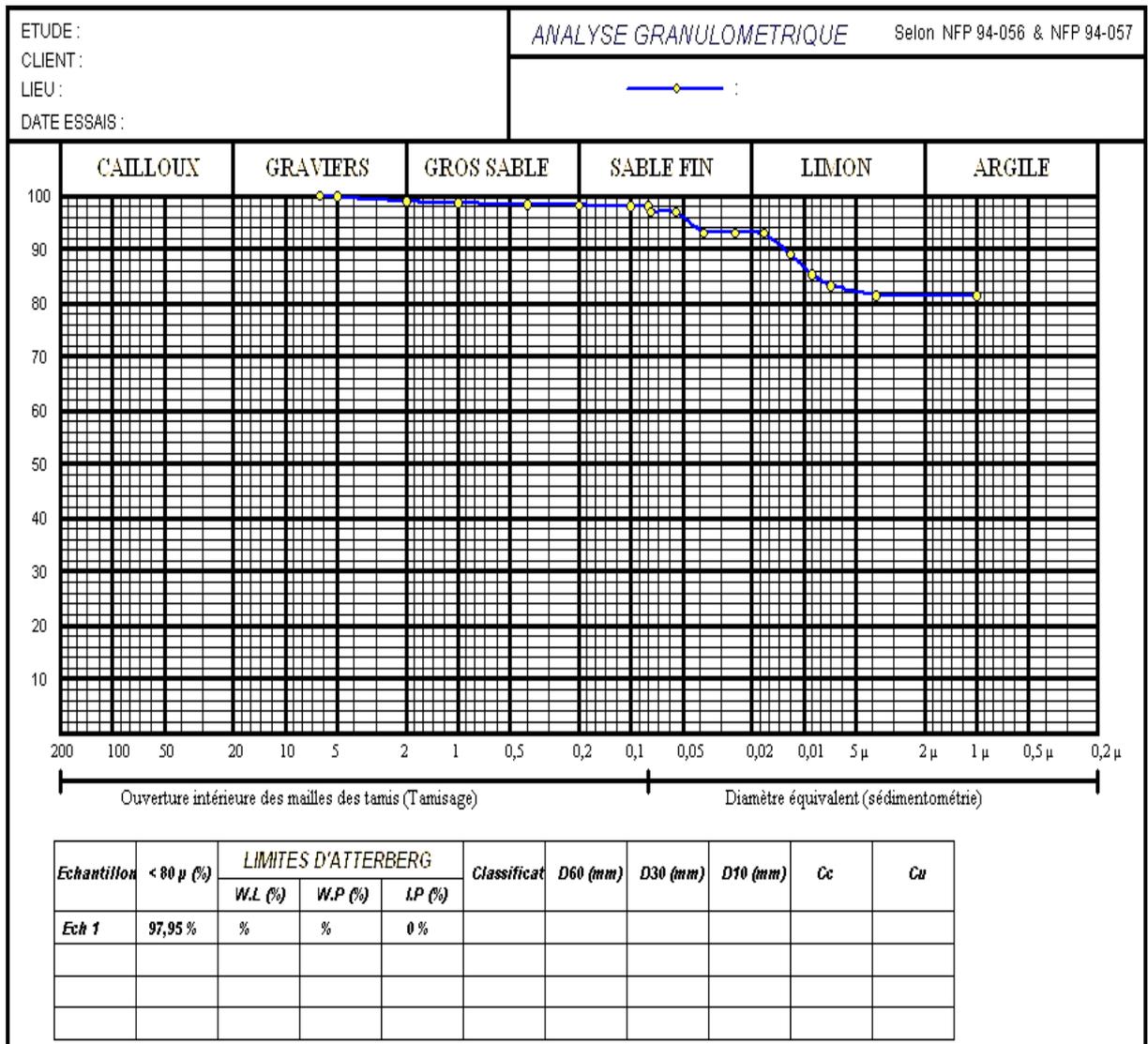


Figure II. 6. Courbe d'analyse granulométrique de l'échantillon (soil test).

a) Interprétation des résultats

Dans cet essai, nous avons remarqué que la courbe granulométrique de l'échantillon de Biskra contient 5% sable et 13% limon et de 82 % argiles, d'après les systèmes de classification triangulaire on attribue donc à cet échantillon de sol utilisé l'appellation d'argile.

Chapitre II : Étude expérimentale de la fissuration

3.1.2 Limite d'Atterberg (Selon NF P 94-051 MARS 1993.)

3.1.2.1 Limite de liquidité WL



Figure II. 7. Exécution de l'essai de la limite de liquidité.

Tableau II. 3: Présentation des résultats obtenus de limite de liquidité d'argile.

Limite de liquidité WL						
Essais	1 ^{er} essai		2 ^{ème} essai		3 ^{ème} essai	
N de tare	W L 1	W L 2	W L 3	W L 4	W L 5	W L 6
N coupes	15	15	26	26	31	31
Poids tare	20,89	20,57	20,70	20,94	20,45	20,68
Poids humide + Poids tare	28,41	29,76	28,02	29,25	27,37	27,84
Poids humide	7,52	9,19	7,32	8,31	6,92	7,16
Poids sec + P tare	24,23	24,65	24,08	24,79	23,83	24,17
Poids sec	3,34	4,08	3,38	3,85	3,38	3,49
Poids eau	4,18	5,11	4,46	4,46	3,54	3,67
Tenure en eau	1,251	1,252	1,31	1,15	1,04	1,05
Moyenne W%	125,2		116,2		104,95	

a) Interprétation des résultats

Le tableau montre que les valeurs des limites de liquidité sont élevées et comprise entre 104,94% et 125,2%.

Chapitre II : Étude expérimentale de la fissuration

3.1.2.2 Limite de plasticité WP



Figure II. 8. La mesure des limites de plasticité des différents échantillons.

Tableau II. 4 : Les résultats des poids de l'essai de limite de plasticité.

Limite de plasticité WP			
Essais	1 ^{er} essai	2 ^e essai	3 ^e essai
N de tare	W P1	W P 2	W P 3
Poids tare	13,89	13,68	13,42
Poids humide + Poids tare	16,68	16,73	16,40
Poids humide	2,79	3,05	2,98
Poids sec + P tare	15,86	15,81	15,52
Poids sec	1,97	2,13	2,10
Poids eau	0,82	0,92	0,88
Teneur en eau	0,4162	0,4319	0,4190
Teneur en eau (W%)	41,62	43,19	41,90
WP= 42,23			

Après le calcul WL et WP on déterminera IP et IC des deux échantillons comme il est présenté dans tableaux suivants:

Chapitre II : Étude expérimentale de la fissuration

Tableau II. 5: Conclusion sue prélèvement.

Conclusion			
Teneur en eau de plasticité	41,62	43,19	41,90
Limite de liquidité WL=113,305		Indice de plasticité IP=71,07	
Limite de plasticité WP =42,23		IP > 40 Argiles très plastique	

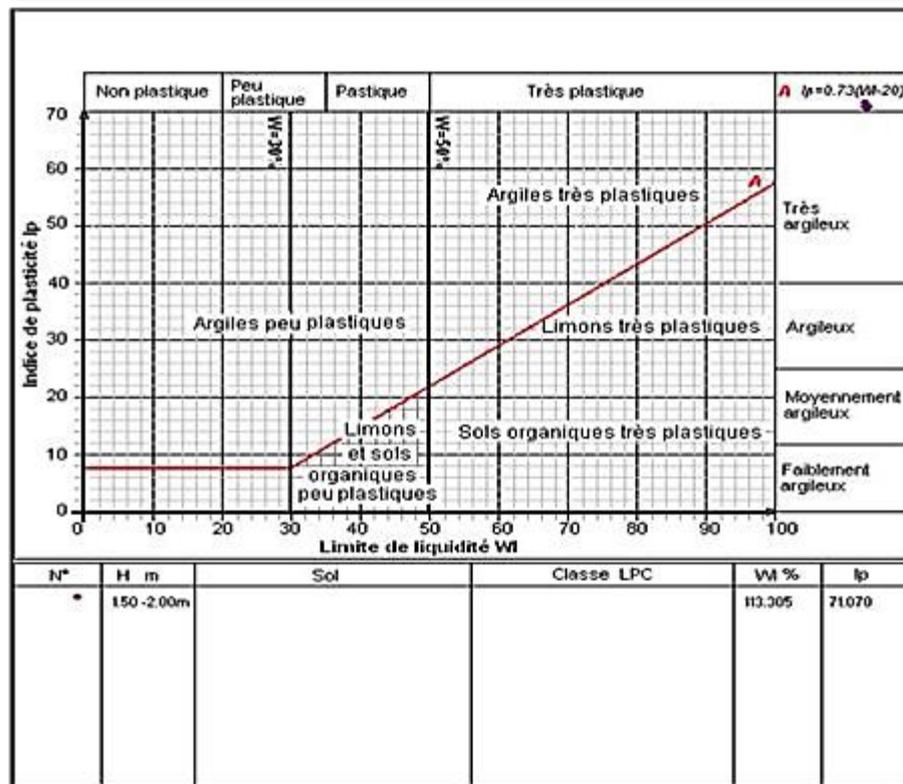
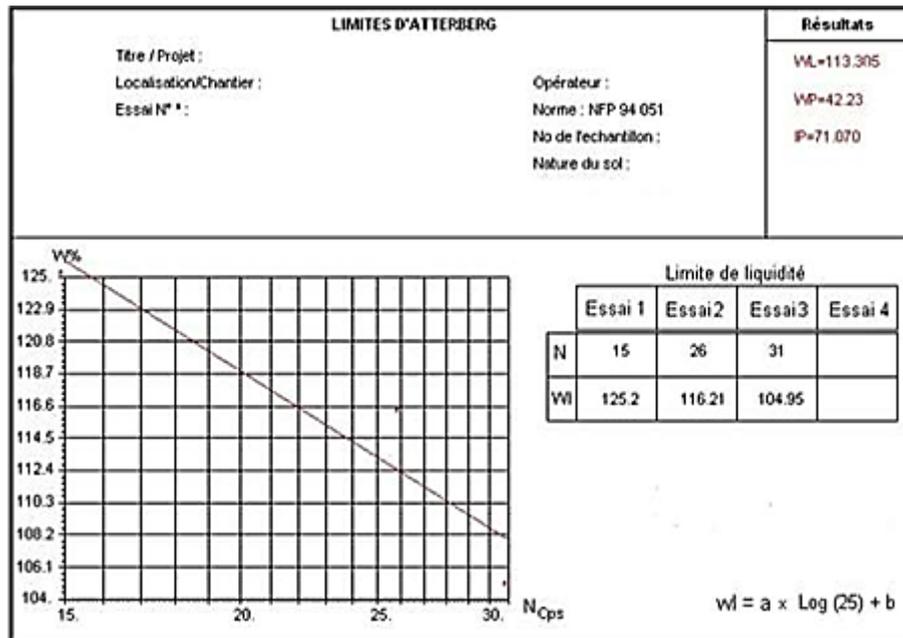


Figure II. 9.Emplacement de prélèvement d'après le diagramme de plasticité.

Chapitre II : Étude expérimentale de la fissuration

a. Interprétation des résultats

Les valeurs de limite de liquidité des argiles sont élevées et comprise entre 104,95% et 125,2% et l'indice de la plasticité est compris $IP=71,07 > 40$

D'après le positionnement du couple WL et IP des deux échantillons sur le diagramme de plasticité, on constate que les argiles de Biskra se situent à la classe I: argile très plastique.

I.1.1 Valeurs au bleu de méthylène Selon NF P 94-068 Octobre 1998



Figure II. 10. Application des taches sur papier filtre (Réalisation de l'essai au Bleu de Méthylène).

a. Calculs et expression des résultats

L'auréole bleu clair détermination du volume total du bleu induit dans la suspension
 $V=75\text{ml}$

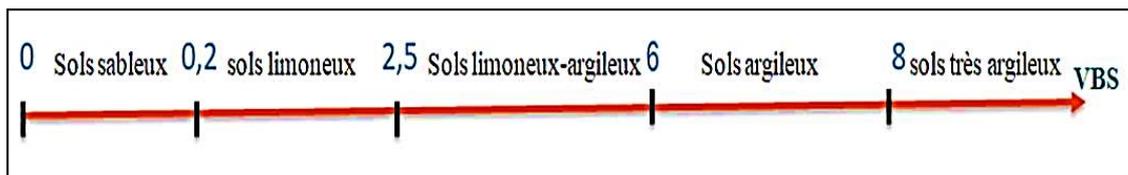


Figure II. 11. Ordres de grandeur (Type de sol en fonction de la valeur «VBS »)
(INSA-Institut National Des Sciences Appliqués).

$$VBS = \frac{V}{m_0} \cdot 100 = \frac{75 \times 0,01}{10} \cdot 100 = 7,5$$

b. Interprétation des résultats

Nous avons remarqué que les valeurs au bleu de méthylène obtenues sur le prélèvement qu'on a effectuées, donc d'après VBS (Figure II . 11) le sol c'est un sol argileux et d'après les seuils de classification en techniques routières, le sol possède une très plasticité selon l'histogramme (Figure II . 9).

Chapitre II : Étude expérimentale de la fissuration

4 Protocole expérimental

Ce dispositif expérimental a été développé dans le cadre de thèse doctorat M^{elle} Zeroual Afaf au sein de laboratoire mécanique des sols de l'université de BISKRA.

L'objectif de ce protocole est d'identifier les mécanismes conduisant à l'apparition de la fissuration par dessiccation. Pour cela, on a réalisé le type d'expérience indépendante et complémentaire l'analyse d'image des échantillons au cours du séchage.

4.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental se compose : boîte en bois de séchage avec dimensions (70*70*70) cm (Figure II. 12), polyester placé à l'intérieur du boîtier caméra et des lampes (Figure II. 13), une balance électrique et un thermo hygromètre (Figure II. 14). Durant le processus de séchage des échantillons, des photos sont prises à l'aide d'un appareil photo avec une bonne résolution. L'appareil utilisé dans notre montage est un Canon EOS 1300D. L'appareil est fixé sur la surface du boîtier (sur le centre du couvercle de boîte) et la mise au point de l'objectif est effectuée automatiquement au début de chaque expérience et reste la même tout au long de l'essai avec des photos sont prises à des intervalles de temps constants (5 min) afin de faciliter l'analyse des images par logiciel de traitement.

Chapitre II : Étude expérimentale de la fissuration



Figure II. 13. Schéma 3D pour dispositif expérimental.



Figure II. 12. Photos la caméra et les lampes.



Figure II. 14. Photos d'une balance électrique et un thermo hygromètre.

Chapitre II : Étude expérimentale de la fissuration



Figure II. 15. Photos de la boîte.

4.1.1 Rôle de chaque outil/appareillage utilisé

- La boîte en bois utilisée pour protéger l'échantillon à conduction climatique.
- Polyester comme isolant pour utiliser juste les effets de la boîte et l'absorption de l'humidité.
- Un thermo hygromètre pour suivre la température et d'humidité relative.
- Les échantillons sont éclairés à l'aide des lampes.
- Camera pour prise des photos
- Ordinateur pour installer logiciel de traitement à cause d'analyse des images (des photos).
- Une balance électrique pour mesurer le poids de l'échantillon.

4.2 Analyse des fissures avec logiciel VIC-2D

Le suivi du champ de déformation à la surface de l'échantillon est réalisé à l'aide d'un logiciel de corrélation d'images VIC-2D. La surface de l'échantillon est munie d'une texture aléatoire (mouchetis) pour permettre de déterminer l'évolution du champ de déplacement des points et recalculer ainsi le champ de déformation (Figure II.16).



Figure II. 16. L'interface d'utilisateur de logiciel VIC-2D.

4.2.1 Avantage et convenions de logiciel

Le VIC-2D a été considérablement mis à niveau et est disponible aujourd'hui car le VIC-2D s'est avéré être le système DIC 2D le plus rapide et le plus robuste du marché. Le Vic-2D est un système innovant qui utilise la technique de corrélation d'images numériques pour fournir des mesures (des données) de déplacement et de déformation bidimensionnelles dans une carte de contour bidimensionnelle pour des échantillons de surface plane (déplacement) (Correlated Solutions, 2020). Ainsi, les caractéristiques connues les plus importantes résident dans:

- Le logiciel est le logiciel DIC 2D le plus flexible et le plus puissant du marché.
- Algorithmes de déformation améliorés pour des résultats plus rapides et plus précis avec une lecture d'animation plus rapide.
- Widget graphique pour afficher plusieurs extractions de données sur un graphique (points, tranches de ligne, cercles, rectangles et extensomètres).
- Les résultats peuvent être affichés dans des unités sélectionnables par l'utilisateur, telles que les pouces et les micromètres.
- Le système VIC-2D mesure les déplacements dans le plan et les

Chapitre II : Étude expérimentale de la fissuration

déformations de plus de 2000% avec une résolution de mesure aussi faible que 10 microtraces in possibles.

- Des tailles d'échantillons allant de microns à mètres sont mesurées facilement.

5 Préparations de l'échantillon

5.1 Préparation d'échantillon

Le sol a initialement été placé dans l'eau pendant 24 heures ou plus, puis lavé sur un tamis de 0,4 mm. Puis il est laissé pour obtenir une boue homogène (Figure II. 17).



Figure II. 17. Préparation d'échantillon.

5.2 Préparation d'échantillon pour coloration d'image

L'échantillon préparé initialement sous forme de boue est versé dans une coupelle circulaire de 11,5 cm de diamètre et de 1,5 cm d'épaisseur. Ensuite on effectue des petites vibrations à l'échantillon pour vous débarrasser des bulles d'air. Ensuite, on prépare un échantillon pour la coloration d'image. On pulvérise la surface de l'échantillon avec peinture blanche, puis on met des points noirs avec la peinture noire pour étudier le déplacement de ce point (Figure II.18).

Chapitre II : Étude expérimentale de la fissuration



Figure II. 18. Préparation d'échantillon pour coloration d'image, (A) coupelle vide, (B) L'échantillon est placé dans la coupelle, (C) Pulvé à surface de l'échantillon peinture blanche et points noirs par la peinture noire.

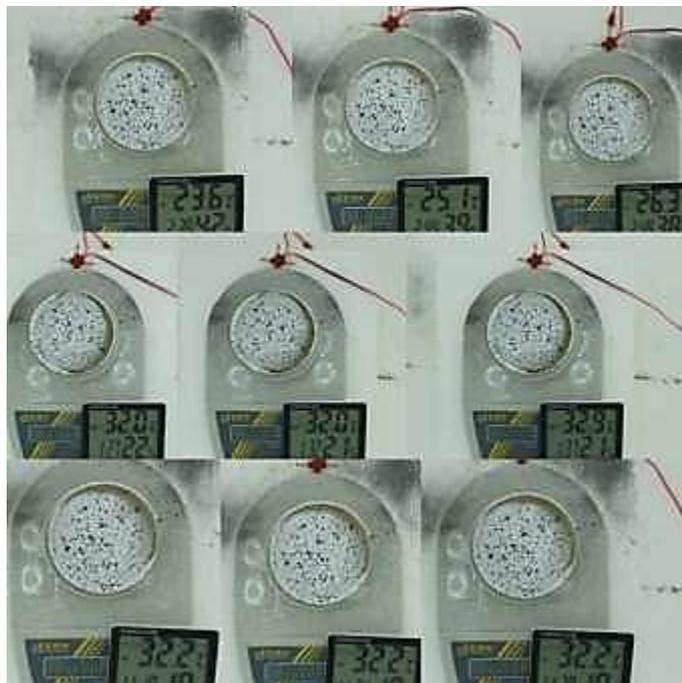


Figure II. 19. Images de l'éprouvette à différents temps obtenus par l'appareil photo (Échantillon au cours du séchage libre pendant 3 jours).

6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré le dispositif et la procédure expérimentale utilisée pour l'étude expérimentale sur les fissures due à dessiccation sur un échantillon d'argile de wilaya du Biskra. Nous avons caractérisé la nature du sol utilisé et présenté le protocole expérimental pour l'étude avec la préparation d'échantillon pour le test.

Les résultats des essais effectués sur l'échantillon du sol fissuré sont présentés et discutée dans le chapitre trois.

CHAPITRE III : RÉSULTAT PRÉLIMINAIRE ET INTERPRÉTATION

1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents résultats et des remarques obtenus à partir des essais expérimentaux, suivie par des discussions et des interprétations. Ces résultats sont limités à des premiers essais réalisés sur le dispositif expérimental développé au laboratoire.

2 Vérification des paramètres d'influence

2.1 Température et l'humidité

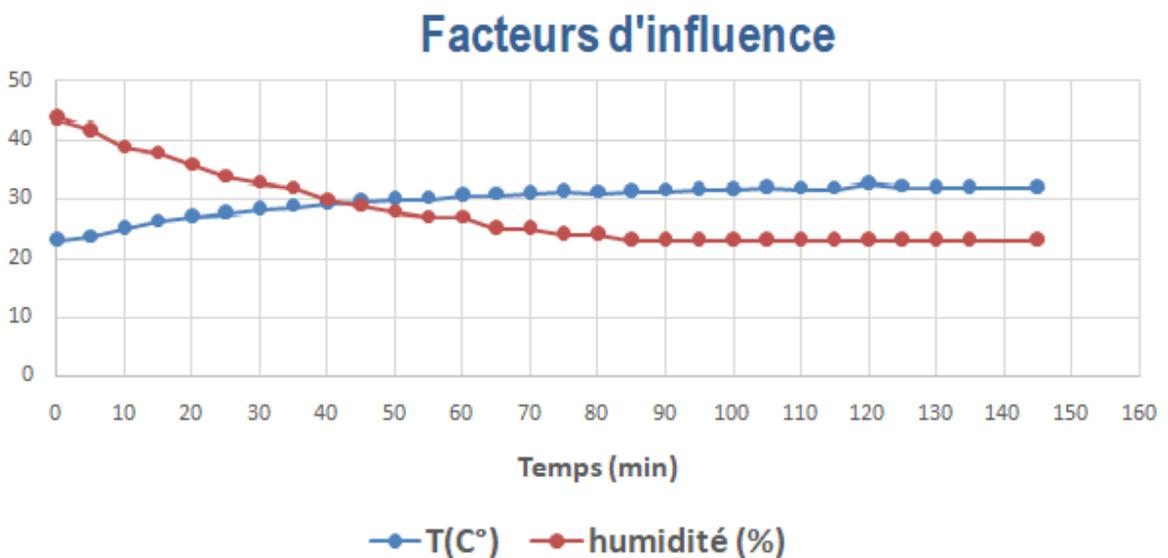


Figure III. 1. Courbe présentée l'effet de la température et l'humidité en fonction du temps.

❖ Discussion

La Figure III-1 montre un résultat préliminaire de l'effet de la température et l'humidité en fonction du temps d'un échantillon sous séchage pendant 145 minutes. En suivant les valeurs de température et d'humidité, nous observons que ces deux paramètres sont inversement proportionnels.

Chapitre III : Résultat préliminaire et interprétation

On observe que la température augmentée avec le temps, puis elle se stabilise à une valeur de 32 °C. L'augmentation de la température de 23 °C à 32 °C soit pourcentage de 39,56 % est expliquée par la chaleur induit par les lampes installés sur le boitier. Pour cela nous proposons proposé comme solution le changement des lampes utilisés par des lampes Fluos (les lampes Fluos fournissant un éclairage froid afin de ne pas perturber la température ambiante de séchage des échantillons). En ce qui concerne l'humidité nous remarquons qu'il diminue avec l'augmentation du temps de 44 % jusqu'à 23% et le pourcentage de diminution a été estimé 47,72 %. Cette diminution relativement rapide est expliquée par l'augmentation de la température.

3 Résultat préliminaire du l'essai de fissuration par dessiccation

3.1 Effet du séchage sur la masse d'échantillon

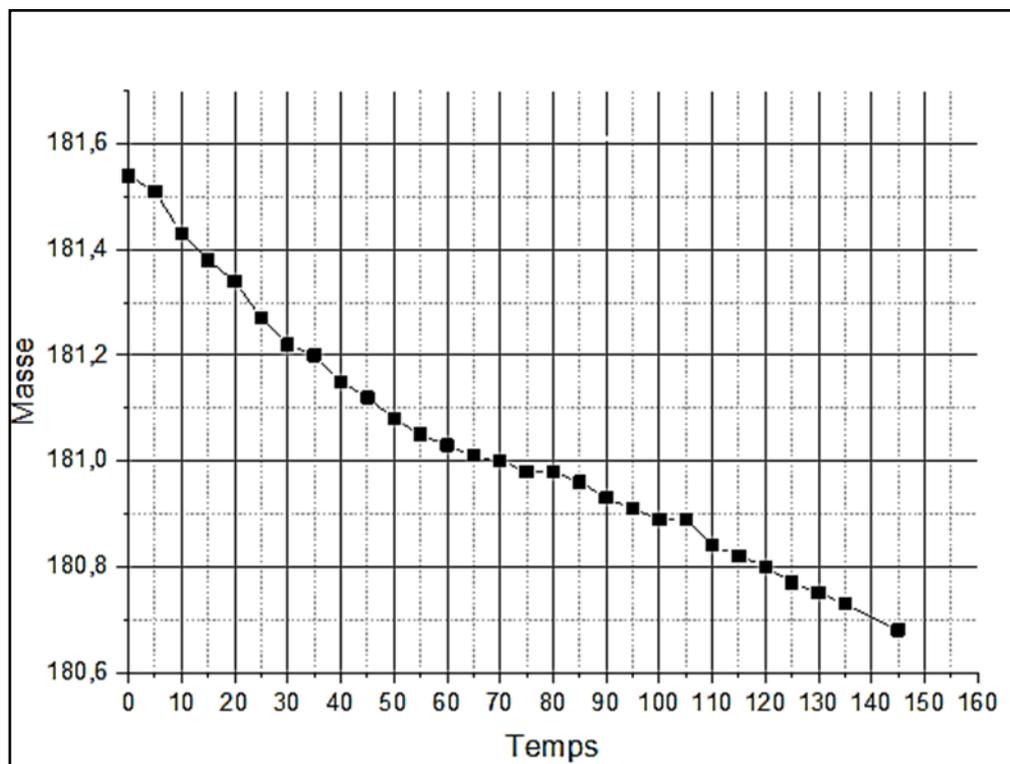


Figure III. 2. La variation de la masse(g) d'un échantillon en fonction du temps (min).

Chapitre III : Résultat préliminaire et interprétation

❖ Discussion

La courbe de la figure III-2 présente l'évolution de la masse en fonction du temps. La diminution de la masse observée sur la courbe durant 9 heures est expliquée par la perte d'eau au sein de l'éprouvette d'argile

La masse diminue avec le temps et cette diminution est relativement légère et uniforme qui varie entre 0,05g et 0,07g à chaque 5 min, a cause de l'évaporation de l'eau dans le sol. Malheureusement, la courbe de séchage n'a pas été terminée en raison de la perte de nombreuses valeurs de poids d'échantillon à cause de la fin de la charge de la caméra.

4 Analyse d'image par VIC2D

Pour commencer, démarrez Vic-2D. Cliquez sur le bouton de la barre Speckle images (Figure III. 3) (Ou sélectionnez Projet... Speckle images, dans la barre de menus) et accédez au dossier dans lequel vos images de test sont stockées. Sélectionnez vos images de test (Figure III. 4) et cliquez sur Open. La première image apparaîtra dans une fenêtre, cette image est l'image de référence; ce sera l'état de référence et toutes les déformations et déplacements seront relatifs à cette image. Par défaut, la première image de la séquence est la référence.



Figure III. 3. L'interface d'utilisateur de logiciel VIC-2D.

Chapitre III : Résultat préliminaire et interprétation

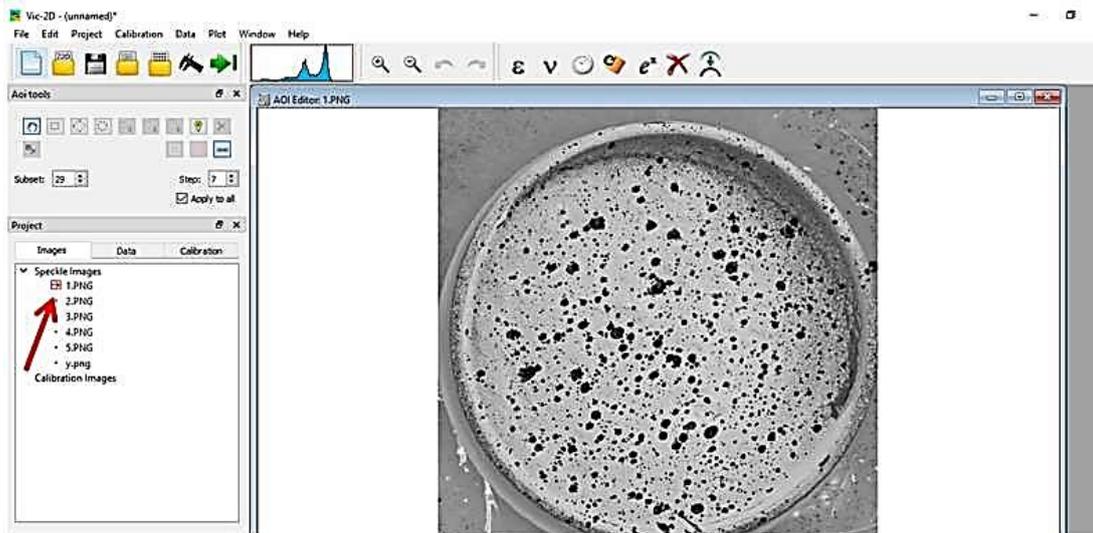


Figure III. 4. Image de référence par VIC 2D.

Cliquez sur Edite puis create Circular ou sélectionnez votre zone d'intérêt (AOI) à l'aide de l'outil Circular dans la barre d'outils AOI.

- Choisissez la zone d'échantillon que vous souhaitez évaluer.
- Pour définir l'Aoi (zone rouge), cliquez sur un coin d'Aoi, déplacez la souris dans le coin opposé et cliquez à nouveau.

S'il y a une zone indésirable (sans motif de moucheture) à l'intérieur du Aoi, cliquez sur «Cut from Aoi».



Figure III. 5. Sélectionnez la zone testée.

Chapitre III : Résultat préliminaire et interprétation

Cliquez sur « Create start Point ».

- Sélectionnez un point de départ à l'intérieur de l'Aoi.
- Il est fortement recommandé de sélectionner un point où les taches noires sont faciles à identifier.

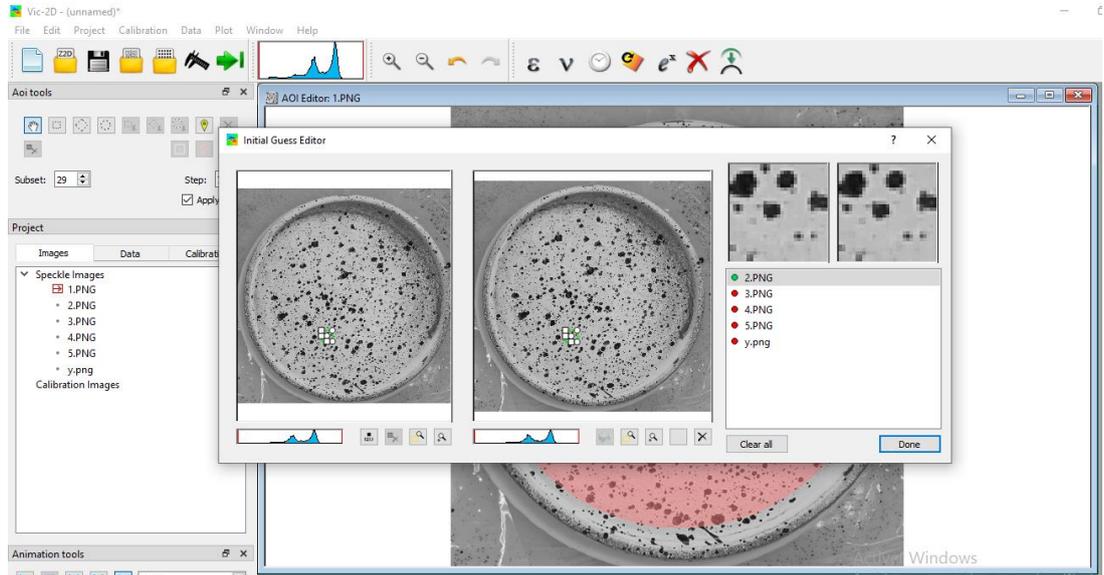


Figure III. 6. Créer un point de départ.

Cliquez sur Edite puis cliquez sur Suggestsubset size.

- Une nouvelle fenêtre apparaîtra, il limiter les nombres du pixel automatiquement par VIC 2D.

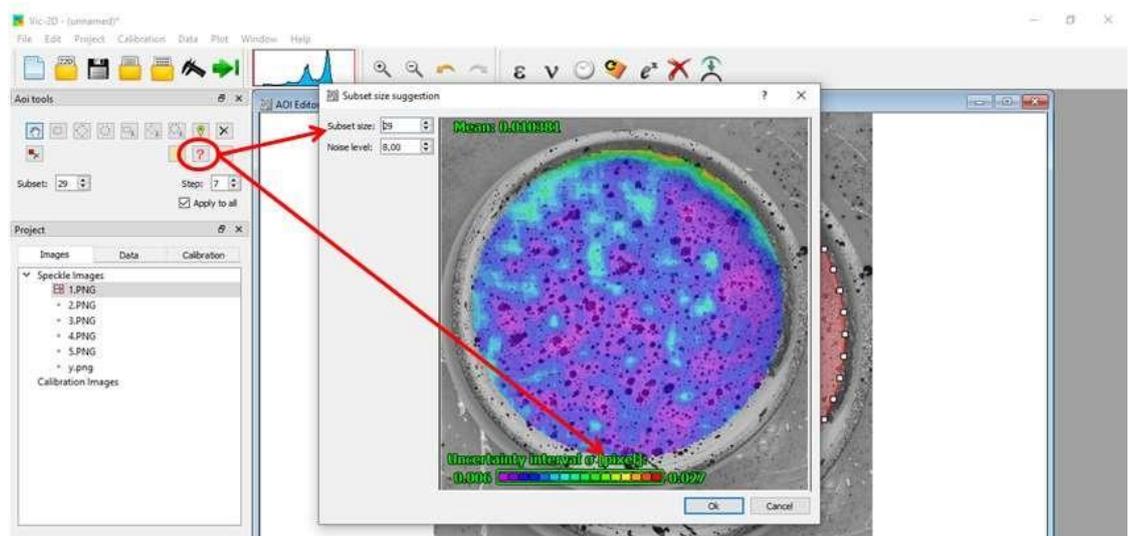


Figure III. 7. Suggérer la taille du sous-ensemble (pixel).

Chapitre III : Résultat préliminaire et interprétation

Cliquez sur «Run Correlation».

- Une nouvelle fenêtre apparaîtra (Vic2D).
- Appuyez sur «Run» pour démarrer la corrélation.

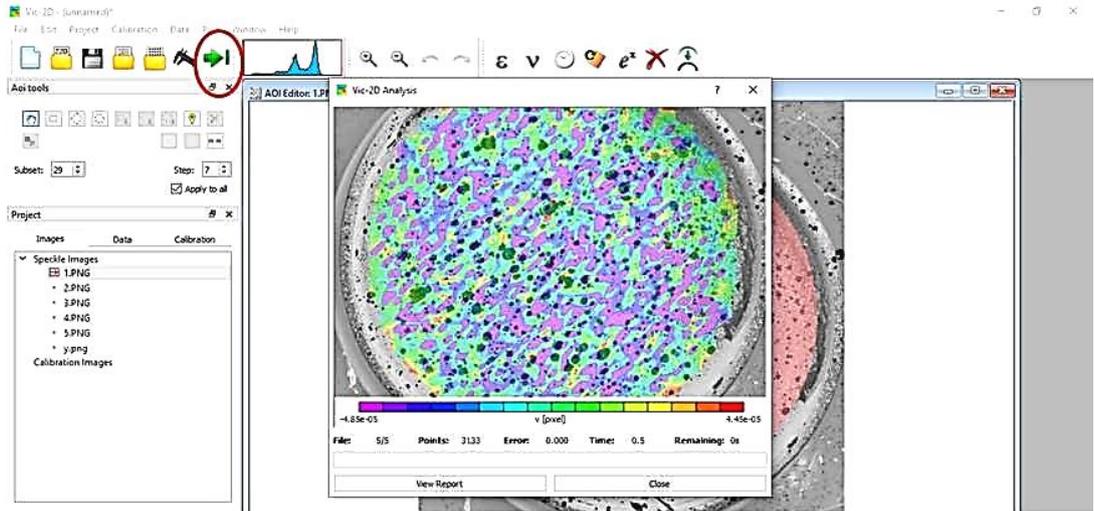


Figure III. 8. L'analyse d'image d'échantillon par coloration.

Malheureusement le logiciel VIC 2D ne pas donner le résultat attendu par ce qu'il y a défaut dans l'utilisation de la peinture (mouchtie), a causé la peinture blanche masquer les fissures.

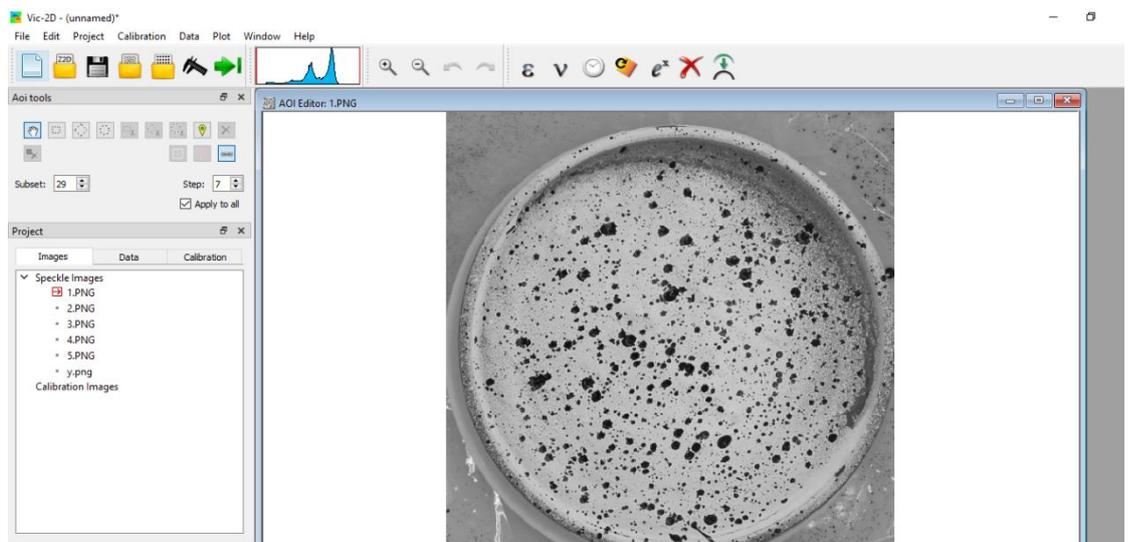


Figure III. 9. Aucune fissure n'apparaît à cause de la peinture blanche.

5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons discuté sur les résultats de l'étude expérimentale sur les fissures par dessiccation dans un échantillon d'argile et fait l'interprétation nécessaire.

Les argiles étudiées proviennent de la wilaya de Biskra à Guedila et dans notre mémoire sur la fissuration des argiles soumise à des conditions de dessiccation (séchage libre), une campagne d'essais durant 3 jour sa été réalisée pour caractériser l'effet de la température et l'humidité sur les fissures engendrées. Cette étude vise une meilleure compréhension des mécanismes de la fissuration des argiles due à dessiccation.

La démarche suivie a consisté à effectuer un essai expérimental pour évaluer le retrait et la fissuration, puis à comparer les résultats de l'essai expérimental entre eux à partir de traitement d'images en utilisant le logiciel « VIC 2D » et on a remarqué qu'il y a des erreurs dans l'essai donc c'est pourquoi il est préférable dans la poursuite de cette étude :

- D'utiliser des couleurs claires en fonction de la couleur de l'échantillon afin que le processus d'étude des fissures et de leur lecture se fasse via le logiciel et pour le succès des mesures avec le Vic-2D, le motif de speckle peut être naturel ou peut être appliqué. Il peut être appliqué avec de la peinture blanche ou noir, Pour appliquer la brume noire de peinture, il est essentiel de garder une distance d'environ deux pieds entre l'échantillon et la bombe aérosol.
- En utilisant des lumières froides (lampes fluos exemple) afin que l'échantillon ne soit pas affecté par sa température.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Ce travail de fin d'études de master est pour objectif d'étudier la propagation des fissures dans les sols argileux sous dessiccation par une étude expérimentale. Ce travail est réalisé au sein de laboratoires de mécanique des sols de l'université de Biskra.

Pour bien comprendre ce phénomène une étude bibliographique a été réalisée. L'étude bibliographique a permis d'analyser les différents aspects des sols argileux (structure ; classification des minéraux argileux) et le comportement hydrique de sol argileux à partir les deux phénomènes gonflement et retrait. Elle a mis en évidence l'interaction entre les fissures et la dessiccation avec différentes études expérimentales antérieures sur mécanisme et des paramètres influençant la fissuration et elle terminée par des désordres à cause des fissures d'une argile sous dessiccation.

Dans le cadre de ce travail un dispositif expérimental a été développé. Ce dispositif permet de suivre par une caméra les fissurations propagées dans une argile soumise au séchage à une température ambiante. Un essai préliminaire sur ce dispositif a été réalisé. Il s'agit d'un essai de séchage d'une éprouvette d'argile préparée au laboratoire. Pendant l'essai on a surveillé la progression des fissures lors de la dessiccation des argiles. Ce suivi est réalisé en prenant des photographies numériques à intervalles réguliers pour finalement essayer de traiter ces données par le logiciel « VIC 2D ».

À la fin on a présenté et discuté sur les résultats expérimentaux préliminaires, parce que malheureusement nous n'avons pas pu terminer l'essai et étudier les paramètres principaux pertinents pour la mémoire. Les résultats ont montré que :

- La perte de la masse d'un échantillon d'argile saturé durant le séchage pond 9 heures et diminuait léger et uniforme variant entre 0,05 g et 0,07g à chaque 5 min.
- La température augmentée avec le temps, puis fixée en valeur 32°C, la température est augmentée de 23°C à 32°C en pourcentage égale 39,56%.
- La température est élevée par apport la température ambiante et la cause principale de l'augmentation de la température c'est les lampes si pour ça on a proposé comme solution le changement de la lampe utilisé par des lampes Fluos

Conclusion générale et Perspectives

(les lampes Fluos fournissant un éclairage froid afin de ne pas perturber la température ambiante de séchage des échantillons).

- L'humidité nous remarque qu'il est diminué avec l'augmentation du temps de 44 % jusqu'à 23 % et le pourcentage de diminution a été estimé 47,72 % à cause de l'augmentation de la température.

La poursuite de l'étude va suivre le programme suivant:

- Réalisation des essais de dessiccation d'argile à l'air libre (température ambiante)
- Traitement d'images 2D
- Élaborer une loi décrivant la cinétique de la propagation des fissures d'une argile.

Références bibliographique

1. A.N.A.T (2003) La production et le traitement des eaux destinées à l'alimentation et à la préparation de denrées alimentaires - Normandie-Editions Hachette livre-2003.
2. AFNOR: NF P 94-051 MARS 1993.Limite d'Atterberg.
3. AFNOR: NF P 94-056/mars 1996.Analyse granulométrique
4. des sols par tamisage.
5. AFNOR: NF P 94-057/mai1992.
Analyse granulométrique des sols par sédimentométrie.
6. AFNOR:Selon NF P 94-068 Octobre 1998.Valeurs au bleu deméthylène.
7. Al Wahab, R.M., El-Kedrah, M.A., 1995. Using fibers to reduce tension cracks and shrink/swell in a compacted clay. In: Proceedings of Geo-environment 2000. Geotechnical Special Publication No. 46, vol. 1. ASCE, New York, pp. 791–805.
8. AL-Hussaini, M., 1981, "Tensile Properties of Compacted Soils," Laboratory Shear Strength of Soil,R.N.Young and F. C. Townsend, Eds., ASTM International, pp. 207–225. Alwahab, R. M., &Alqedra, M. (1995). Using Fibres to Reduce Tension Cracks and Shrink/Swell Cycles in a Compacted Clay. Using Fibres to Reduce Tension Cracks and Shrink/Swell Cycles in a Compacted Clay, 1(2).
9. Amarasiri, A., Kodikara, J.& Costa, S., 2010. Numerical modelling of desiccation cracking. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 35, pp.82– 96.
10. Amarasiri, A.L., Costa, S. &Kodikara, J.K., 2011. Determination of cohesive properties for mode I fracture from compacted clay beams. Canadian Geotechnical Journal, 38, pp.1163–1173.
11. Audiguier, M., Geremew, Z., Laribi, S., &Cojean, R. (2007). Caractérisation au laboratoire de la sensibilité au retrait-gonflement des sols argileux. *Revue française de Géotechnique*, (120-121), 67-82.
12. Auvray, R., Abdallah, A. &Masrouri, F., 2017. Quantification of soft soil cracking during suction cycles by image processing. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 18, pp.11–32.

Références bibliographique

13. Azam, S., Ito, M. (2011). Unsaturated soil properties of a fissured expansive clay. Pan-Am CGS Geotechnical Conference.
14. Bajare, D., & Bumanis, G. (2014). Alkali diffusion in porous alkali activated materials. *Spectrum*, 6(3.90), 96-10.
15. Bakkari A. (2007). Observation et modélisation d'ouvrages en terre soumis à des processus de séchage et d'humidification ; thèse doctorat l'école nationale des ponts et chaussées.
16. BAKROUNE N., 2012. Diversité spécifique de l'aphidofaune (Homoptera, Aphididae) et de ses ennemis naturels dans deux (02) stations : El-Outaya et Ain Naga (Biskra) sur piment et poivron (Solanacées) sous abris - plastique. Mémoire Magister. Université Mohamed Kheider Biskra. 124p.
17. Barnier, F., 2015. Fissuration et déformation des mortiers de terre crue au séchage. Bazant, Z. & Cedolin, L., 1991. Stability of structures. Oxford University Press.
18. Bekhouch, E. (2017). *CONTRIBUTION SUR L'ETUDE DES INTERACTIONS DES FONDATIONS ET DES SOLS GONFLANTS: PATHOLOGIE, CALCULS NUMERIQUE* (Doctoral dissertation).
19. Bengraa, H. (2004). *Contribution a l'Etude de la stabilisation du gonflement par ajout du sable* (Doctoral dissertation, Thèse de magister, Université de Mohamed Boudiaf USTO, Oran).
20. Berrah, Y. (2017). Étude mécanique et minéralogique des sols gonflants de la région de Tébessa N.E Algérie. THÈSE Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat En Géologie, Université de Tébessa. p 25, 32, 33, 34, 35).
21. Bhadriraju, V., Puppala, A. J., Enayatpour, S., & Pathivada, S. (2005). Digital imaging technique to evaluate shrinkage strain potentials of fiber reinforced expansive soils. In Site Characterization and Modeling (pp. 1-12).
22. Bodin o j., labat C., castillon ., 2015. méthode d'expertise et de diagnostic des désordres liés a la séchage.
23. Boivin, P., Garnier, P., & Vauclin, M. (2006). Modeling the soil shrinkage and water retention curves with the same equation. Soil Science Society of America Journal, 70, 1082-1093.

Références bibliographique

24. Boivin, P., Garnier, P., Tessier, D., 2004. Relationship between clay content, clay type, and shrinkage properties of soil samples. *SoilSci. Soc. Am. J.* 68, 1145–1153.
25. Bourabah M.A. (2006). L'étude Géotechnique dans le Génie Civil . Portes ouvertes sur le génie civil. Centre Universitaire Mustapha Stambouli_ MASCARA
26. BOUZIANE Nouzha. Elimination du 2-mercaptobenzothiazole par voie photochimique et par adsorption sur la bentonite et le charbon actif en poudre. Université Mentouri de CONSTANTINE. P .3-13-20-24-73, 2007.
27. Bronswijk, J. J. B. (1988). Modeling of water balance, cracking and subsidence of clay soils. *Journal of Hydrology*, 97(3-4), 199-212.
28. Caillère S., HENIN S. (1959). La classification des argiles, XXème congrès Géol. Internat., Mexico, pp. 1-8 .
29. Camille, T. (2010). Caractérisation et quantification des minéraux argileux dans les sols expansifs par spectroscopie infrarouge aux échelles du laboratoire et du terrain. THESE présenté en vue de l'obtention du doctorat de l'université de toulouse.
30. Chaduvula, U., Viswanadham, B. V. S., & Kodikara, J. (2017). A study on desiccation cracking behavior of polyester fiber-reinforced expansive clay. *Applied Clay Science*, 142, 163-172.
31. Chebbi, M., Guiras, H., & Jamei, M. (2020). Tensile behaviour analysis of compacted clayey soil reinforced with natural and synthetic fibers: effect of initial compaction conditions. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24(3), 354-380.
32. Cordero, J. et al., 2016. Description of a field test involving cracking in a drying soil. In EUNSAT2016. pp. 4–9.
33. Correlated Solutions, Inc., “Digital Image Correlation”,. 2020.
34. Corte, A., Higashi, A.(1960). Experimental research on desiccation cracks in soil, Research Report 66. Tech. rep., Wilmette, Illinois: US Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment.

Références bibliographique

35. Cousin, Argile, éditions Eyrolles, dépôt légal : avril 2013, ISBN : 978-2-212-55642-1.
36. Cuisinier, O. (2002). " Comportement hydromécanique des sols gonflants compactés ".Thèse de Docteur de l'I.N.P.L, France, soutenue le 31.10.2002. 172p.
37. Divya, P. V., Viswanadham, B. V. S., & Gourc, J. P. (2014). Evaluation of tensile strength-strain characteristics of fiber-reinforced soil through laboratory tests. *Journal of Materials in civil Engineering*, 26(1), 14-23.
38. DJAANI, M., et BENMANSOUR, S.F. (2011). Stabilisation des sols gonflants de la région d'In-Aménas par ajouts des liants hydrauliques (Chaux et Ciment). Mémoire de fin d'études, UNIVERSITE KASDI MERBAH, OUARGLA.
39. EL HACHMI, A. (2013). Argile et minéraux argileux: propriétés physico-chimiques et propriétés et propriétés colloïdales.
40. Fang, H. Y. (1997). Introduction to Environmental Geotechnology, volume 14 of New Directions in Civil Engineering. CRC Press. (document), 2.1, 2.2.3, 2.1, 2.3.1.3, 2.3.3.1, 2.8.
41. Freilich, B. J., Kuhn, J. A., & Zornberg, J. G. (2008, March). Desiccation of fiberreinforced highly plastic clays. In The first Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition, 2-5 March 2008, C.
42. Frookes, P. G. and Denness, B. (1969). Observational studies of fissure patterns in cretaceous sediments of south-east England. *Geotechnique*, 19:453–477. (document), 2.2.2, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5.
43. Frydman, S., 1964, "The Applicability of the Brazilian (Indirect Tension) Test to Soils," *Australian Journal of Applied Science*, Vol. 15, pp. 335–343.
44. GHANEM FADHILA. (2011). « Etude de la corrélation entre la perméabilité et la succion », Mémoire de Magistère, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 112 p.
45. Gowthaman, S., Nakashima, K., & Kawasaki, S. (2018). A state-of-the-art review on soil reinforcement technology using natural plant fiber materials: Past findings, present trends and future directions. *Materials*, 11(4), 553.
46. Groenevelt, P.H., Grant, C.D., 2004. Analysis of soil shrinkage data. *Soil and Tillage Research* 79, 71–77.

Références bibliographique

47. Guz, Némoz (2011), « Le textile, un matériau multifonctionnel », dans la chimie et l'habitat : EDP Sciences , p 208-224.
48. Haines, H. H. (1921). 1924. *The botany of Bihar and Orissa*, 6, 1-3.
49. HAKKOUM, A. (2010). Dépôt de particules d'or sur argiles Préparation, caractérisation et application catalytique.
50. Harianto, T., Hayashi, S., Du, Y. J., & Suetsugu, D. (2008). Effects of fiber additives on the desiccation crack behavior of the compacted Akaboku soil as a material for landfill cover barrier. *Water, air, and soil pollution*, 194(1-4), 141-149. Ancun, Mexico (pp. 32- 241).
51. Holtz, W. G et Gibbs, H.J. (1991). " Introduction à la géotechnique ". Traduit par Lafleur, J, édition de l'école de polytechnique de Montréal, Canada, 794p.
52. <https://www.construction21.org/france/articles/fr/adapter-les-routes-aux-impacts-du-changement-climatique-l-observatoire-des-routes-sinistr-eacute-es-par-la-s-eacute-cheresse.html>.
53. <https://www.correlatedsolutions.com/>.
54. <https://www.crstra.dz/>.
55. [https://www.keller-france.com/Ifsttar et Ineris - Retrait et gonflement des argiles - Analyse et traitement des désordres créés par la sécheresse, guide 3. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2017. Techniques et méthodes, GTI 4-3, 58 pages, numéro ISBN 978-2-85782-726-9.](https://www.keller-france.com/Ifsttar%20et%20Ineris%20-%20Retrait%20et%20gonflement%20des%20argiles%20-%20Analyse%20et%20traitement%20des%20désordres%20créés%20par%20la%20sécheresse,%20guide%203.%20Marne-la-Vallée%20:%20Ifsttar,%202017.%20Techniques%20et%20méthodes,%20GTI%204-3,%2058%20pages,%20numéro%20ISBN%20978-2-85782-726-9)
56. <https://www.systemed.fr/maconnerie-facades/injecter-resine-pour-stabiliser-fondations,4839.html>.
57. http://geoscape.nrcan.gc.ca/sask/cracks_f.php.
58. <https://argile-verte.info/>.
59. Khachai (2001) : Contribution à l'étude du comportement hydro physiques des soles des périmètres d'I.T.D.A.S, plaine de l'Outaya. Thèse Magister., Ins. Agro. Université de Batna, 223 p.
60. Kies, J. A., Sullivan, A. M., Irwin, G. R., 1950. Interpretation of fracture markings. *Journal of Applied Physics* 21 (7), 716–720.
61. Kitsunezaki, S., 2009. Crack propagation speed in the drying process of paste. *Journal of the Physical Society of Japan* 78 (6), 064801.

Références bibliographique

62. Kodikara, J. & Shannon, B., Costa, S. (2013). Salient factors controlling desiccation cracking of clay in laboratory experiments. *Géotechnique*, 63(1), pp.18–29. Available at:<http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/geot.9.P.105> [Accessed August 5, 2016].
63. Kodikara, J. K., & Choi, X. (2006). A simplified analytical model for desiccation cracking of clay layers in laboratory tests. In *Unsaturated Soils 2006* (pp. 2558-2569).
64. Kodikara, J., Barbour, S., & Fredlund, D. (1998). An idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation: Discussion. *Canadian Geotechnical Journal*, 35, pp.1112–1114.
65. Kodikara, J.K., Barbour, S.L. & Fredlund, D.G., 2000. Desiccation cracking of soil layers. In *UNSAT ASIA 2000*. pp. 693–698.
66. Konrad, J. M., & Ayad, R. (1997). A idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(4), 477-488.
67. Krishnayya, A. V. G., Eisenstein, Z., and Morgenstern, N. R., 1974, “Behaviour of Compacted Soil in Tension,” *Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 100, No. GT9, pp. 1051– 1061.
68. Lakshmikantha, M. R., Reig, R., Prat, P. C., Ledesma, A., 2013. Origin and mechanism of cracks seen at the bottom of a desiccating soil specimen. In: *Geo-Congress 2013 Stability and Performance of Slopes and Embankments III*. ASCE, pp. 790–799.
69. Laloui, L., & Hu, L., Peron, H., Hueckel, T. (2009). Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils: experimental characterisation and mechanisms identification. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(10), 1177-1201.
70. Laurent, F., & Rossignol, J. P. (2003). Cartographie des propriétés hydriques des sols à partir de la lithologie et des pentes. *Application au bassin versant de la Moine (France, Maine-et-Loire)*. *Etude et Gestion des Sols*, 10(3), 155-170.
71. Leavell, D. A. and Peters, J. F., 1987, “Uniaxial Tensile Test for Soil,” Technical Report GL-87-10, Department of the Army, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

Références bibliographique

- 72.** Li, H. D., Tang, C. S., Cheng, Q., Li, S. J., Gong, X. P., & Shi, B. (2019). Tensile strength of clayey soil and the strain analysis based on image processing techniques. *Engineering Geology*, 253, 137-148.
- 73.** Li, Y., Ling, X., Su, L., An, L., Li, P., & Zhao, Y. (2018). Tensile strength of fiber reinforced soil under freeze-thaw condition. *Cold Regions Science and Technology*, 146, 53-59.
- 74.** Liang, Q., Wu, X., Li, C., Wang, L. (2014). Mechanical analysis using the unconfined penetration test on the tensile strength of Q3 loess around Lanzhou City, China. *Eng. Geol.* 183, 324–329.
- 75.** Liu HH, Bodvarsson GS, Finsterle S (2004). A note on unsaturated flow in two-dimensional fracture networks. Technical note. Earth Sciences Division. Lawrence Berkeley National Laboratory. University of California. Berkeley California.
- 76.** MEKKI Lakhdar. Méthodologie d'étude et techniques d'identification des paramètres de comportement des sols fins soumis à des cycles de sécheresse prolongée (application aux argiles expansives de m'sila) .Université Mohamed Boudiaf M'SILA. P .6-7-10 ,2006.
- 77.** Merabet, D., & Belkacemi, H. (2003, September). Caractérisation minéralogique et chimique du kaolin de Tamazert (Algérie). In *Annales de Chimie Science des Matériaux* (Vol. 28, No. 5, pp. 61-83). No longer published by Elsevier.
- 78.** Millot, G. (1964). *Géologie des argiles: altérations, sédimentologie, géochimie* (No. 552.5). Masson,.
- 79.** Min, T-K., & Nhat, V. D. (2007). A Simple Model of Shrinkage Cracking Development for Kaolinite. *Journal of the KGS*, 23(9), 29-37.
- 80.** Mitchell J.K. (1993). *Fundamentals of soil behavior*, 2ème édition, John Wiley and sons, New York, 437 pp.
- 81.** Morel, R. (1996). Les sols cultivés. 2ème édition, Lavoisier. *Tec. et Doc. La phase liquide du sol*, 5(3), 140-171.
- 82.** Morris, P.H., Graham, J., Williams, D.J., 1992. Cracking in drying soils. *Can. Geotech. J.* 29 (2), 263–277.
- 83.** Mouroux, P., Margron, P., & Pinte, J. C. (1988). La construction économique sur sols gonflants. *Manuels et méthodes-Bureau de recherches géologiques et minières*, (14).

Références bibliographique

84. Müller, G., Dahm, T., 2000. Fracture morphology of tensile cracks and rupture velocity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 105 (B1), 723–738.
85. Nahlawi, H., Kodikara, J.K., 2006. Laboratory experiments on desiccation cracking of thin soil layers. *Geotechnical and Geological Engineering* 24, 1641–1664.
86. Nguyen, V., 2015. Modélisation numérique du comportement hydromécanique des milieux poreux fracturé: analyse des conditions de propagations des fractures. Université Paris Est.
87. Nowamooz, H. (2007). *Retrait/gonflement des sols argileux compactés et naturels* (Doctoral dissertation).
88. Nowamooz, H., & Masrouri, F. (2009). Density-dependent hydromechanical behaviour of a compacted expansive soil. *Engineering Geology*, 106(3-4), 105-115.
89. Osinubi, K.J., Nwaiwu, C.M.O., 2008. Desiccation-induced shrinkage in compacted lateritic soils. *Geotech. Geol. Eng.* 28, 603–611.
90. Pachauri, S., Priya, M. I., & Garg, A. (2019). Comparative Analysis of Strength Characteristics of Soil Reinforced with Coir and Polypropylene Fibers. In *Ground Improvement Techniques and Geosynthetics* (pp. 355-361). Springer, Singapore.
91. Pedro, G. (1994), Structures et reactivite des argiles. *Bulletin du Groupe français des Argiles*, 26, 9-55.
92. Peron, H. 2008. Desiccation cracking of soils. Ph.D. thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switezerland. [Google Scholar](#).
93. Peron, H., Hueckel, T., Laloui, L., Hu, L. B., 2009. Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils: experimental characterisation and mechanisms identification.
94. Péron, H., Laloui, L., Hueckel, T., & Hu, L. (2006). Experimental study of desiccation of soil. *Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated*.
95. Peron, Laloui, et al., 2009. Desiccation cracking of soils. Failure in multiphase geomaterials, 13, pp.869–888. Available at: <http://ejece.revuesonline.com/article.jsp?articleId=13758> [Accessed December 3, 2014].

Références bibliographique

96. Rayhani, M. H. T., Yanful, E. K., & Fakher, A. (2008). Physical modeling of desiccation cracking in plastic soils. *Engineering Geology*, 97(1-2), 25-31.
97. Rayhani, M.H.T., Yanful, E.K., and Fahher, A. (2007). Desiccation –induced cracking and its effect on the hydraulic conductivity of clayey soils from Iran. *Can. Geotech. J.*, 44.
98. Salem, L. (2018). The Transformational Leadership And Its Relation To The Organizational Climate Within Some Of The Employees Of The Directorate Of Youth And Sports Of The State Of M’sila.
99. Ségalen, P. (1969). Contribution à la connaissance de la couleur des sols à sesquioxydes de la zone intertropicale: sols jaunes et sols rouges. *Cah. Orstom, Sér. Pédol*, 7(2), 225- 236
100. Shin, H., Santamarina, J. C., 2011. Desiccation cracks in saturated finegrained soils: particle-level phenomena and effective-stress analysis. *Géotechnique* 61 (11), 961–972.
101. Stirk, G.B. (1954). Some aspects of soil shrinkage and the effects of cracking upon water entry into the soil. *Aust. J. Agric. Res.* 5, 279–290.
102. Stirling, R.A.(2014). Multiphase Modelling of Desiccation Cracking in Compacted Soil. Newcastle University.
103. Tang, C. et al., 2008. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils. *Engineering Geology*, 101, pp.204–217. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013795208001531>.
104. Tang, C. S., Shi, B., Cui, Y. J., Liu, C., &Gu, K. (2012). Desiccation cracking behavior of polypropylene fiber–reinforced clayey soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(9), 1088-1101.
105. Tang, C. S., Shi, B., Liu, C., Gao, L., Inyang, H. I., 2010b. Experimental investigation of the desiccation cracking behavior of soil layers during drying. *Journal of Materials in Civil Engineering* 23 (6), 873–878.
106. Tang, C. S., Shi, B., Liu, C., Suo, W. B., Gao, L., 2011. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer. *Applied Clay Science* 52 (12), 69– 77.
107. Tang, C. S., Wang, D. Y., Cui, Y. J., Shi, B., & Li, J. (2016). Tensile strength of fiber- reinforced soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(7), 04016031.

Références bibliographique

- 108.** Tang, C., 2009. Shrinkage and cracking behaviour of swelling soil under different temperatures (Available online: <http://www.paper.edu.cn>).
- 109.** Tang, C.S., Bin Shi, Liu, C., Suo, W.B., Gao, L. (2011). Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer. *Applied Clay Science* 52 , 69–77.
- 110.** Tang, C.-S., Cui, Y.-J., et al., 2011. Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting–drying cycles. *Geoderma*, 166, pp.111–118. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706111002205> [Accessed June 5, 2014].
- 111.** Tang, C.S., Cui, Y.J., Tang, A.M., Shi, B., 2010. Experimental evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of clayey soils. *Engineering Geology* 114, 261– 266.
- 112.** Tang, C.S., Shi, B. and Zhao, L.Z., 2010. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. *Geotextiles 2 and Geomembranes*, 28(1), pp.54-62.
- 113.** Tang, C.S., Shi, B., Liu, C., Suo, W.B., Gao, L., 2011. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer. *Appl. Clay Sci.* 52, 69–77.
- 114.** Tang, C.S., Shi, B., Liu, C., Zhao, L., Wang, B.J., 2008. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils. *Engineering Geology* 101, 204–217.
- 115.** Tang, C.S., Wang, D.Y., Zhu, C., Zhou, Q.Y., Xu, S.K., Shi, B. (2018). Characterizing drying- induced clayey soil desiccation cracking process using electrical resistivity method. *Appl. Clay Sci.* 152, 101–112.
- 116.** Tay, Y.Y., Stewart, D.I., Cousens, T.W., 2001. Shrinkage and desiccation cracking in bentonite–sand landfill liners. *Engineering Geology* 60, 263–274
- 117.** Tessier D., Biais F., Coquet Y., Courbet C, Priem J., Lemaire Y., Trillaud S. (2006) Analyse comparative de politiques de prévention du risque de « sécheresse géotechnique » - Modélisation et visualisation du phénomène. Versailles, rapport INRA.

Références bibliographique

- 118.** Tollenaar, R.N., Paassen, L.A. van, Jommi, C., Observations on the Desiccation and Cracking of Clay Layers, *Engineering Geology* (2017), doi:10.1016/j.enggeo.2017.08.02.
- 119.** Vallejo, L. E. (1994). Application of fracture mechanics to soils: An overview. *Fracture Mechanics Applied to Geotechnical Engineering ASCE Geotechnical Special Publication*, 43:1–20. 2.1, 2.3, 2.5.1.1, 9.4.2.
- 120.** Van Olphen H. (1963) Internal mutual flocculation in clay suspensions, *J. Colloid Sci.*, 19, pp.313- 322.
- 121.** Villieras .(2008). *Argiles : histoire d’avenir*, éditions Récréateurs, dépôt légal .
- 122.** Vo, T. D. (2017). *Modélisation numérique et analytique de la fissuration de séchage des sols argileux* (Doctoral dissertation).
- 123.** Wallace, K. (1998). “The Tensile Response of an Unbound Granular Pavement,”*Road and Transport Research Journal, ARRB*, Vol. 7, No. 3, pp. 36–47.
- 124.** Wang, D.Y., Tang, C.S., Cui, Y.C., Shi, B., Li, J. (2016). Effects of wetting drying cycles on soil strength profile of a silty clay in micro-penetrometer tests. *Eng. Geol.* 206, 60–70.
- 125.** Wang, L. L., Tang, C. S., Shi, B., Cui, Y. J., Zhang, G. Q., & Hilary, I. (2018). Nucleation and propagation mechanisms of soil desiccation cracks. *Engineering Geology*, 238, 27-35.
- 126.** Wei X, Hattab M, Fleureau JM, Hu RL (2013) Micro-macro-experimental study of two clayey materials on drying paths. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 72:495-508.
- 127.** Wei X. (2014) Etude micro-macro de la fissuration des argiles soumises à la dessiccation. Doctoral dissertation, Ecole Centrale Paris, France.
- 128.** 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, No. 4, 287–300, <http://dx.doi.org/10.1680/jgeot.14.P.227>.
- 129.** WILLIAMS, A. B. & JENNINGS, J. E. (1977). 'The in situ shear behaviour of fissured soils', *Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Foundation Engg, Tokyo*, 2, 243-6. YOUNG, R. P. & FOWELL, R. J. (1978). "Assessing rock discontinuities', *Tunnels and Tunnelling*, 10, No. 5, June, 45-8.

Références bibliographique

- 130.** Ye, W.M., Xu, L., Ye, B., Chen, B., Chen, Y.G., Cui, Y.J.(2017).
Experimental investigation on gas migration in saturated Shanghai soft clay.
Eng. Geol. 222, 20–28.
- 131.** YULE, D.F. & RICHIE, J.T., 1980. Soil shrinkage relationships of Texas
vertisols. .Soil science society of America journal, vol 44, pp. 1285–1291.
- 132.** Zeng, H., Tang, C. S., Cheng, Q., Lin, L., & Xu, J. J. (2019). Desiccation
Cracking Behavior of Soils. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*,
7(2), 90-95.