

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Tlemcen
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil



Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de

Master en Génie Civil
Spécialité :
Ingénierie des Structures

Thème :

**CONTRIBUTION A L'ETUDE
DE LA FISSURATION DES ARGILES**

Présenté le 13 Juin 2016 par :

AMMOUR Asma

BOUHANNA Bahya

Devant le Jury composé de :

M. BEZZAR A.
M. ABOU-BEKR N.
M. BEDJAOUI C.
Mme. BENCHOUK A.

Maître de Conférences A
Professeur
Maître Assistant A
Maître de Conférences A

*Président
Examineur
Examineur
Encadreur*

Année Universitaire : 2015 - 2016.



DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents qui n'ont pas cessé de me soutenir et me donner le meilleur d'eux même tout au long de ma formation,

Mon cher frère et ma petite sœur,

Mes deux fidèles amis Fatima Zohra et Cherifa Djazia,

La famille Ammour,

Tous les étudiants de ma promotion et surtout mon binôme Bahya qui a partagé avec moi les bons et les mauvais moments durant mes études, je remercie pour tous ses efforts.

Asma.

Je remercie dieu de m'avoir donné le courage et la volonté ainsi que la conscience pour terminer mes études.

Je dédie ce travail :

A mon premier amour à ma généreuse mère, qui m'a offert sa santé, son temps et toute sa vie pour m'éduquer.

A mon cher père qui m'a encouragé à continuer mes études, et je considère que ce travail est le fruit de ses conseils.

A mes frères et sœurs qui sont mes vrais amis.

A toute la famille Bouhanna.

A mes amis et mes copains Khaled, Rabie et Asma.

Bahya.

REMERCIEMENTS

Nous exprimons toute notre gratitude et sincère dévouement à Dieu Le Tout puissant qui grâce à son aide nous avons terminé ce modeste travail.

Nous adressons nos plus vifs remerciements à Mme A. BENCHOUK BENDI-OUIS professeur au département de Génie Civil à l'Université de Tlemcen, pour ses encouragements et son aide pour l'aboutissement à ce travail. Qu'elle trouve ici nos sincères remerciements.

Nous voudrions remercier Mr A. BEZZAR, Professeur au département de Génie Civil à l'université de Tlemcen, qui nous a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

Nous remercions également M N. ABOU-BEKR Professeur au département de Génie civil à l'université de Tlemcen et M C. BEDJAOUI Maître Assistant A, pour avoir accepté d'être examinateurs de ce mémoire.

Nos professeurs qui nous ont enrichis de connaissances et tout le département de génie civil.

Un grand merci à nos deux collègues de IBG R. Kazi Auoal et A. Kenadil pour son aide, lors de la préparation de ce mémoire sans oublier les membres et les techniciens du laboratoire de mécanique de sols, structure et matériaux de construction pour leur aide et patience.

ملخص

تشقق التربة نتيجة الجفاف ظاهرة ذات أهمية كبيرة في الجيوتقنية وبخاصة الجيوتقنية المحيطية. الهدف من هذه الدراسة هو محاولة فهم كيف، في مادة طينية التي توجد في حالتها الأولية على شكل عجينة مشبعة تظهر التشققات الصغيرة وكيف تتطور اثناء التجفيف في الهواء الطلق وفي درجة حرارة ثابتة تقدر ب 30 درجة مئوية. المنهجية التي نقتربها تجريبية وتعتمد على متابعة الشبكة المتشقة عن طريق مختلف الاعدادات التطورية مثل: المحتوى المائي، الطول المتوسطي للتشققات، العرض المتوسطي للتشققات وعدد التشققات.

الكلمات المفتاحية: الطين، التشقق، التجفيف، التقلص، المحتوى المائي.

Résumé

La fissuration des sols due à la dessiccation est un phénomène d'une importance majeure en géotechnique et en particulier en géotechnique environnementale. L'objectif de cette étude est de tenter de comprendre comment, dans un matériau argileux qui, à l'état initial, se trouve sous forme d'une pâte saturée, la microfissuration apparaît et comment elle se développe au cours d'un séchage à l'air libre et à température constante de 30°C. L'approche que nous proposons est expérimentale et consiste à suivre le phénomène de retrait ainsi que le développement de réseau de fissures à partir de différents paramètres évolutifs tels que : la teneur en eau, la longueur de fissures, la largeur des fissures et le nombre de segments.

MOT-CLÉS : Argile, fissuration, dessiccation, retrait, teneur en eau.

Abstract

The soil cracking due to drying is a phenomenon of major importance in geotechnical and particularly in environmental geotechnics.

The objective of this study is to try to understand how, in the clay material in the initial state is in the form of a saturated paste, micro cracks appear and how it develops during drying in the free air and at a constant temperature of 30 ° C.

The approach we propose is experimental and is consist to follow the shrinkage phenomenon and the cracks development from various parameters such as water content, the total area of cracks, crack width and number of segments.

KEY WORDS: Clay, cracks, desiccation, shrinkage, water content.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1: RETRAIT DES ARGILES.	
1. INTRODUCTION.....	3
2. LES SOLS ARGILEUX.....	3
2.1 CARACTERISATION MINERALOGIQUE.....	4
2.1.1 ASPECTS MICROSTRUCTURAUX DES SOLS GONFLANTS.....	4
2.1.2 STRUCTURE MINERALOGIQUE DES ARGILES.....	4
2.2 FAMILLES ARGILEUSES.....	6
2.2.1 FAMILLE DE KAOLINITES.....	6
2.2.2 FAMILLE DE L'ILLITES	7
2.2.3 FAMILLE DE SMECTITES	7
2.3 QUELQUES PATHOLOGIES DUES AUX SOLS ARGILEUX.....	9
3. PHENOMENE DE RETRAIT.....	12
3.1 RETRAIT DES SOLS FINS.....	15
3.1.1 ESSAI DE DESSICCATION POUR LA DETERMINATION DE LA LIMITE DE RETRAIT CONVENTIONNELLE.....	15
3.1.2 ESSAI DE DESSICCATION POUR LA DETERMINATION DE LA LIMITE DE RETRAIT EFFECTIVE.....	15
4. LES FISSURES DE DESSICCATION.....	16
5. CONCLUSION.....	17
CHAPITRE 2: METHODES EXPERIMENTALES DE LA CARACTERISATION DE LA FISSURATION.	
1. INTRODUCTION.....	18
2. FISSURATION PAR DESSICCATION : ESSAIS ET RESULTATS.....	18
2.1 INITIATION DES FISSURES.....	19
2.2 STRUCTURE ET EXTENSION DES FISSURES.....	20
2.3 APERÇU SUR LES EXPERIENCES DE LECOCP ET VANDEWALLE (2003).....	24
2.3.1 FISSURES UNIDIRECTIONNELLES (LECOCP ET VANDEWALLE , 2003).....	24
2.3.2 FISSURES BIDIRECTIONNELLES : VOGEL ET AL. (2005a).....	27
3. CONCLUSION.....	29

CHAPITRE 3: ETUDE DE LA FISSURATION EXPERIMENTALEMENT.

1.	INTRODUCTION.....	30
2.	LIMITE DE RETRAIT.....	30
3.	TECHNIQUE DE CARACTERISATION DES FISSURES.....	31
4.	MATERIAUX ETUDIES.....	31
5.	CARACTERISATION GEOTECHNIQUE DU SOL DE BAB EL-ASSA.....	33
5.1	ESSAI D'IDENTIFICATION.....	33
5.1.1	L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE ET SEDIMENTOMETRIE.....	33
5.1.2	LIMITES D'ATTERBERG.....	34
5.1.3	ESSAI AU BLEU DE METHYLENE.....	36
5.1.4	ESSAI DE PYCNOMETRE.....	38
6.	REALISATION DES ESSAIS.....	40
6.1	DESSICCATION DES MATERIAUX ETUDIES.....	40
6.2	DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	40
7.	DESCRIPTION DU LOGICIEL IMAGE J.....	41
8.	RESULTATS DES ESSAIS EXPERIMENTAUX.....	42
8.1	ESSAI (1).....	42
8.2	ESSAI (2).....	44
9.	CONCLUSION.....	65

CONCLUSION GENERALE.....	67
---------------------------------	-----------

ANNEXE.....	69
--------------------	-----------

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Structure Elémentaire Tétraédrique (Freeah, 2006).....	5
Figure 1.2: Structure Elémentaire Octaédrique (Freeah, 2006).....	5
Figure 1.3: Différents niveaux structuraux des sols gonflants (Gens et Alonso, 1992).....	6
Figure 1.4: Structures de kaolinite.....	7
Figure 1.5: Structures de smectite.....	7
Figure 1.6: Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles, (Mitchell, 1976).....	8
Figure 1.7: Fissure sur les murs (Zenkhrri ,2010). (D'après DJAANI. M et BENMANSOUR. S.F., 2011)	9
Figure 1.8 : Fissures diagonales (Derriche Z et al.). (D'après DJAANI. M et BENMANSOUR. S.F, 2011).....	10
Figure 1.9 : Cisaillement au niveau des noeuds (Derriche Z et al.). (D'après DJAANI. M et BENMANSOUR. S.F, 2011).....	10
Figure 1.10 : Fissures dans les murs au niveau de la fenêtre (Derriche Z et al.) (D'après DJAANI. M et BENMANSOUR. S.F, 2011).....	11
Figure 1.11 : Des exemples de désordres dans le monde à partir de Google.....	12
Figure 1.12 : Dessiccation des sols argileux en période sèche (Source : Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)).....	13
Figure 1.13 : Différentes phases du retrait (Schubert, 1982).....	14
Figure 1.14 : Courbe de retrait classique.....	14
Figure 1.15 : Détermination des limites de retrait (a) conventionnelle sur le matériau argileux remanié et (b) effective sur le même matériau intact (D'après NOWAMOOZ.H., 2007).....	16
Figure 2.1 : Processus de l'initiation des fissures : (a) sol initialement saturé ; (b) développement de ménisque à l'interface eau-air entre les particules ; (c) force capillaire entre les particules ; (d) développement des contraintes de tension dans la tranche superficielle et (e) initiation des fissures à la surface (Tang et al., 2011).....	20
Figure 2.2 : Etape de fissuration d'une argile Saint-Alban intacte (Konrad et Ayad, 1997).....	22
Figure 2.3 : Evolution de la géométrie des fissures sur la surface de l'échantillon soumis à la dessiccation (Tang et al., 2011).....	23
Figure 2.4 : Suivi de l'apparition et l'évolution des fissures (Lecocq et Vandewalle, 2003).....	24
Figure 2.5 : Suivi de l'apparition et de l'évolution des fissures (Costa et Kodikara, 2008).....	25

Figure 2.6 : Trois échantillons dans un cycle de dessiccation présenter par Avila et al. (2013)	26
Figure 2.7 : Apparition des fissures au cours de la dessiccation (Lecocq et Vandewalle, 2003).....	27
Figure 2.8 : Réseau de fissures après la dessiccation des mélanges du sable (S) et de la bentonite (B), SB1 : 1 (à gauche) et SB5 : 1 (à droite), dans une section carrée de cote 20cm. La partie cadrée de SB1 : 1 est employée dans les figures suivantes pour illustrer les différentes analyses.....	28
Figure 2.9 : Différentes étapes de formation des fissures pendant la dessiccation dans la section carrée de SB1 :1.....	28
Figure 3.1 : Extrait de la zone de prélèvement à partir de Google Earth.....	32
Figure 3.2 : Extrait de la zone de prélèvement à partir de Google Earth.....	32
Figure 3.3 : Extrait de la zone de prélèvement à partir de Google Earth.....	33
Figure 3.4 : Colonne des tamis.....	34
Figure 3.5 : Essai de sédimentométrie.....	34
Figure 3.6 : Les courbes granulométriques.....	34
Figure 3.7 : Appareillage de Casagrande.....	35
Figure 3.8 : Exécution de l'essai de la limite de liquidité.....	35
Figure 3.9 : La variation de la teneur en eau W en fonction du nombre de chocs N.....	35
Figure 3.10 : Abaque de plasticité de Casagrande CLASSIFICATION L.P.C. DES SOLS FINS.....	36
Figure 3.11 : Aperçu schématique de l'essai de détermination de la valeur de bleu de méthylène (D'après BOUKLIKHA .R et MECHERNENE .M.,2015).....	37
Figure 3.12 : Réalisation de l'essai au Bleu de Méthylène.....	37
Figure 3.13 : Ordres de grandeur (Type de sol en fonction de la valeur «VBS ») (Léreau. J., 2005: INSA-Institut National Des Sciences Appliqués De Toulouse).....	37
Figure 3.14 : Essai de Pycnomètre.....	38
Figure 3.15 : Le dispositif expérimental de l'essai.....	41
Figure 3.16 : Les deux échantillons à l'états initial a) Sol de Boughrara Barrage, b) Sol de Bab El Assa.....	42
Figure 3.17 : Les deux échantillons à l'états initial a) Sol de Boughrara Barrage, b) Sol de Bab El Assa.....	43
Figure 3.18 : La variation de la teneur en eau en fonction de temps de sol de Boughrara Barrage.....	43
Figure 3.19 : La variation de la teneur en eau en fonction de temps de sol de Boughrara Barrage.....	44
Figure 3.20 : Initiation et propagation des fissures au cours du temps à l'étuve (T= 30°C) pour le sol de Boughrara Route.....	46
Figure 3.21 : Initiation et propagation des fissures au cours du temps à l'étuve (T= 30°C) pour le sol de Boughrara Barrage.....	47

Figure 3.22 :Initiation et propagation des fissures au cours du temps à l'été (T= 30°C) pour le sol de Bâb El-Assa.....	48
Figure 3.23 :La propagation des fissures à l'été (T=30°C) par traitement d'image pour le sol de BoughraraRoute.....	49
Figure 3.24 :La propagation des fissures à l'été (T=30°C) par traitement d'image pour le sol deBoughrara Barrage.....	50
Figure 3.25 :La propagation des fissures à l'été (T=30°C) par traitement d'image pour le sol de Bâb El-Assa.....	51
Figure 3.26 :Initiation et propagation des fissures au cours du temps à l'air libre (T= 22°C) pour le sol de Boughrara Route.....	52
Figure 3.27 : Initiation et propagation des fissures au cours du temps à l'air libre (T= 22°C) pour le sol de Boughrara Barrage.....	53
Figure 3.28 : Initiation et propagation des fissures au cours du temps à l'air libre (T= 22°C) pour le sol de Bâb El-Assa.....	54
Figure 3.29 : La propagation des fissures à l'air libre (T=22°C) par traitement d'image pour le sol de Boughrara Barrage.....	55
Figure 3.30 :La propagation des fissures à l'air libre (T=22°C) par traitement d'image pour le sol de Boughrara Route.....	56
Figure 3.31 : La propagation des fissures à l'air libre (T=22°C) par traitement d'image pour sol de Bâb El-Assa.....	57
Figure 3.32 :Evolution de la longueur des fissures en fonction du temps pour sol de Boughrara Barrage.....	58
Figure 3.33 :Evolution de la longueur des fissures en fonction du temps pour sol de Bâb El-Assa.....	58
Figure 3.34 :Evolution de largeur des fissures en fonction du temps pour sol de Boughrara Route.....	59
Figure 3.35 : Evolution de largeur des fissures en fonction du temps pour sol de Boughrara Barrage.....	59
Figure 3.36 : Evolution de largeur des fissures en fonction du temps pour sol de Bâb El-Assa.....	60
Figure 3.37 : Evolution de nombre des fissures en fonction du temps pour sol de Boughrara Barrage.....	60
Figure 3.38 : Evolution de nombre des fissures en fonction du temps pour sol de Bâb El-Assa.....	61
Figure 3.39 :La variation de la teneur en eau en fonction de temps de sol de Boughrara Route.....	63
Figure 3.40 :La variation de la teneur en eau en fonction de temps de sol de Boughrara Barrage.....	63
Figure 3.41 :La variation de la teneur en eau en fonction de temps de sol de Bâb El-Assa.....	64

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Caractéristiques microscopiques des principales argiles.....	8
Tableau 3.1 : Résultats d'identification des trois matériaux (Identification de sol Boughrara Barrage est d'après BENDI-OUIS A., (2014) et Boughrara Route est d'après KAZI AOUAL R. et KENADIL A., 2016).....	39
Tableau 3.2 : Limites de retrait des matériaux testés.....	64

LISTE DES ABREVIATIONS

AFNOR : Association Française de Normalisation.

BRGM : Bureau de Recherche Géologiques et Minières.

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

C_u : coefficient d'uniformité.

C_c : coefficient de courbure.

d₁₀ : Diamètre des grains correspondant à 10% de passant.

d₃₀ : Diamètre des grains correspondant à 30% de passant.

d₆₀ : Diamètre des grains correspondant à 60% de passant.

G_s : Densité des grains solides.

I_p : Indice de plasticité.

S : succion.

U_a : Pression interstitielle de l'air.

U_w : Pression interstitielle de l'eau.

V_{BS} : valeur au bleu de méthylène.

W : Teneur en eau.

W_L : limite de liquidité.

W_P : limite de plasticité.

W_R : limite de retrait.

γ_w : Poids volumique de l'eau

INTRODUCTION GENERALE

En Génie Civil, les phénomènes de retrait-gonflement de certains sols argileux induisent des tassements différentiels qui se manifestent par des désordres affectant principalement les structures construites en surface (bâtiment, fondation superficielle, ouvrage de soutènement, remblais,) et les ouvrages enterrés (tunnels, pieux, canalisation, fondation profondes.). Les exemples de désordres liés à la présence d'argiles gonflantes sont nombreux et variés (*Chen 1965, Mouroux et al. 1988, Philipponat 1991, Fleureau & Hachichi 1999, Bigot & Zerhouni 2000, Djedid & Bekkouche 2001, etc*) (Cité par NOWAMOOZ.H., 2007).

En Algérie, le phénomène de retrait- gonflement a causé de nombreux dégâts dans plusieurs localités : Ain amènes (raffinerie de Sonnatrach), Tlemcen, Msila,

Le développement de fissures produit des changements significatifs des propriétés du sol comme la perméabilité, la compressibilité et les résistances au cisaillement et à la traction. Bien évidemment, l'évolution de ces caractéristiques hydromécaniques est fonction principalement de l'évolution de l'état hydrique qui peut être liée à la teneur en eau ou au degré de saturation ou à la succion.

L'objectif général de ce mémoire de master est d'apporter une contribution à la compréhension de mécanisme de retrait et la fissuration dans quelques sols argileux de la wilaya de Tlemcen, de différentes plasticités. Ainsi que la caractérisation de l'amorçage des fissures dans les sols étudiés au cours d'un séchage libre par la technique de traitement de photographies.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique du phénomène de retrait : il présente une description rapide sur les matériaux argileux. Ensuite on aborde le phénomène de retrait, son mécanisme et comment le déterminer au laboratoire.

Le deuxième chapitre présente quelques résultats trouvés dans la littérature de chercheurs abordant la thématique de la propagation de la fissuration dans les argiles. Ainsi que les méthodes expérimentales pour suivre ce phénomène.

INTRODUCTION GENERAL

Le troisième chapitre est consacré à l'étude expérimentale menée au laboratoire de l'équipe « Sols Non Saturés & Couplages, EOLE » situé au département de génie-civil.

Des essais de séchage ont été menés sur trois différents types de matériaux argileux pour étudier le phénomène de retrait en parallèle avec le développement des fissures au cours du processus du séchage des sols fins. Ces matériaux sont préparés sous forme de pâte et soumis au séchage à l'air libre et dans une étuve à une température constante de 30°C.

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'image « ImageJ ». Ceci a permis de décrire qualitativement le développement des fissures au cours du retrait de ces matériaux de la région de Tlemcen.

Enfin, une conclusion générale clôture ce modeste travail.

CHAPITRE I :
RETRAIT DES ARGILES

RETRAIT DES ARGILES

1. Introduction :

Le phénomène de retrait de certaines formations géologiques argileuses, ayant de forts indices de plasticité, pose de sérieux problèmes dans plusieurs pays du monde, notamment ceux situés en zones arides et semi arides.

En Algérie, les sols gonflants sont très répandus et plusieurs régions In-Aménas, In-Salah, Médéa, M'sila, Tlemcen, Mostaganem, etc. y sont touchées. De nombreux désordres d'ouvrages ont été recensés (*Ameur, 1989 ; Bahar et Kenai, 2002, Bahar et Kenai, 2008 ; Bekkouche, 1997, Djedid et al, 2001 ; Hachichi et Fleureau, 1999*). Ce phénomène continu encore à se manifester dans de nombreuses régions et engendre chaque année des dégâts considérables.

Dans le domaine du génie civil, les déformations causées par le retrait/gonflement des sols argileux, interagissant avec les structures et ouvrages, induisent en général des tassements différentiels au niveau de la base de l'ouvrage, qui peuvent conduire à des dégradations, affectant soit les éléments structuraux soit l'esthétisme de l'ouvrage (micro-fissures). Les ouvrages les plus touchés sont généralement des pavillons individuels, comme cela a été constaté lors de la sécheresse de 2003 en France (*Vincent et al. 2008*).

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 (*Yessiler et al. 2000*). Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons à la fissuration qui provient de la réduction de la teneur en eau causée par la dessiccation.

2. Les sols argileux :

Une argile c'est une roche sédimentaire, composée pour une large part de minéraux, silicates d'aluminium en général plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée, capacité plastique, ou bien une structure fibreuse, capacité

d'absorption. Vis-à-vis de la géotechnique, on désigne par argile les matériaux de granulométrie inférieure à $2\mu\text{m}$.

Les minéraux les plus communs dans les argiles sont les suivants :

La kaolinite, halloysite, montmorillonite, illite et les vermiculites.

La présence de tels minéraux rend l'argile fortement sensible aux molécules polaires d'eau. Cette sensibilité se traduit par le gonflement et/ou le retrait du sol.

Les minéraux argileux se caractérisent par trois propriétés principales :

- Leur nature et leur minéralogie ;
- Leur liaison interfoliaire et leur propriété électrochimique ;
- Leur capacité d'adsorption d'eau et de gonflement.

2.1 Caractérisation minéralogique :

2.1.1 Aspects microstructuraux des sols gonflants :

Nous donnons en premier lieu une analyse de la structure des argiles depuis le feuillet élémentaire jusqu'à l'échantillon en considérant, aux échelles intermédiaires, la particule et l'agrégat. Le rôle très important du milieu dipolaire (eau) dans le comportement de ces matériaux sera également défini par l'étude des interactions physico-chimiques « fluide interstitiel – argile ».

2.1.2 Structure minéralogique des argiles :

Les minéraux argileux sont des silicates hydratés (il s'agit généralement de silicates d'aluminium, mais parfois de silicates de magnésium), dont la structure feuilletée permet de les ranger dans la famille des *phyllosilicates*. Leur phase solide est structurée suivant une organisation spatiale particulière : le feuillet, la particule et l'agrégat (*Jackson & Sherman, 1953 ; Caillere & Hénin, 1959 ; Grim, 1962 ; Millot, 1964 ; Mitchell, 1976, 1993 ; Voïnovitch, 1971,*).

A. Le feuillet :

Il est défini comme une superposition de plans ioniques organisés suivant deux types de couches : *les couches tétraédriques (Figure 1.1)*, de formule générale SiO_4 et dont l'épaisseur est de 3 \AA . L'oxygène occupant les sommets du tétraèdre et le centre étant occupé par un atome de silicium, et *les couches octaédriques (Figure 1.2)*, de formule générale $\text{Al}_2(\text{OH})_6$ ou $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$ et dont l'épaisseur est de 4 \AA ; dans ces dernières, les octaèdres ont leurs sommets occupés par des hydroxyles OH tandis que le centre est occupé par un atome d'aluminium ou un atome de magnésium.

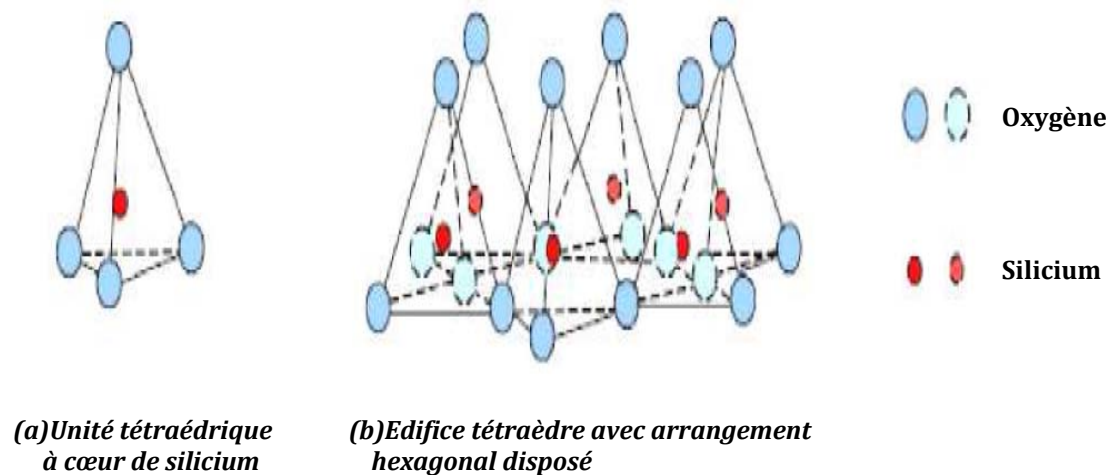


Figure 1.1 : Structure Élémentaire Tétraédrique (Freeah, 2006).

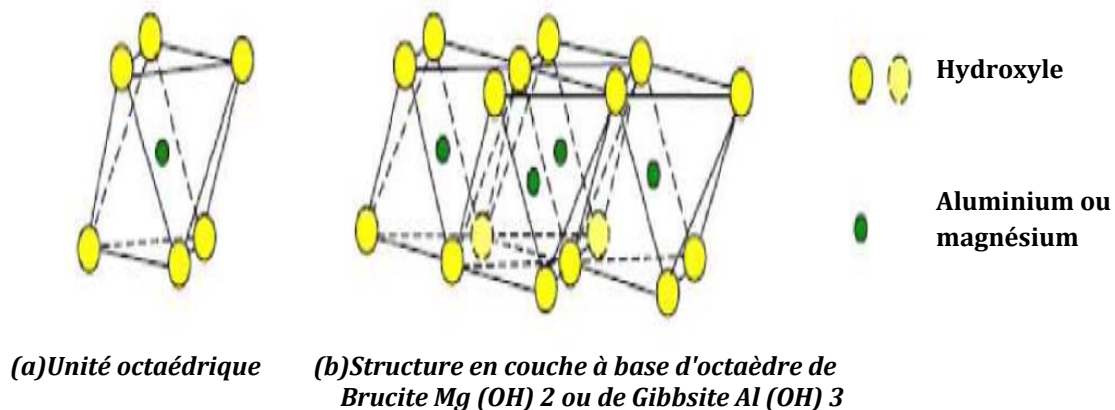


Figure 1.2 : Structure Élémentaire Octaédrique (Freeah, 2006).

B. La particule :

C'est un empilement (superposition) de feuillets argileux suivant différentes configurations, qui peut atteindre une taille maximale de 2 μm .

La position des feuillets les uns par rapport aux autres et le nombre de feuillets par particule sont variables suivant le type d'argile considéré et dépendent de son état hydrique (Ben Rhaeim et al., 1986 ; Saiyouri, 1996).

C. L'agrégat (appelé aussi grain) :

C'est un assemblage désordonné entre les particules d'argile dont la forme et les dimensions peuvent varier.

A l'échelle de l'agrégat, trois niveaux structuraux peuvent alors être distingués : l'infrastructure qui correspond à la particule argileuse, la microstructure qui correspond aux agrégats formés par l'assemblage des particules argileuses et des autres éléments du sol, et la macrostructure qui correspond à l'assemblage macroscopique des agrégats.

D. Les Clusters (assemblage d'agrégats) :

Le dernier niveau d'organisation formé par le regroupement d'agrégats est appelé super- agrégats (cluster), (Figure 1.3).

Selon *Tessier et Pedro (1976)* l'association entre les particules argileuses s'effectue de différentes façons, selon les argiles :

- Pour la kaolinite et l'illite, les associations se font en châteaux de cartes dont l'assemblage est plus ou moins serré fonction du niveau de consolidation.
- Pour la smectite, il s'agit le plus souvent d'un réseau tridimensionnel par chevauchement des particules face à face. Les particules sont suffisamment flexibles pour que les feuillets soient parallèles à l'intérieur des parois du réseau. (Cité par Vincent et al., 2006).

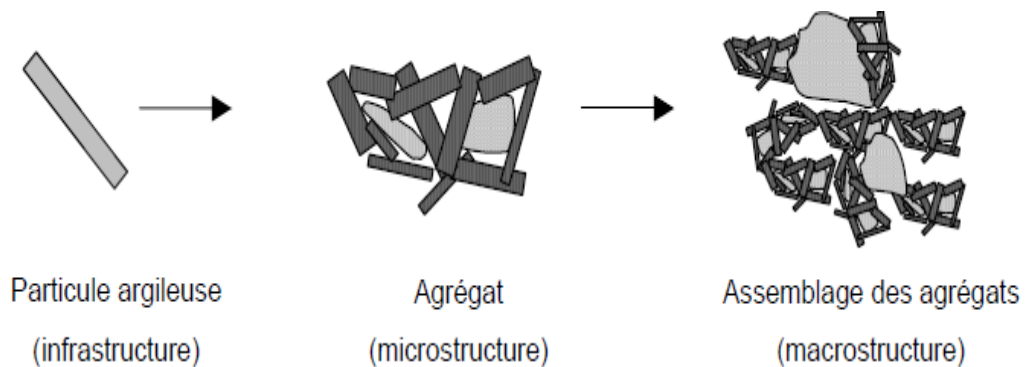


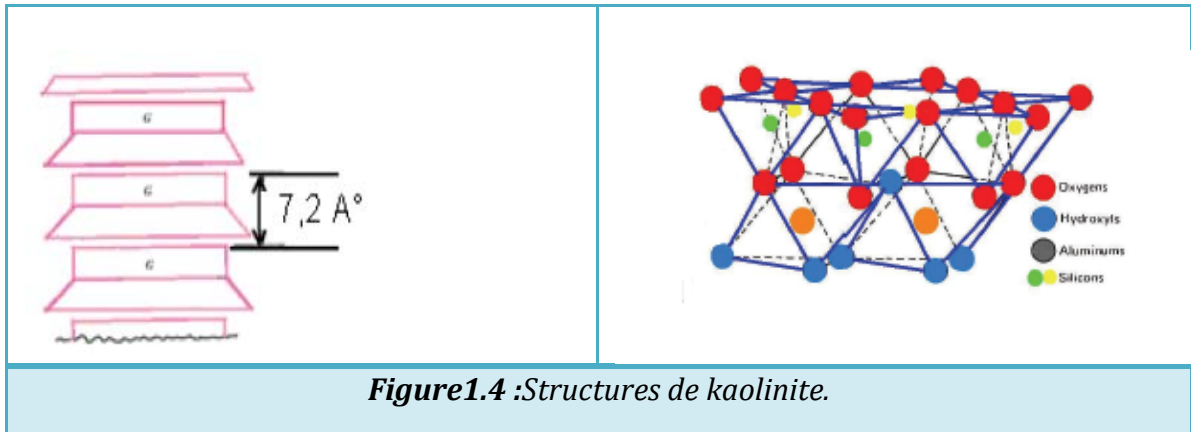
Figure 1.3 : Différents niveaux structuraux des sols gonflants
(Gens et Alonso, 1992).

2.2 Familles argileuses :

Trois grands groupes d'argiles sont souvent rencontrés en géotechnique : les *kaolinites*, les *illites* et les *smectites*. Ces argiles pures représentent des références pour la classification des différentes argiles, qu'elles soient naturelles ou artificielles.

2.2.1 Famille de Kaolinites :

Les kaolinites sont des minéraux argileux de type 1 :1 (Te-Oc), à feuillets d'équidistance fixe de 7 Å. Les kaolinites ont une surface spécifique qui ne dépasse pas généralement 45 m²/g, (Figure 1.4).



2.2.2 Famille de l'illites :

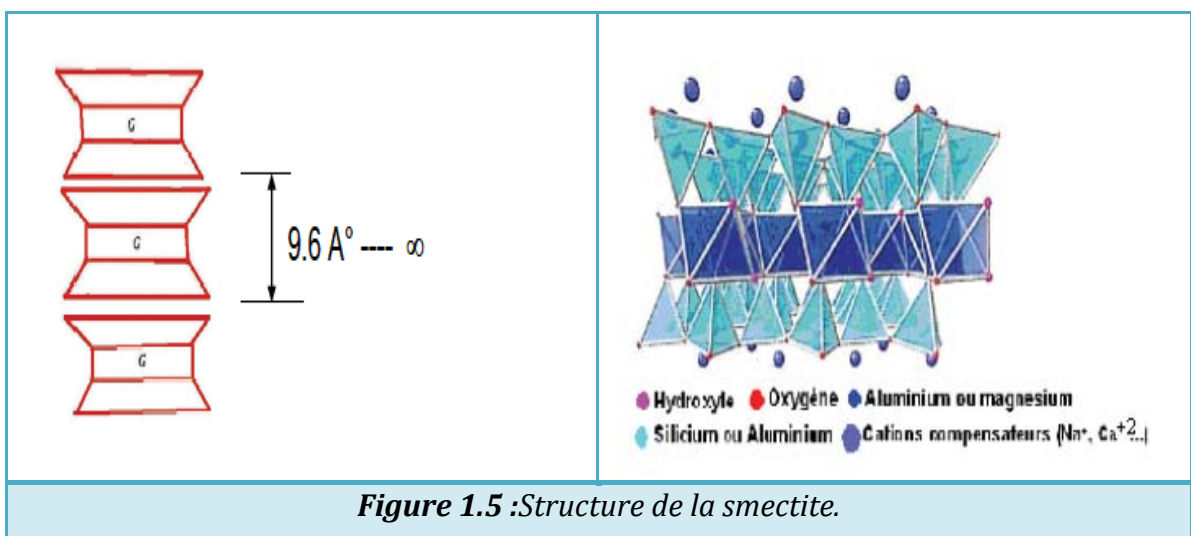
Les illites sont des minéraux argileux de type 2 :1 (Te-Oc-Te), à feuillets d'équidistance fixe de 10 Å. Elles ont la même composition que la montmorillonite, mais une liaison forte entre les feuillets est permise par la présence de cations potassium K^+ .

Ce caractère leur confère un potentiel de gonflement moindre que celui des smectites et la constitution de particules de tailles importantes. Les particules sont généralement composées d'un empilement de 5 à 20 feuillets (Blot, 1956), avec une épaisseur de moins d'une dizaine de nanomètres.

2.2.3 Famille de Smectites :

Les smectites sont des minéraux argileux de type 2 :1 (Te-Oc-Te). L'empilement des feuillets est désordonné ; chaque feuillet est tourné dans son plan par rapport au précédent et a une extension latérale extrêmement grande par rapport à son épaisseur qui est d'environ 14 Å (Figure 1.5).

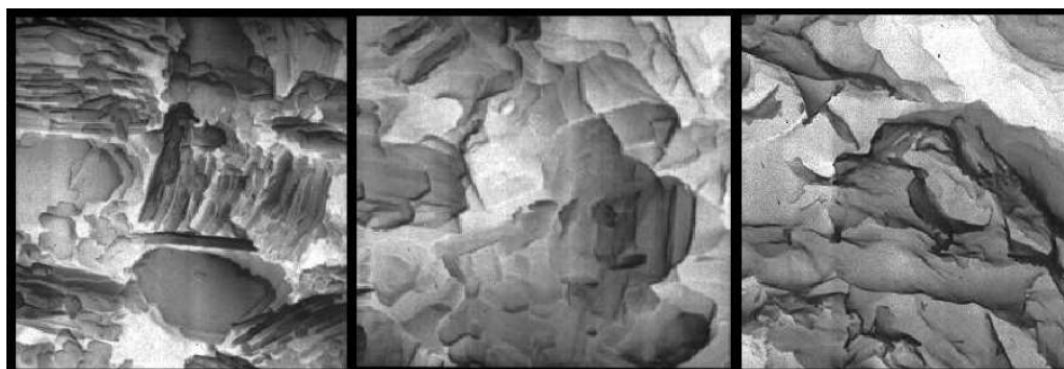
Les smectites sont très sensibles à l'eau et ont un important taux de gonflement. Ce gonflement peut atteindre des valeurs dépassant l'épaisseur du feuillet lui-même.



Les différentes caractéristiques de chaque argile citée ci-avant sont résumées dans le *tableau 1.1* ainsi que des photographies au MEB des différentes familles des argiles (*Figure 1.6*). (Cité par Vincent M et al., 2006).

Tableau 1.1 : Caractéristiques microscopiques des principales argiles.

Argile	Kaolinite	Illite	Smectite
Type de feuillet	1 :1	2 :1	2 :1
Épaisseur de feuillet (Å)	7	10	9,6
Nombre de feuillet par particule	10-150	5-20	1-10 (montmorillonite sodique) 10-40 (montmorillonitecalcique)
Capacité d'échange cationique CEC (még/100 g)	5-15	10-40	80-150
Surface spécifique (m²/g)	10-45	80-100	700-900
Matériau interfoliaire	-	K ⁺	H ₂ O, Na ⁺ , Ca ²⁺ ,...
Comportement dans l'eau	Non-gonflant	Peu-gonflant	Gonflant



Kaolinite

Illite

Montmorillonite

Figure 1.6 : Photographies au Microscope Electronique à Balayage (MEB) des argiles (Mitchell, 1976).

2.3 Quelques pathologies dues aux sols argileux :

Les phénomènes de retrait et de fissuration des sols argileux sont associés à des périodes prolongées de sécheresse, à une forte exploitation d'eau souterraine, à la présence d'arbres de haute demande hydrique, etc. En effet, lorsque la couche d'argile active se trouve sollicitée par des cycles de sécheresse, les déformations qui naissent par retrait se trouvent empêchées intégralement ou partiellement, ce qui engendre des contraintes de traction, qui peuvent dépasser la résistance à la traction.

Le retrait est un problème complexe qui touche plusieurs pays tels que l'Afrique du sud, l'Algérie, l'Afrique du Nord, ...

En Algérie, plusieurs cas de désordres très préjudiciables, sont liés au gonflement. On cite à titre d'exemple, l'hôpital de Batna et la raffinerie d'In-Amenas. Ce dernier cas est un exemple frappant puisqu'il concerne des ouvrages pétroliers déplacés à un autre endroit, et ceci peut se répercuter sur l'économie.

Le problème principal de la région d'In-Aménas est le gonflement/retrait qui cause des fissures apparaissant clairement sur les constructions et sur les routes, signalons que le sol d'In-Aménas présente un indice de plasticité $I_p = 38,92\%$, une limite de liquidité $W_L = 62,71\%$ et une limite de plasticité $W_p = 23,93\%$. Ces fissures occasionnent des ouvertures dans les fenêtres et les portes et elles se propagent dans la maçonnerie et la structure de l'ouvrage (*figure 1.7*), (*figure 1.8*), (*figure 1.9*) et (*figure 1.10*). (Cité par DJAANI, M., et BENMANSOU, S.F., 2011).



Figure 1.7 : Fissure sur les murs (Zenkhrri, 2010).

(Cité par DJAANI et BENMANSOUR, 2011, Stabilisation des sols gonflants de la région d'In-Aménas par ajouts des liants hydrauliques (Chaux et Ciment)).

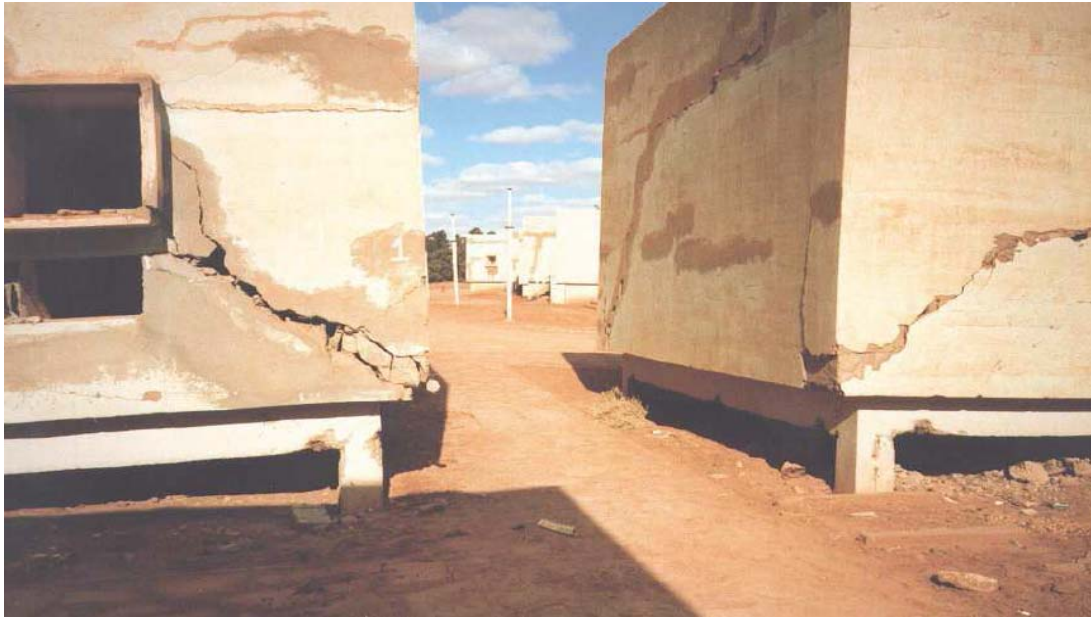


Figure 1.8 : Fissures diagonales (Derviche et al.)
(Cité par DJAANI et BENMANSOUR, 2011, Stabilisation des sols gonflants de la région d'In-Amenas par ajouts des liants hydrauliques (Chaux et Ciment)).



Figure 1.9 : Cisaillement au niveau des nœuds (Derriche et al.)
(Cité par DJAANI et BENMANSOUR, 2011, Stabilisation des sols gonflants de la région d'In-Aménas par ajouts des liants hydrauliques (Chaux et Ciment)).

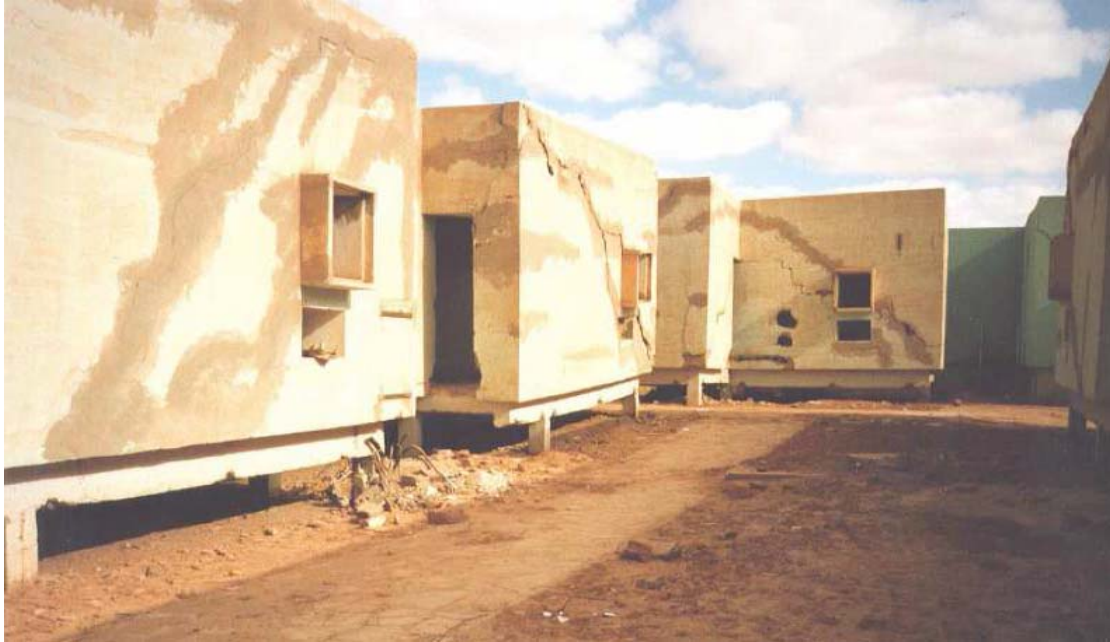


Figure 1.10 : Fissures dans les murs au niveau de la fenêtre
(*Derriche Z et al.*) (D'après *DJAANI. M et BENMANSOUR. S.F,2010-2011*,
Stabilisation des sols gonflants de la région d'In-Aménas par ajouts des liants
hydrauliques (Chaux et Ciment)).

Un autre exemple du phénomène de retrait des argiles s'est produit dans le nord-occidental de la ville de Bogota (Colombie), des fissures superficielles sont apparus il y'a approximativement 27 ans. La taille et la densité de ces fissures augmentent progressivement d'après la description des habitants du lieu, et avec une accélération importante dans les dernières sept années. La zone est principalement rurale, a forte exploitation d'eau souterraine utilisée pour l'agriculture. Dans quelques endroits, on trouve des fissures de 20m de longueur, 2m d'ouverture et plus de 6m de profondeur qui ont été observées (*Avila, 2004*).

Ces fissures provoquent des dommages dans les routes de la zone, et affectent l'utilisation des terres rendant dangereux le transit des personnes et des animaux et réduisent la surface cultivable. Dans la zone urbaine, qui a des caractéristiques géologiques semblables à celle de la zone rurale, le problème est moins grave. Toutefois, on observe dans beaucoup de sols superficiels la présence de petites fissurations qui sont dues à la dessiccation superficielle des terrains. (Cité par *TRABELSI.H., 2013*).

La *figure 1.11* montre des désordres dus à la présence de sols argileux (fissures, retrait).



Figure 1.11 : Des exemples de désordres dans le monde à partir de Google.

3. Phénomène de retrait :

Le 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 ; Millot, 1964*) :

- L'environnement du sol argileux : le climat (océanique, continental, méditerranéen...), la météorologie (précipitations, température, vent...), la végétation, la matière organique...
- Son origine géologique : sédimentaire, détritique...
- Son contexte géomorphologique : localisation dans une vallée, en pente, dans des anciens marais...
- Son utilisation « anthropique » : construction de maisons individuelles (*figure 1.12*), d'immeubles, d'ouvrages d'art, agriculture...

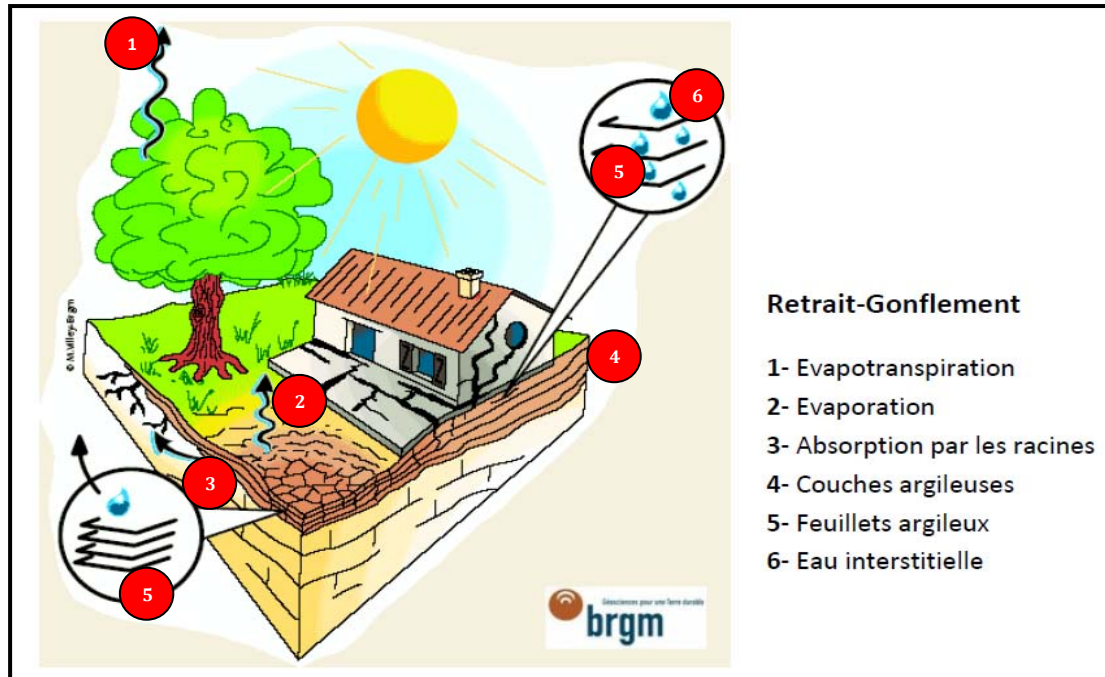


Figure 1.12: Dessiccation des sols argileux en période sèche
(Source : Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)).

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. (Cité par NOWAMOOZ.H., 2007).

Pendant le drainage d'un sol on peut observer trois phases successives ([Schubert, 1982](#)) :

- Dans la première phase, tous les macropores sont complètement saturés (*Figure 1.13a*).
- La deuxième phase, appelée phase transitionnelle, commence au point d'entrée d'air due à l'évaporation de l'eau de surface des macropores. Le sol se désature et l'air entre dans les pores. En revanche, l'air sera enfermé dans les pores et quelques pores seront encore saturés (*Figure 1.13b*).
- Dans la dernière phase, le sol ne peut plus perdre de volume, l'air occupe tout l'espace des macropores et l'état de volume constant sera atteint (*Figure 1.13c*).

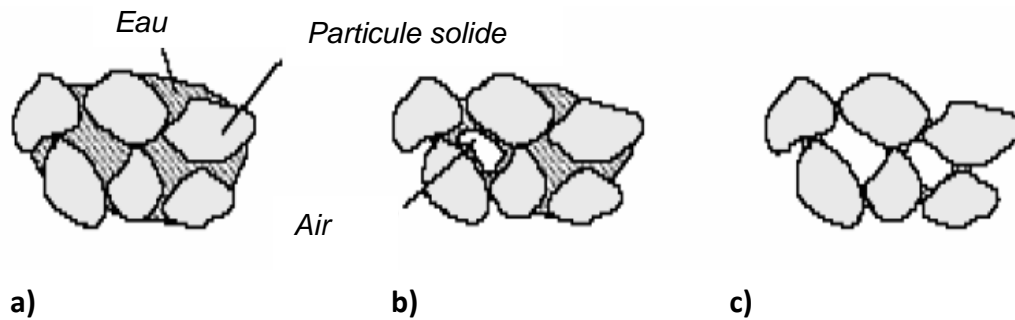


Figure 1.13: Différentes phases du retrait (Schubert, 1982).

Le déroulement du retrait peut être décrit en trois phases, en fonction de la diminution du volume d'eau et de sol : retrait normal, retrait résiduel et absence de retrait qui sont montrés sur la courbe de retrait (Figure 1.14) (Haines 1923 ; Sposito 1973 ; Mc Garry & Daniells, 1987 ; Coughlan et al., 1991 ; Kim et al., 1992 ; Tripathy et al., 2002). (Cité par NOWAMOOZ.H., 2007).

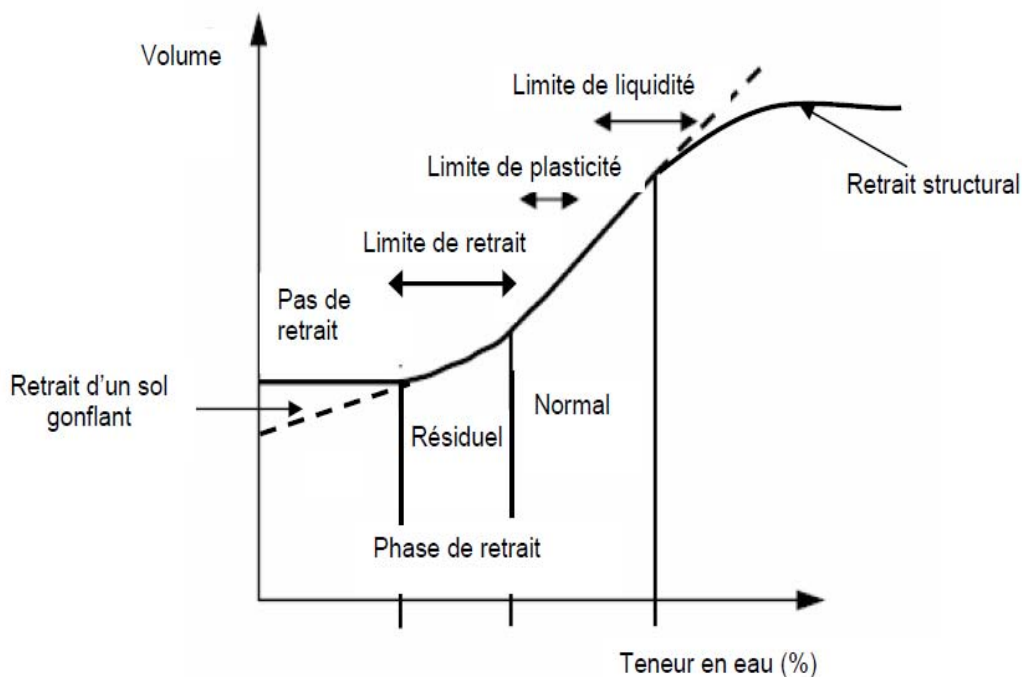


Figure 1.14 : Courbe de retrait classique.
(NOWAMOOZ.H., 2007)

Le retrait évolue de manière linéaire jusqu'à une teneur en eau définie comme la limite de retrait (W_s). A partir de cette limite, le sol perd de l'eau sans grande variation de volume.

On considère la limite de retrait comme l'intersection de deux segments présentant le retrait normal et l'absence de retrait. Le coefficient de retrait (RI) est égal à la pente de la droite du graphe qui représente la variation relative de hauteur en fonction de la teneur en eau (figure 1.14).

Dans les sols naturellement structurés, il y a aussi une quatrième phase appelée retrait structural (*figure 1.14*). Le volume d'eau perdu est supérieur à la diminution du volume de sol (*Yule & Richie, 1990*). 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 1.14*).

3.1 Retrait des sols fins :

Différents types d'essais de dessiccation (*Philipponnat 1991, Biarez et al. 1988, AFNOR XP P94-060 parties 1 et 2*) sont réalisés pour caractériser la déformation ou le retrait des sols argileux. Toutefois, ces essais ne conduisent pas toujours aux mêmes caractéristiques. En outre, certains essais tendent à disparaître, en raison de problèmes pratiques posés par leur mise en œuvre (par exemple, l'utilisation de produits cancérigènes comme le mercure).

3.1.1 Essais de dessiccation pour la détermination de la limite de retrait conventionnelle :

La description de cet essai est détaillée dans la norme AfnorN.F XP P94-060.1. L'essai consiste à préparer, à partir d'un échantillon de sol, une pâte sur les éléments passant au tamis de 400 μm et à soumettre des éprouvettes de volume initial connu de cette pâte à dessiccation à l'air libre, puis à l'étuve où une mesure du volume est faite.

En postulant que ce volume est identique à celui qui correspond à la limite de retrait et que la variation de volume n'est due qu'au départ de l'eau pendant la dessiccation, il est possible de déterminer la limite de retrait conventionnelle W_R .

3.1.2 Essais de dessiccation pour la détermination de la limite de retrait effective :

La norme française XP P94-060.2 fournit le détail du matériel et du mode opératoire de l'essai. Cet essai consiste à mesurer la variation de hauteur d'une éprouvette cylindrique extraite d'un échantillon intact, disposée sur un bâti et soumise à dessiccation à l'air libre, puis à l'étuve. L'évolution de la variation de hauteur avec la teneur en eau représente la courbe de retrait à partir de laquelle la limite de retrait effective est déterminée. Un exemple de mesure de la limite de retrait par les deux méthodes précédentes est donné sur la *figure 1.15*.

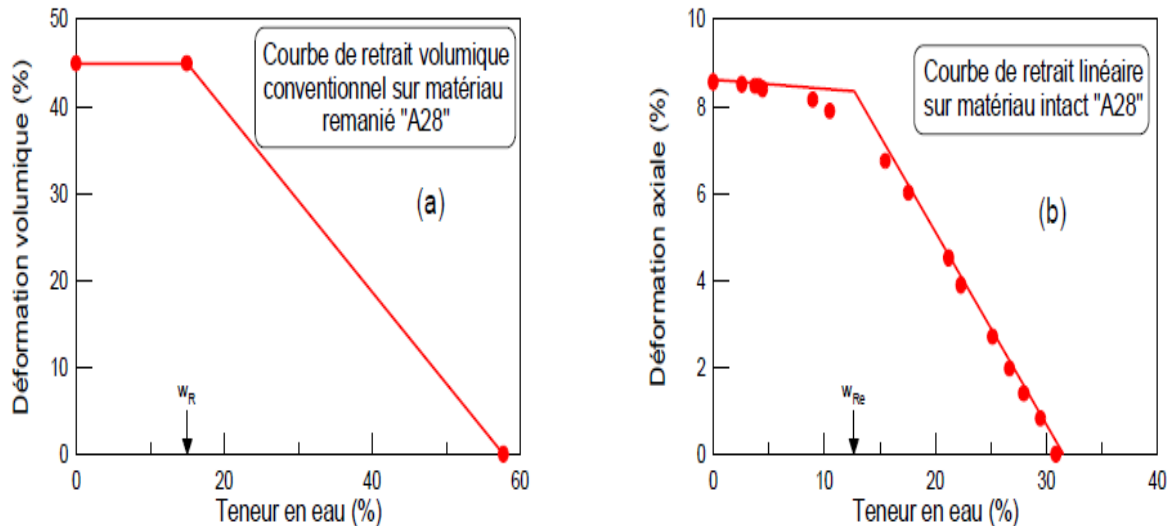


Figure 1.15 : Détermination des limites de retrait (a) conventionnelle sur le matériau argileux remanié et (b) effective sur le même matériau intact. (NOWAMOOZ., 2007).

4. Les fissures de dessiccation :

De point de vue géotechnique, 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 particules fines, sont caractérisés par une aptitude à changer de volume lorsqu'ils sont soumis à des succions élevées (Hillel, 1998 ; Boivin et al., 2006). Il se produit alors une rétraction des argiles qui se traduit verticalement par un tassement du sol et horizontalement par l'ouverture de fissures de retrait à la surface du sol. Les fissures de dessiccation provenant de phénomène de retrait représentent un facteur de sinistre aggravant pour l'assèchement des sols et la construction concernée.

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 (Zornberg et al, 2007). Il en résulte alors des changements 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 (Albrecht et Benson, 2001 ; Liu et al, 2004 ; Rayhani et al, 2007 ; Azam et al, 2011).

La fissuration de sol due à la dessiccation est donc un phénomène d'une importance certaine en géotechnique et en géotechnique environnementale. 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... (*Kodikara et al., 2000 ; Nahlawi et Kodikara, 2006 ; Péron et al., 2006; Rahardjo et al., 2008 ; Laloui et al., 2009 ; Rayhani et al., (2007,2008), Rodriguez et al., 2007 ; Tang, 2009 ; Tang et al., (2008,2010,2011)*).

Enfin, la fissuration due à la dessiccation peut causer des effets nuisibles sur la performance des géomatériaux dans diverses application d'ingénierie (*Costa et al., 2008*). Les fissures créent des zones de faiblesse dans la masse du sol, causant ainsi une réduction de la résistance, du taux de consolidation et de la stabilité du sol (*Morris et al., 1992 ; Yessiler et al., 2000 ; Tang et al., 2008*). Les fissures affectent la performance de bien d'autres ouvrages comme les couvertures monocouches ou multicouches, engendrant ainsi des problèmes de percolation et de drainage (*Lakshmikantha et al.,2006*).

De point de vue modélisation, on ne trouve dans la littérature que quelques études numériques réaliser à cet égard (*Graham et al., 2004 ; Zhang et fredlund, 2003 ; Zhang et fredlund, 2011 ; Fredlund et al., 2010*). Les principaux résultats de ces études montrent un gradient de teneur en eau beaucoup plus important en présence des fissures : la part d'évaporation liée aux fissures est loin d'être négligeable.

5. Conclusion :

Les matériaux argileux, que ce soit les sols ou les roches, sont très fréquents et couvrent une partie considérable du globe terrestre. La maîtrise du phénomène de retrait demande de grandes connaissances afin de minimiser les dégâts occasionnés par ce phénomène sur les différents ouvrages construits en formations argileuses.

Dans ce chapitre, on a présenté brièvement les conséquences du phénomène de retrait sur le comportement des ouvrages en général. Ensuite, on a présenté le phénomène de retrait, ses caractéristiques et comment identifier la limite de retrait au laboratoire.

Dans le chapitre suivant, on présentera le phénomène de fissuration dans les argiles, définitions et caractérisation au laboratoire.



CHAPITRE II :
METHODES DE LA CARACTERISATION DE
FISSURATION EXPERIMENTALEMENT



METHODES EXPERIMENTALES DE LA CARACTERISATION DE FISSURATION

1. Introduction :

La fissuration des sols due à la dessiccation est un phénomène d'une importance certaine en géotechnique et en géotechnique environnementale. En de nombreuses circonstances, les fissures de dessiccation entraînent des dommages dans divers types de structures géotechniques. Plusieurs chercheurs ont étudié ce problème et ont cherché à comprendre les mécanismes, notamment d'amorçage et de développement des fissures.

Plusieurs travaux ont tenté d'expliquer les phénomènes de fissuration par dessiccation en utilisant l'imagerie. Des essais unidirectionnels ont été réalisés (*Kodikara et al., 2000 ; Lecocq et Vandewalle, 2003 ; Péron, 2009 ; Mbemba, 2010 ; Amarasiri et al., 2011*).

Lecocq et Vandewalle (2003) ont réalisé une étude expérimentale sur une lame d'argile, longue et étroite. Les ruptures divisent la ligne d'argile en petits segments perpendiculaire à sa longueur. *Péron (2009)* a démontré l'effet de la rugosité du support sur l'apparition des fissures. Le retrait n'est accompagné de fissures que si le support sur lequel repose les échantillons engendre du frottement. En effet, ce frottement fait naître des efforts de traction dans l'échantillon qui sont la réponse aux déplacements induits par retrait. Lorsqu'en un point la contrainte de traction atteint la valeur de résistance de traction du matériau la rupture a lieu en ce point.

D'autres travaux ont étudié la propagation des fissures dans un domaine bidimensionnel. *Tang (2010)* a étudié l'effet de la température sur la dessiccation en utilisant la technique d'analyse d'image.

2. Fissuration par dessiccation : essais et résultats

La naissance des fissures par dessiccation se produit lorsque les forces de traction qui s'opposent au retrait dépassent la résistance à la traction du sol. Ce mécanisme, simple en apparence, conduit à de nombreuses questions concernant l'initiation et la propagation des réseaux de fissures et les changements radicaux dans les propriétés du sol comme la perméabilité, la compressibilité et la résistance. Plusieurs travaux

ont tenté d'expliquer les phénomènes de fissuration dans les sols, (*Lachenbruch, 1961a ; Towner, 1987 ; Abu-Hejleh et Znidarcic, 1995 ; Ayad et al., 1997 ; Konrad et Ayad, 1997b, a ; Groisman et Kaplan, 1994*). (Cités par TRABELSI.H., 2013).

2.1 Initiation des fissures :

Une série d'expérience ont été menées sur des échantillons du sol soumis au séchage pour étudier les conditions qui mènent à l'apparition des fissures du dessiccation (*Hu et al., 2006 ; Nahlawi et Kodikara, 2006 ; Min et Nhat, 2007 ; Corte et Higashi, 1964 ; Péron et al., (2006, 2009b) ; Morris et al., 1992 ; Abu Hajleh et Znidarcic, 1995 ; Konrad et Ayad, 1997 ; Kodikara et al., (1998, 2000) ; Péron. H., 2008 ; Tang et al., 2011*). 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. La désaturation du sol due à l'évaporation engendre une augmentation de succion. La succion S est défini comme une pression interstitielle négative confère aux sols non saturés des caractéristiques physiques et mécaniques qui les distinguent des sols saturés, et rendent ainsi insuffisantes la théorie de la mécanique des sols classique qui avait comme hypothèse principale la saturation du milieu, où $S = U_a - U_w$ (DERFOUF, 2014).

Des contraintes de tension se développent ainsi dans le matériau et croissent avec la progression de la dessiccation. Une fois la résistance à la traction du sol est atteinte, l'énergie de déformation imposée par le retrait est suffisante pour briser les liens inter particulaires. Des fissures se forment à ce point et se propagent en libérant une partie des contraintes de traction (*Figure 2.1*) (TABBAL.D., 2013).

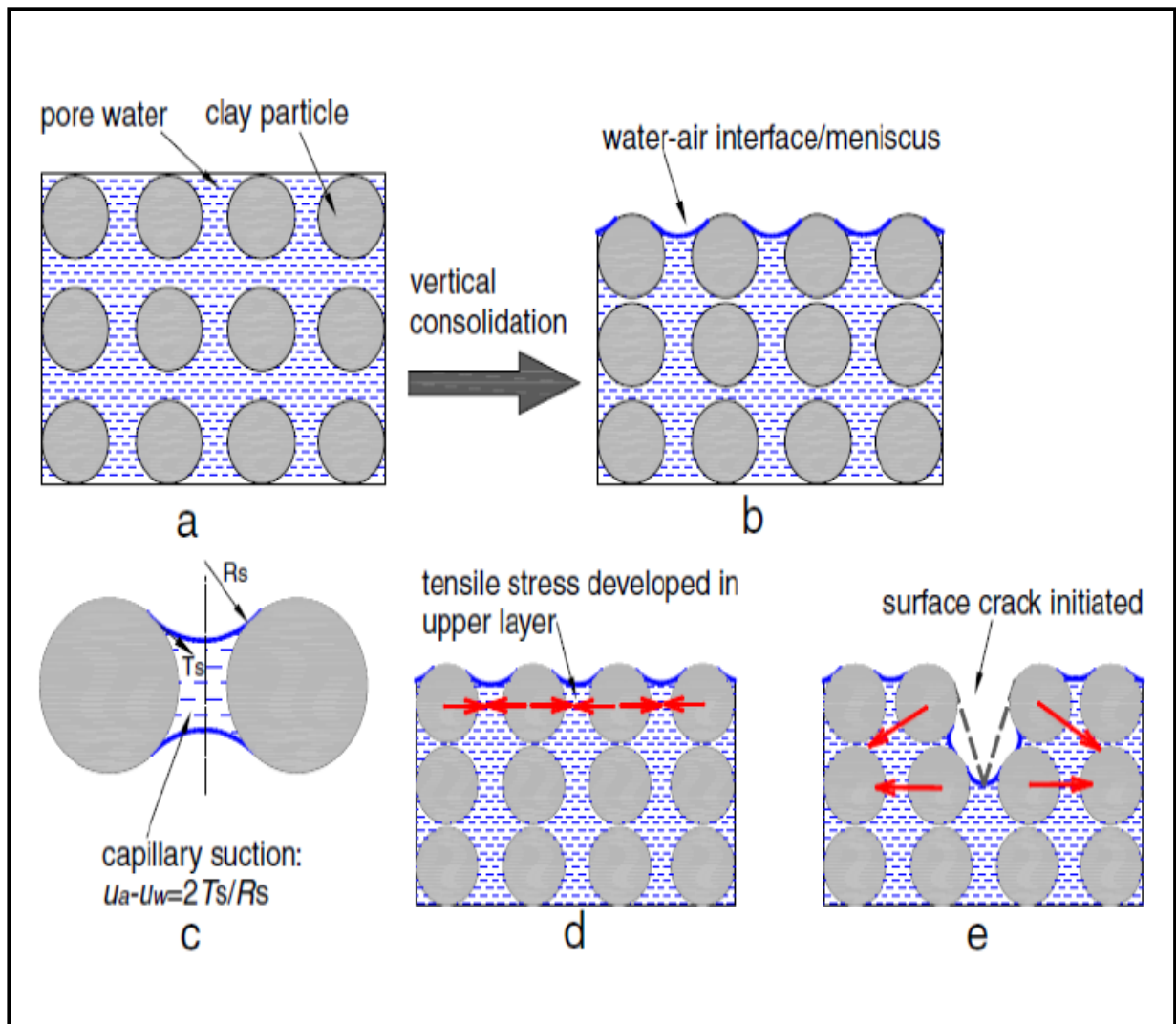


Figure 2.1 : Processus de l'initiation des fissures : (a) sol initialement saturé ; (b) développement de ménisque à l'interface eau-air entre les particules ; (c) force capillaire entre les particules ; (d) développement des contraintes de tension dans la tranche superficielle et (e) initiation des fissures à la surface (Tang et al., 2011).

2.2 Structure et extension des fissures :

La fissuration commence d'abord par la surface comme la succion y est plus importante (Blight, 1997). La concentration des contraintes en bout de fissure induit la propagation de ces fissures en profondeur, contrôlée par les champs de contrainte et les propriétés intrinsèques du sol (Konard et Ayad, 1997). Lorsqu'une fissure apparaît, le processus initié peut créer d'autres fissures qui vont se développer entre les premières, tout en s'élargissant au cours du temps.

Péron et al. (2006, 2009b) notent que le relâchement de contraintes n'est pas total lors de la création de la première fissure. Cependant, celles-ci atteignent un nombre maximum au bout d'un certain temps. Plusieurs travaux se sont penchés sur la quantification du développement des réseaux de fissures et pour décrire les mécanismes qui se produisent lors de la dessiccation.

Hallaire (1984, 1988) a étudié la fissuration d'un sol argileux in situ et au laboratoire. Les résultats mettent en évidence deux phases de fissuration du sol au cours du retrait. Dans la première phase, l'épaisseur des fissures augmente, il en résulte alors un réseau dense de fissures fines. La seconde phase referme une partie de ces fissures fines et continue d'accroître l'épaisseur des fissures résiduelle, il en résulte alors un réseau plus lâche de fissures larges.

Afin de décrire le mécanisme de fissuration, *Konrad et Ayad (1997)* ont réalisé une étude expérimentale sur un site argileux située à 80 Km à l'ouest de la ville de Québec et exposé à une évaporation continue durant 35 jours. Les observations in situ ne montrent pas une fermeture nette des fissures primaires.

La *figure 2.2* schématise les différentes phases conduisent à la formation de fissures de dessiccation dans l'argile Saint-Alban intacte en Québec, Canada. Les mécanismes observés peuvent être décrits par les six principaux événements, (TABBAL, 2013) :

1. - Formation des fissures primaires après 17 heures et un espacement moyen de 20 à 24 cm.
2. - Augmentation des contraintes de traction au sein de chaque polygone suivi d'un élargissement des fissures ($e = 4$ mm) et propagation des fissures primaires.
3. - Formation des fissures secondaires lorsque les contraintes de tension développées atteignent la résistance à la traction du sol.
4. - Formation de fissures subhorizontales à l'intérieures des fissures existantes à une profondeur de 6 à 8 cm par suite de déformations différentielles induites par le retrait différentiel du polygone de sol. La longueur de la fissure horizontale est environ un tiers de la taille de polygone (soit 3 à 4 cm).
5. - Formation d'un nouvel ensemble de fissures verticales sous de fissures horizontales.
6. - Formation de protubérances sous les polygones produits.

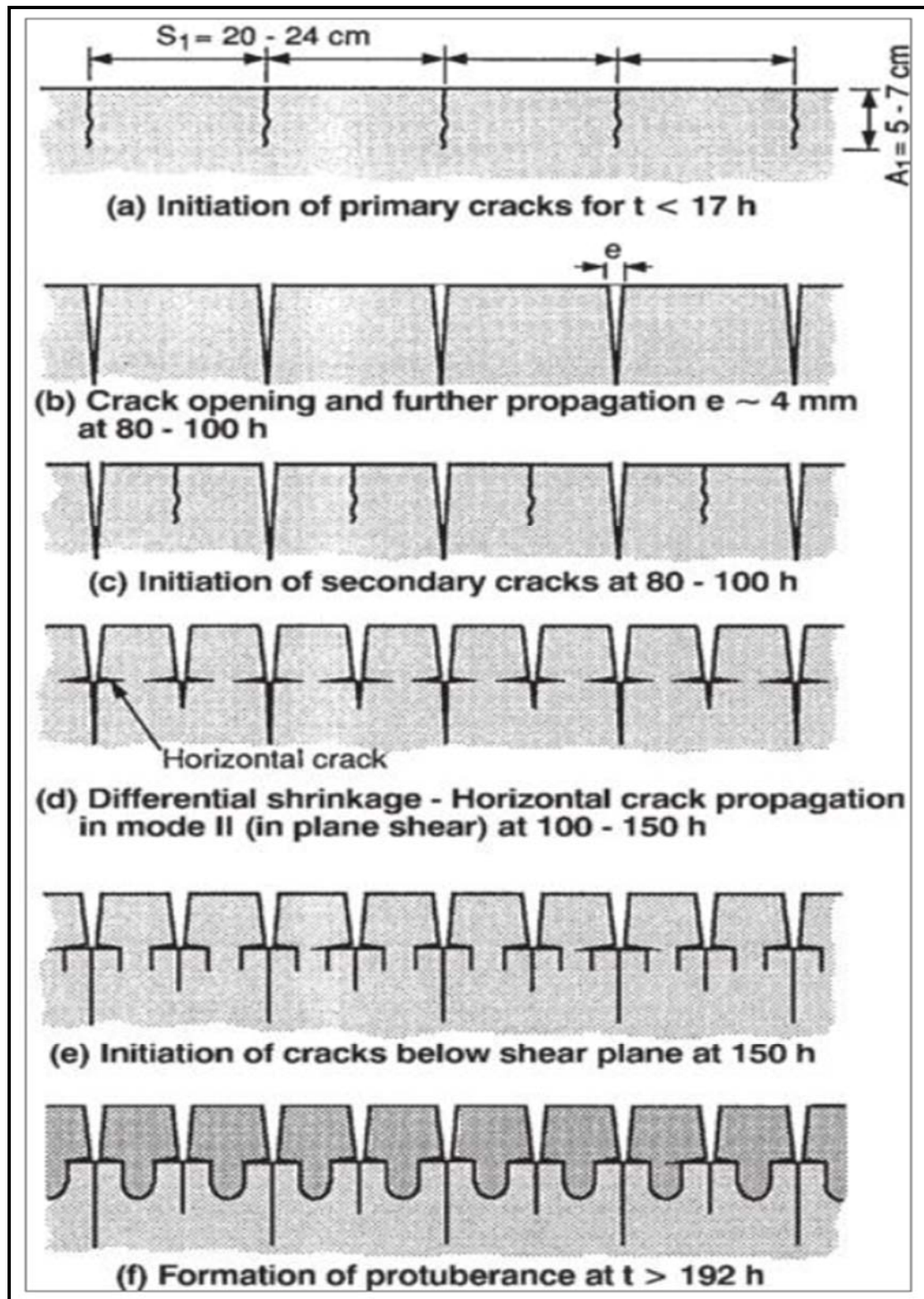


Figure 2.2 : Etape de fissuration d'une argile Saint-Alban intacte (Konrad et Ayad, 1997).

Dans le même contexte, des études ont été réalisées au laboratoire sur des sols argileux intacts afin de caractériser l'initiation des fissures et suivre leurs géométries et leurs développements au cours de séchages. L'observation montre les fissures se développent selon trois phases, (Tabbal, 2013) :

- 1- ***Fissure initial***: fissures indépendantes qui commencent près des bords.
- 2- ***Fissure secondaire***: fissure qui débutent à partir des fissures existantes (formation des intersections).
- 3- ***Stabilisation***: une dessiccation ultérieure n'entraîne plus des fissures ; ce stade consiste seulement à l'élargissement des fissures existantes jusqu'à la fin de la dessiccation.

A titre d'illustration, la *figure 2.3* montre les résultats de fissuration réalisée au laboratoire par (Tang et al., 2011) sur un échantillon d'un sol argileux soumis à la dessiccation, la limite de liquidité de l'échantillon $W_L=72\%$ et la limite de plasticité $W_p= 43\%$.

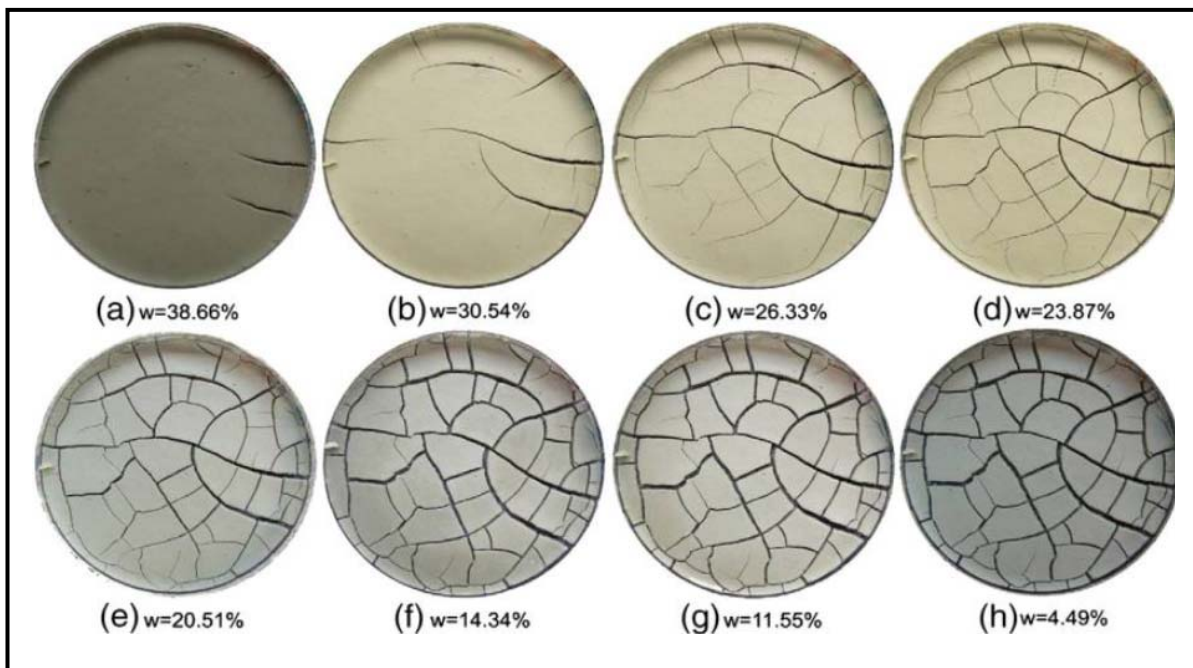


Figure 2.3 : Evolution de la géométrie des fissures sur la surface de l'échantillon soumis à la dessiccation (Tang et al., 2011).

2.3 Aperçu sur les expériences de Lecocq et Vandewalle (2003)

2.3.1 Fissures unidirectionnelles (Lecocq et Vandewalle, 2003)

Pour étudier les aspects dynamiques de l'ouverture des fissures qui se produit dans les argiles par le phénomène de retrait du a la dessiccation, quelques essais unidirectionnels ont été réalisés (Kodikara et al., 2000 ; Lecocq et Vandewalle, 2003 ; Mbemba, 2010 ; Amarasiri et al., 2011).

Lecocq et Vandewalle (2003) ont réalisé une étude expérimentale sur une lame mince d'argile de faible largeur. Ils ont employé une longue ligne étroite d'argile afin d'obtenir des fissures seulement dans la direction perpendiculaire à la ligne. Les ruptures divisent la ligne d'argile en petits segments (figure 2.4).

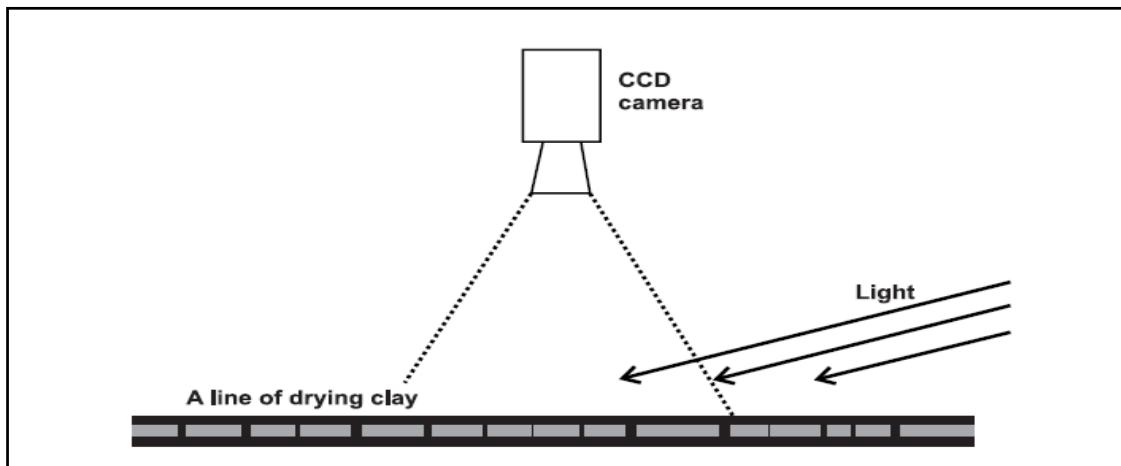


Figure 2.4 : Suivi de l'apparition et l'évolution des fissures (Lecocq et Vandewalle, 2003).

Lecocq et Vandewalle (2003), ont mis l'argile saturée, caractérisée par un fort rétrécissement lors de la dessiccation (argile de Tournai, Belgique), sur une plaque de verre horizontale avec les dimensions suivantes : " $l = 7mm$; $L = 200mm$; $H = 5mm$ ".

L'échantillon est en contact avec le verre sur sa face inférieure ; les autres faces sont en contact direct avec l'air. L'échantillon a été laissé pour sécher. Des photos ont été prises toutes les 2 minutes, et cela pendant quelques heures avec un appareil placé à 30 cm au-dessus de l'échantillon. Comme indiqué dans la figure 2.4 et pour mieux voir les fissures dans l'argile ils ont eu recours à un éclairage latéral.

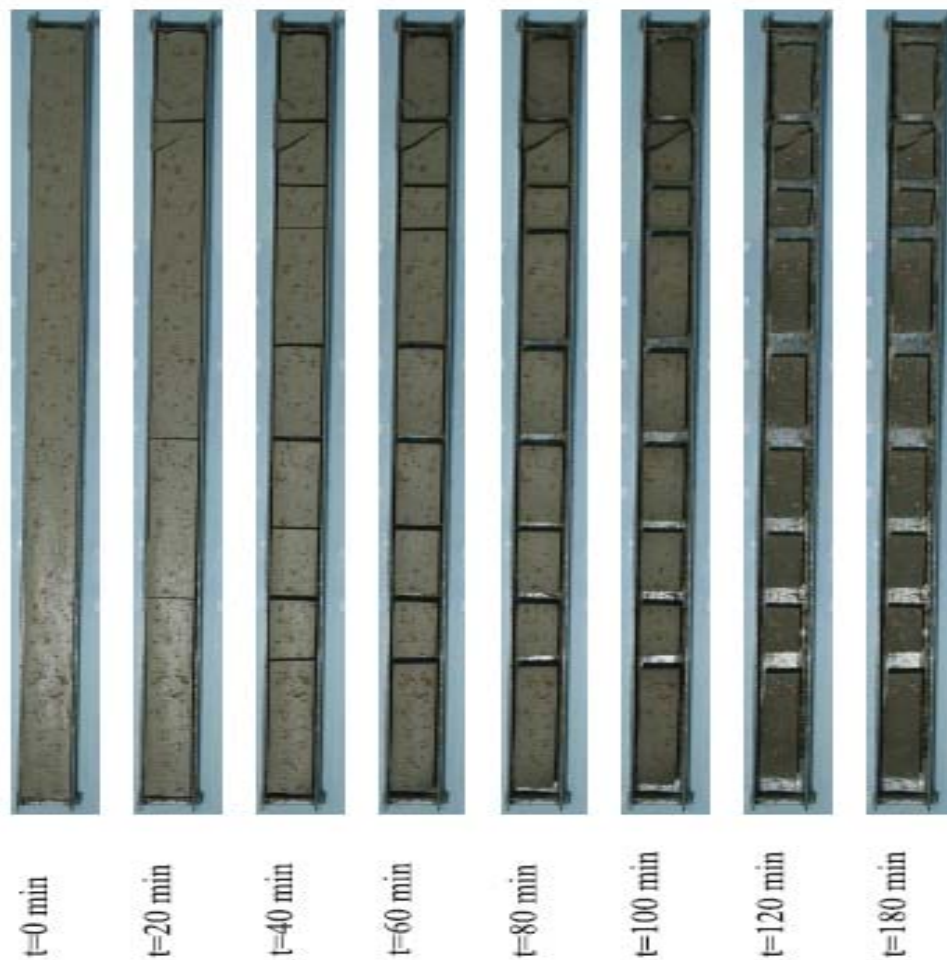


Figure 2.5 : Suivi de l'apparition et de l'évolution des fissures (Costa et Kodikara, 2008).

Un essai similaire a été réalisé par [Costa et Kodikara \(2008\)](#) et la variation du réseau des fissures avec des pas de temps constants est présentée dans la [figure 2.5](#).

[Avila et al., 2013 \(cité par Trabelsi, 2013\)](#) présentent un autre type d'essai unidimensionnel mais en utilisant un moule ayant une forme en I conçu par [Avila \(2004\)](#). Ils présentent trois échantillons soumis à des conditions de dessiccation et montrent que les fissures ont le même comportement pour les trois essais, [figure \(2.6a\)](#). Ils expliquent le comportement par la concentration des contraintes dans les zones fissurées, [figure \(2.6b\)](#). (Cité par TRABELSI.H., 2013).

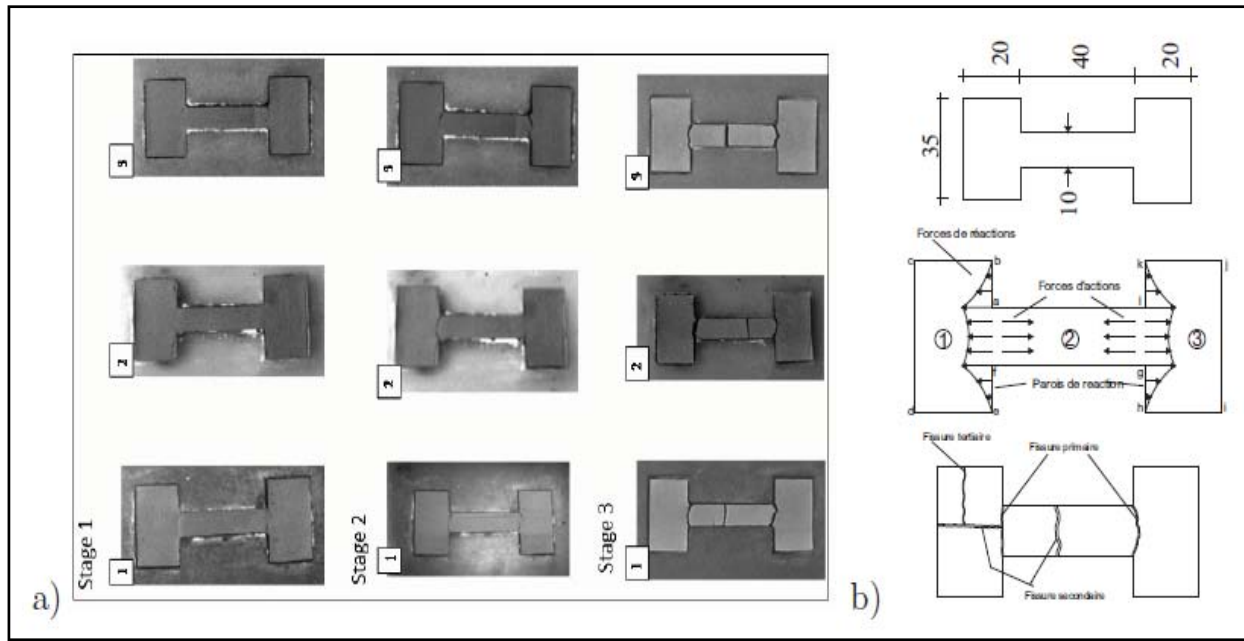


Figure 2.6 : Trois échantillons dans un cycle de dessiccation présente par [Avila et al. \(2013\)](#).

La *figure 2.7* représente la dynamique des fissures pour 700 minutes. Les fissures sont numérotées selon leur ordre d'apparition. (TRABELSI, 2013).

Les principales observations qui peuvent être faites à partir de cette figure sont :

1. Le taux d'ouverture cumulé pour toutes les fissures est presque constant ($20\mu\text{m}/\text{min}$) pendant la période de dessiccation de l'argile, puis il disparaît progressivement.
Le taux d'ouverture cumulé de toutes les fissures est équivalent au taux de retrait de l'argile dans la partie d'observation.
2. Toutes les fissures montrent approximativement le même comportement à travers la même cinétique. Les taux d'ouverture diminuent progressivement de la valeur maximale initiale (quand la première fissure apparaît) jusqu'à zéro quand l'argile commence à être sèche.
3. Une nouvelle fissure apparaît en moyenne toutes les 50mn.

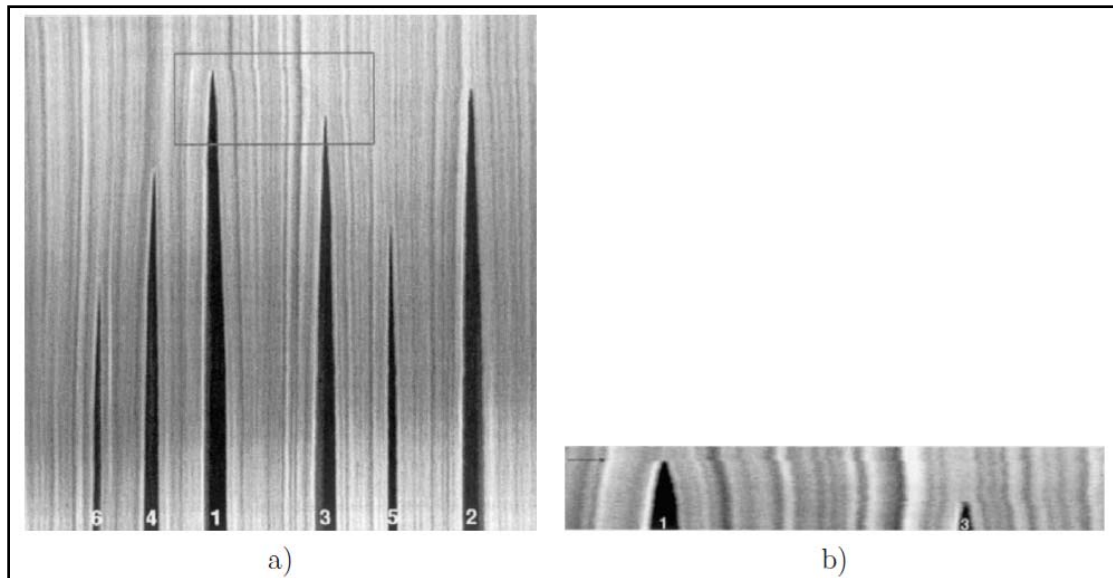


Figure 2.7 : Apparition des fissures au cours de la dessiccation (Lecocq et Vandewalle, 2003).

2.3.2 Fissures bidirectionnelles : Vogel et al. (2005a)

Nous présentons ici l'expérience de *Vogel et al. (2005a)*, (cité par TRABELSI, 2013) menée sur deux mélanges de sable et de bentonite désignés *SB1 : 1* et *SB5 : 1*.

Le sable et la bentonite ont été mélangés avec de l'eau en utilisant un mélangeur pour obtenir une pâte avec une homogénéité optimale. La teneur en eau était 70% pour *SB1 : 1* et 160% pour *SB5 : 1*. Les mélanges ont été distribués sur des plaques de verre.

La couche d'argile avait une épaisseur constante de 5mm. La surface a été uniformément éclairée avec la lumière oblique de quatre lampes d'halogène, et un appareil-photo numérique a été installé pour enregistrer la surface pendant la dessiccation à intervalles de temps fixes (20mn).

Les deux expériences ont été effectuées successivement en utilisant la même installation expérimentale et les mêmes conditions pour la dessiccation en termes de température et l'humidité relative. Les fissures obtenues après dessiccation complète sont présentées dans la *figure 2.8*. Dans cette figure, seulement la partie centrale de 20/20 centimètre est présentée. La résolution des images numériques est de 2pixels/1mm.

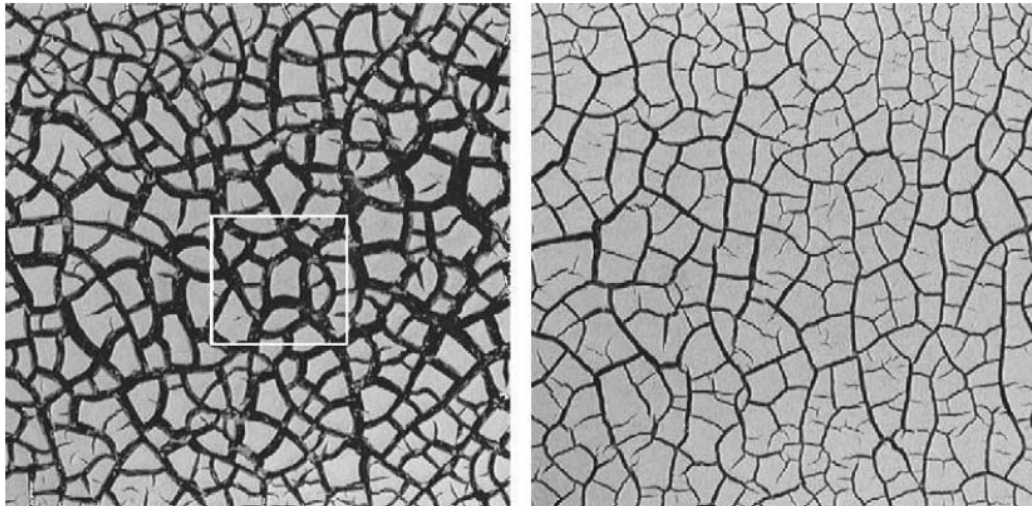


Figure 2.8 : Réseau de fissures après la dessiccation des mélanges du sable (S) et de la bentonite (B), SB1 : 1 (à gauche) et SB5 : 1 (à droite), dans une section carrée de cote 20cm. La partie cadrée de SB1 : 1 est employée dans les figures suivantes pour illustrer les différentes analyses. (D'après TRABELSI.H., 2013).

Pour la segmentation de chaque image i , [Vogel et al. \(2005a\)](#) ont employé l'image segmentée de l'étape précédente $i-1$. Une fois qu'une fissure était détectée en un point donné, ce point est attribué au réseau de fissures également dans les images suivantes.

Les fissures apparaissent dans quelques endroits, et commencent à se propager. A partir d'une certaine longueur, la fissure se propage en se partageant en deux, généralement sous un angle de 120° . En outre, si une fissure en propagation rencontre une fissure existante elle change de direction de façon à la rejoindre sous un angle de 90° (figure 2.9).

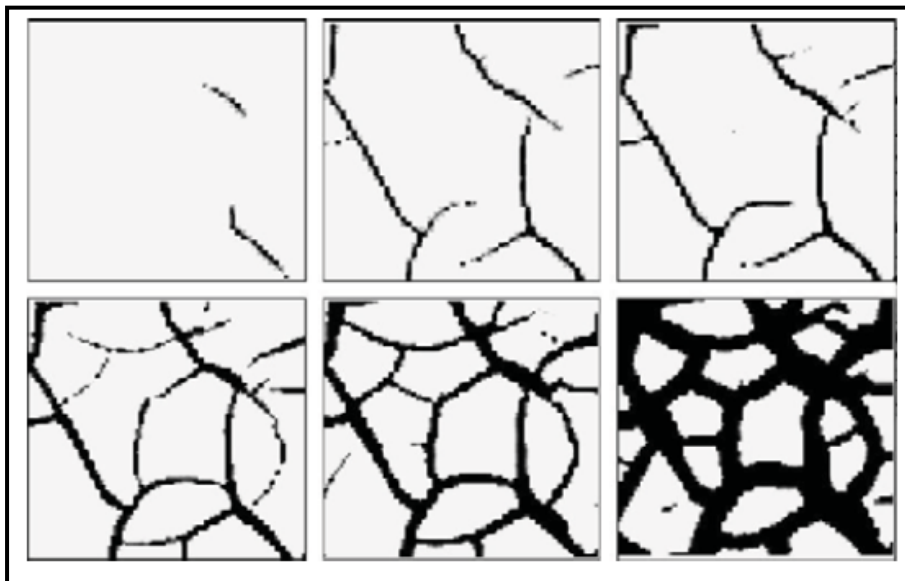


Figure 2.9 : Différentes étapes de formation des fissures pendant la dessiccation dans la section carrée de SB1 : (TRABELSI.H., 2013).

3. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a effectué une synthèse des travaux réalisés sur le phénomène de fissuration des sols argileux lié au phénomène de retrait. Cette synthèse a mis en évidence un effort très important dans la recherche expérimentale sur le lien entre le retrait et la fissuration. Les travaux numériques sur ce sujet sont plus limités.

Le chapitre comporte principalement une synthèse bibliographique sur les études antérieures de la dessiccation des sols fins reposent sur différentes expérimentations menées sur des matériaux de natures minéralogiques différentes. Les premières explorations reviennent à *Vogel et al., 2005b* ; *Sima et al., 2013*.

Vogel et al. (2005b) ont utilisé une technique d'analyse d'image pour reconstruire le réseau de fissures, suivi depuis sa naissance et pendant sa propagation (durant la dessiccation). Ils ont introduit des paramètres quantitatifs caractérisant le réseau de fissures, comme la longueur, l'intensité des fissures et les angles de bifurcation. Ces auteurs ont montré qu'un réseau comporte trois types de fissures : primaires, secondaires et tertiaires. Ces fissures apparaissent en ordre chronologique durant la dessiccation, naissent en fonction des directions de leurs précurseurs, et se distinguent par leurs caractéristiques et leur morphologie. Les expériences de ces auteurs sont limitées à des échantillons de faibles épaisseurs (donc l'effet de la troisième dimension, en l'occurrence de la profondeur n'a pas été exploré).

CHAPITRE III :
ETUDE EXPERIMENTALE DE LA FISSURATION

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA FISSURATION

1. Introduction :

Dans ce chapitre, on va essayer d'approcher le phénomène de la fissuration des argiles par des essais expérimentaux. D'après [Holtz et Kovacs \(1981\)](#) et [Mitchell \(1993\)](#), les sols à grains fins sont plus sensibles au développement de fissures que les sols à grains grossiers en raison de la présence de petits pores qui permettent le développement de fortes succions.

À ce jour, bien qu'un grand nombre de méthodes de mesure des fissures de surface du sol aient été utilisées, et que de nombreux résultats significatifs aient été obtenus dans ce domaine, le processus de fissuration n'est pas complètement compris.

Pour cela, ce chapitre tentera d'apporter une petite contribution à cette question avec l'étude expérimentale de la fissuration, de différents types d'argile de la région de Tlemcen, réalisée à partir de l'observation de surfaces d'échantillons en cours de dessiccation en utilisant la technique d'imagerie.

Afin d'atteindre cet objectif, on va étudier simultanément le retrait et le développement des fissures sur nos matériaux.

2. Limite de retrait :

Pour caractériser le retrait du sol, on utilise généralement la limite de retrait. En pratique, la limite de retrait d'un sol correspond à la teneur en eau pour laquelle le sol commence à se désaturer. Au-dessus de cette valeur, la déformation volumique est fonction linéaire de la teneur en eau ([Sitharam et al. 1995](#)). Cette limite de retrait peut être déterminée à partir de la courbe de retrait, qui lie souvent l'indice des vides à la teneur en eau volumique et caractérise les variations de volume du sol au cours de la dessiccation. En théorie, la courbe de retrait ou le processus de retrait comprend 3 phases. La première phase correspond au domaine saturé du sol où le volume d'eau évaporée est compensé par une égale diminution du volume des vides internes ([Yong et Warkentin 1975](#)). La deuxième phase commence quand une part du volume d'eau occupant les vides a été expulsée et l'air pénètre dans le réseau poreux (point d'entrée d'air ou limite de saturation). Dans cette phase, la teneur en eau diminue et cause aussi la diminution du volume du sol ou son retrait, mais avec une amplitude qui devient de plus en plus faible et n'est plus proportionnelle à la variation de teneur en eau, jusqu'à devenir quasiment nulle. La troisième phase

commence à la limite de retrait où le volume ne varie plus malgré le départ d'eau. (Cité par Thanh Danh TRAN., 2014).

3. Technique de caractérisation des fissures :

Pour les sols argileux, le développement et l'ampleur de la fissuration de dessiccation résultent de l'interaction de nombreux facteurs, dont la teneur en argile et la minéralogie (*Aitchinson et Holmes 1953 ; Yesiller et al. 2000*), l'épaisseur du sol, la configuration de surface, la vitesse de séchage, le temps de séchage total, la profondeur de la nappe phréatique, les cycles de mouillage-séchage (*Plummer et Gostin 1981 ; Tang et al. 2007, 2008*).

Dans la littérature, il y a deux techniques principales pour quantifier des fissures du sol.

1. La première technique : est de mesurer directement des fissures (*Zein El Abidine et Robinson 1971 ; Lima et Grismer 1992*). On utilise souvent des règles pour mesurer la largeur des fissures et des fils de faible épaisseur pour mesurer la profondeur des fissures. Cependant ces mesures sont peu précises.
2. La deuxième technique : technique d'imagerie développée ces dernières années, est de plus en plus utilisée pour effectuer des mesures de fissures. *Mi (1995), Miller et al. (1998) et Yesiller et al. (2000)* ont décrit une approche de mesure des fissures par cette technique en présentant le facteur d'intensité de fissure (CIF) comme une description de l'étendue en surface de la fissuration. Cet indice CIF qui est défini comme le rapport de l'aire des fissures à la surface totale d'une masse de sol séché est actuellement beaucoup utilisé pour décrire les fissures à la surface du sol.

4. Matériaux étudiés :

1. Situation :

La présente étude analyse trois matériaux situés dans la wilaya de Tlemcen, les matériaux sont choisis en prenant la limite de liquidité comme critère de choix :

Premièrement, le matériau de Boughrara utilisé dans la construction du noyau du barrage Boughrara, on va nommer ce matériau tout le long de cette étude par « Bougrara-barrage ».

Ce barrage est le plus important de la wilaya de Tlemcen, il est situé sur le point de confluence entre l'oued Tafna et l'oued Mouillah à environ un kilomètre, en amont de la localité de hammam Boughrara et à 10 Km, de la daïra de Maghnia distante de 40 km du chef lieu de la wilaya de Tlemcen, (*Figure 3.1*). (Cité par A. BENDIOUIS, 2014).



Figure 3.1 : Extrait de la zone de prélèvement de l'argile du noyau du barrage Boughrara à partir de Google Earth.

Le deuxième matériau utilisé dans cette recherche a été prélevé du site de la nouvelle pénétrante de la commune de Hammam Boughrara, à 38 Km de la ville de Tlemcen, Point A1 sur la *figure 3.2* (KAZI AOUAL R. et KENADIL A., 2016). Ce matériau sera dénommé tout au long de cette étude « Boughrara- route ».



Figure 3.2 : Extrait de la zone de prélèvement de l'argile de la route de Maghnia à partir de Google Earth. (D'après KAZI AOUAL R. et KENADIL A., 2016).

Troisièmement, le matériau de Bâb El-Assa. Il est situé sur la RN 7 qui raccorde la ville de Maghnia à la station balnéaire de Marsa Ben M'hidi (wilaya de Tlemcen), sur une distance de 60 km. (*Figure 3.3*).

On notera que ce matériau a fait l'objet d'une identification détaillée dans le paragraphe suivant.



Figure 3.3 : Extrait de la zone de prélèvement de l'argile du Bâb El-Assa à partir de Google Earth.

5. Caractérisation géotechnique du sol de Bâb El-Assa :

5.1 Essais d'identification :

Des essais de caractérisation géotechnique ont été effectués suivant les normes **AFNOR** sur notre échantillon prélevé (argile de Bâb El Assa), les caractéristiques des deux autres sols étudiées sont pris de la littérature.

5.1.1 L'analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie :

L'essai a pour but de déterminer en poids, la distribution des particules des sols suivant leurs dimensions.

L'analyse granulométrique par tamisage du matériau étudié (argile de Bâb El Assa) est effectuée par le tamisage sous l'eau (voie humide), selon la norme **AFNOR (XP P 94-041)**.

La série de tamis utilisée est représentée sur la *figure 3.4*.

L'analyse granulométrique par sédimentation a été réalisée pour déterminer la distribution pondérale de la taille des particules fines d'un sol ($\emptyset < 80 \mu\text{m}$). Elle est effectuée selon la norme **AFNOR (NF P94-057)**, voir *figure 3.5*.



Figure 3.4 : Colonne des tamis.



Figure 3.5 : Essai de sédimentométrie.

Les résultats des analyses granulométriques des trois matériaux utilisés dans cette étude sont synthétisés dans la *figure 3.6* ci-après :

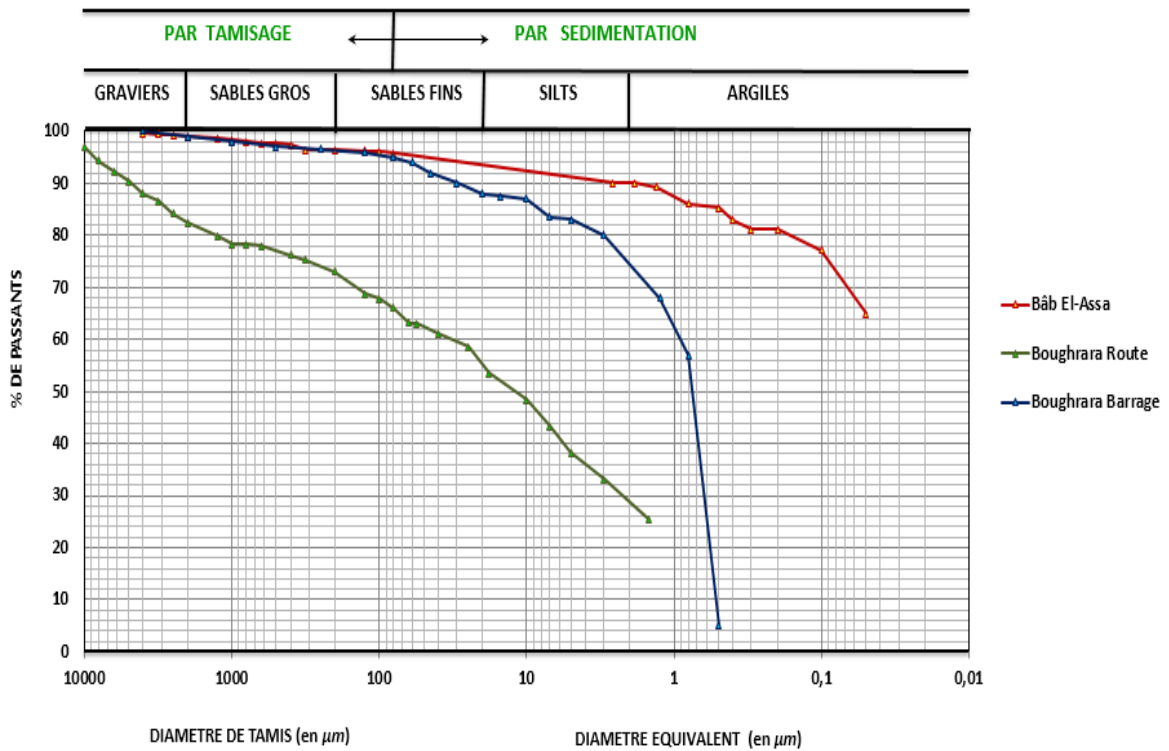


Figure 3.6 : Les Courbes granulométriques.

5.1.2 Limites d'Atterberg :

C'est l'un des essais d'identification les plus importants pour les sols fins. Les limites d'Atterberg sont réalisées selon la norme AFNOR (NF P 94-051), figures 3.7 et 3.8.



Figure 3.7 : Appareillage de Casagrande.



Figure 3.8 : Exécution de l'essai de la limite de liquidité.

Les résultats sont reportés sur la figure 3.9. On déduit que la limite de liquidité de ce matériau est de 117 %.

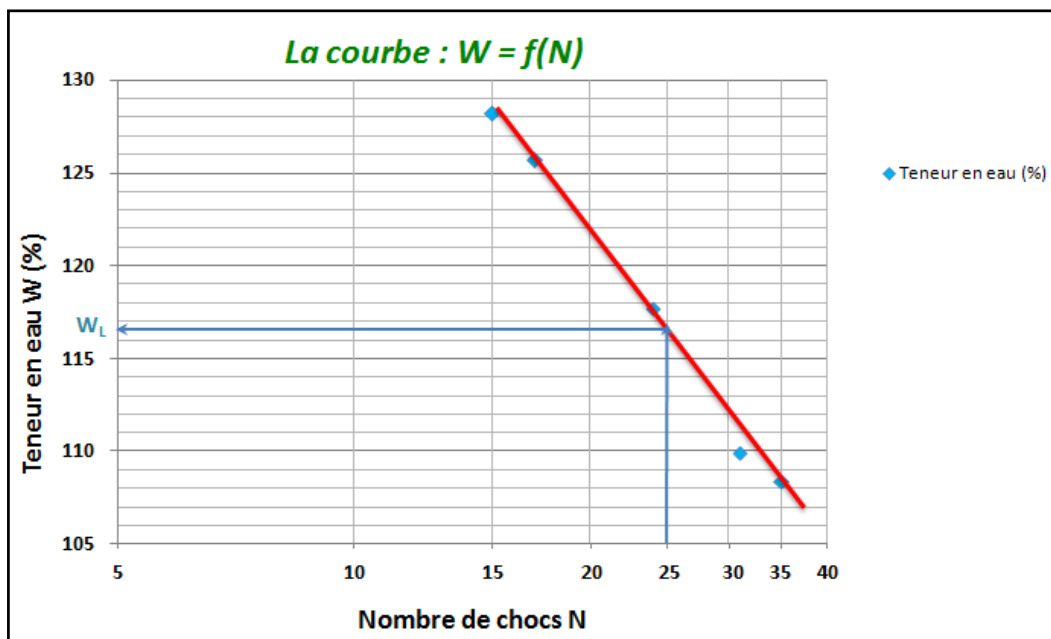


Figure 3.9 : Résultat de l'essai de limite de liquidité.

Dans notre travail, on a exprimé la valeur de I_p par corrélation $I_p = 0.73 (w_L - 13)$:

$W_L = 117$ (%)

Donc : $I_p = 76$ (%)

Et $W_p = 41$ (%)

Sur l'abaque de plasticité de Casagrande (figure 3.10), le sol de Bâb El Assa est une argile très plastique At.

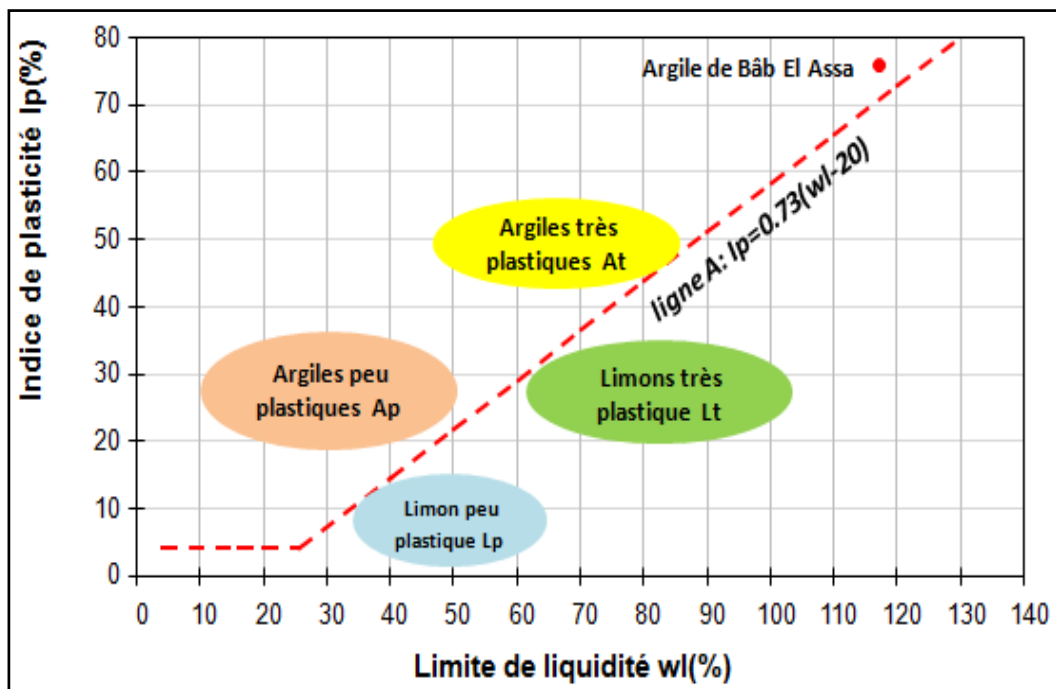


Figure 3.10 : Abaque de plasticité de Casagrande
Classification L.P.C. des sols fins.

5.1.3 Essai au bleu de méthylène :

Il s'agit d'un essai permettant de caractériser l'argilosité d'un sol. L'essai est effectué selon la norme [AFNOR \(NF P 94-068\)](#) (figures 3.11 et 3.12).

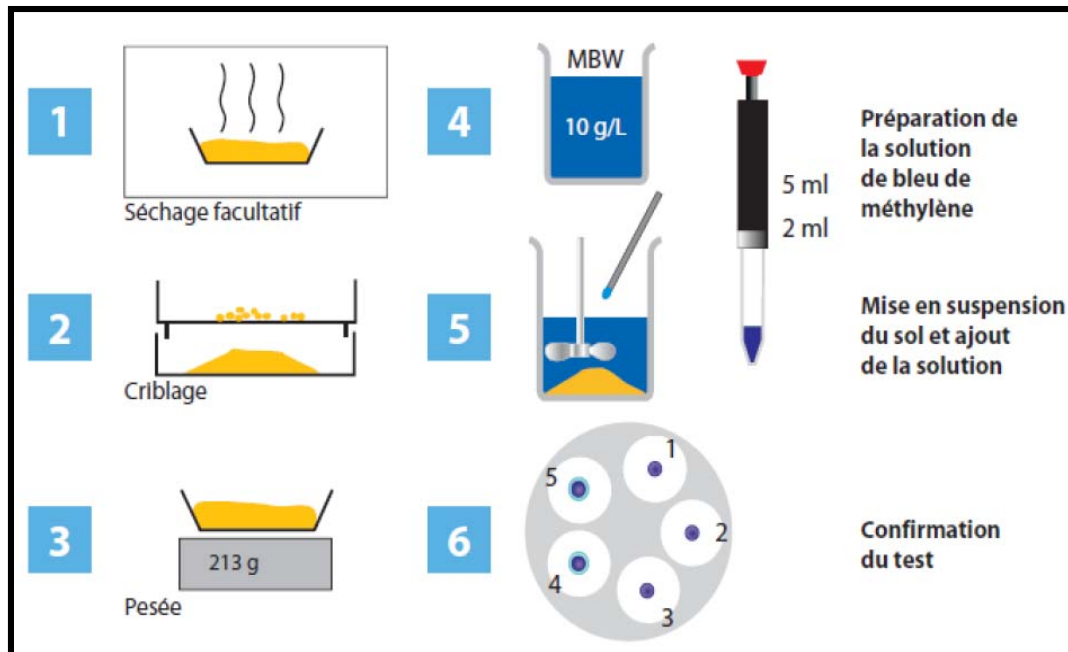


Figure 3.11 : Aperçu schématique de l’essai de détermination de la valeur de bleu de méthylène (D’après BOUKLIKHA. R et MECHERNENE.M., 2015).



Figure 3.12 : Réalisation de l’essai au Bleu de Méthylène.

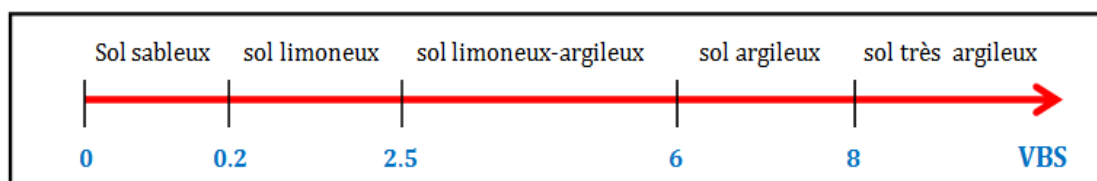


Figure 3.13 : Ordres de grandeur (Type de sol en fonction de la valeur «VBS ») (Léreau. J., 2005 : INSA-Institut National Des Sciences Appliqués De Toulouse).

La valeur au bleu de méthylène VBS constitue un paramètre d'identification permettant de mesurer la surface spécifique des particules solides contenues dans les sols fins et de déterminer l'activité de leur fraction argileuse (NF P 94-068).

D'après nos calculs on obtient :

$$\text{VBS} = 21,5 \Rightarrow \text{VBS} > 8$$

Donc : le sol étudié est un sol très argileux.

5.1.4 Essai de Pycnomètre :

Cet essai a pour objectif la détermination de la densité des grains solides, il est effectué généralement au pycnomètre (Figure 3.14). La densité des particules solides est déterminée à partir de la norme NF P 94-054.

Après plusieurs essais, on a trouvé que la densité des grains solides G_s de l'argile de Bâb El-Assa : $G_s = 2,63$



Figure 3.14 : Essai de Pycnomètre.

✓ Résultats et analyse :

L'ensemble des résultats de l'identification du matériau de Bâb El-Assa sont résumés dans le *tableau 3.1*. Les résultats issus de la littérature des deux autres matériaux (Bouhrara-barrage et Bouhrara-route) sont aussi répertoriés sur le même tableau.

Tableau 3.1 : Résultats d'identification des trois matériaux (Identification de sol Boughrara Barrage est d'après BENDI-OUIS A., (2014) et Boughrara Route est d'après KAZI AOUAL R. et KENADIL A., 2016).

<i>Matériaux</i>	<i>Bâb El Assa</i>	<i>Boughrara Barrage</i>	<i>Boughrara Route</i>	<i>Normes</i>
Identification physique				
▪ Granulométrie				NF P 94-041
Gravier (%)	2	3	18	
Sable (%)	4	10	30	
Limon (%)	4	35	24	
Argile (<math>%<2\mu\text{m}</math>)	90	52	28	NF P 94-057
	98	97	66	
d ₁₀ (μm)	-	-	-	
d ₆₀ (μm)	-	3	30	
C _u =d ₆₀ /d ₁₀	-	-	-	
▪ Limites d'Atterberg				NF P 94-051
Liquidité w _L (%)	117	54	43	
Plasticité w _P (%)	41	26	23,45	
Indice de plasticité I _P (%)	76	28	19	
▪ Densité des grains solides	2,63	2,65	2,63	NF P 94-054
Identification chimique				
▪ Valeur de bleu V _B	21,5	6,91	3,16	NF P 94-068
▪ Surface spécifique totale (m ² /g)		145	-	
▪ Teneur en CaCO ₃ (%)	-	20	13,61	
▪ Teneur en matière (%) organique	-	5-6,5	-	
▪ Activité des argiles	-	0,54	-	
Identification mécanique				
Proctor normal				NF P 94-093
γ _{dmax} /γ _w	-	1,62	1,69	
w _{opt} (%)	-	21	19,84	

En analysant les résultats en termes de granulométrie, limite de liquidité, valeur de Bleu, pour notre argile de Bâb El-Assa et selon la classification USCS/LCPC, nous avons classé notre sol comme une argile à plasticité très élevée (At). En utilisant l'abaque de plasticité de CASAGRANDE nous avons remarqué que l'argile de Bâb El Assa se classe parmi les argiles fortement plastiques.

6. Réalisation des essais :

6.1 Dessiccation des matériaux étudiés :

Les trois matériaux étudiés en l'occurrence : Boughrara Route ($w_L = 43\%$), Boughrara Barrage ($w_L = 54\%$) et Bâb El-Assa ($w_L = 117\%$) sont préparés initialement sous forme de pâte. Cette préparation consiste à préparer à partir d'un sol sec un matériau sous forme de boue. Cette boue est obtenue en mélangeant le sol avec une teneur en eau correspondant à $W = 1,5 W_L$. La boue obtenue est étalée sur une surface circulaire en plastique de diamètre $d = 100$ mm d'une épaisseur $e = 10$ mm.

Après préparation des matériaux, on a procédé à deux séries d'essais :

- ✓ **Série 1 :** les échantillons sont soumis au séchage à l'air libre au laboratoire jusqu'à équilibrage de la teneur en eau. Les échantillons sont exposés à la température ambiante du laboratoire qui est autour de $T = 22 \pm 1^\circ\text{C}$. On met l'échantillon sur une balance de précision de 10^{-2} g. Afin de déterminer la quantité d'eau évaporée de l'échantillon, une lecture du poids est déterminée.
- ✓ **Série 2 :** les échantillons sont déposés dans une étuve réglée à une température constante de 30°C . Ce qui correspond à des températures estivales enregistrées dans la wilaya de Tlemcen. La variation du poids des échantillons est notée de la même manière que précédemment.

En même temps, une série de photos sont prises à la surface supérieure de nos échantillons. Le retrait latéral ou surfacique et l'évolution au cours du temps de la fissuration des sols sont suivis et décrits à l'aide des photos de la surface de l'échantillon par un appareil photo numérique.

Pour cela, ces photos sont traitées de la façon suivante : d'abord, une délimitation de la surface de traitement pour l'ensemble des photos à traiter est réalisée, ce qui permet d'avoir toujours la même surface initiale ; ensuite, la binarisation de la photo est réalisée pour transformer des photos couleur en noir et blanc ; enfin, le réseau de fissures est décrit par le pourcentage de surface occupé par les fissures (pixels) par unité de surface. En plus, la teneur en eau des sols est suivie par pesée des échantillons tout au long du séchage.

6.2 Dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental représenté sur la Figure 3.15 est constitué d'un appareil photo numérique de 12 Mégapixels de résolution qui permet de réaliser des successions de photos lors du processus de fissuration et d'une balance pour la mesure de la teneur en eau globale sur laquelle est posé l'échantillon. La distance entre l'appareil photo et l'échantillon est fixée à 30 cm.



Figure 3.15 : Le dispositif expérimental de l'essai.

7. Description du logiciel ImageJ :

C'est la première fois qu'on utilise un logiciel de traitement d'image pour observer l'évolution de fissures des argiles dans notre département, c'est pour cela qu'on va présenter cet outil d'une façon un peu détaillée.

ImageJ est un fascinant logiciel de traitement et d'analyses d'image scientifique, autant par ses fonctions intrinsèques que par le riche ensemble de fonctions délivrées sous forme de plugins. C'est un logiciel libre de traitement d'images écrit en Java par le National Institute of Health (NIH) et qui fonctionne selon deux modes :

- En tant qu'applet dans un navigateur web ;
- En tant qu'application sur n'importe quelle plate-forme supportant Java.

ImageJ est un des meilleurs logiciels Open Source pour le traitement et l'analyse d'images. Il peut :

- ✓ Afficher, éditer, traiter et analyser la plupart des formats de fichier existants.
- ✓ Proposer un grand nombre d'algorithmes pour l'analyse de l'image.

A ce jour, ImageJ est un des logiciels les plus utilisés pour le traitement d'images acquise par microscopie. Le programme s'exécute soit sur une machine virtuelle Java ou sur un JRE (Java Runtime Environment).

De nombreuses opérations de traitement d'images sont réalisables avec ImageJ, parmi lesquelles :

1. Visualisation, analyse, et traitement d'images 8/16/32 bits.
2. Formats d'image utilisables : TIFF, GIF, JPEG, BMP, DICOM, ...
3. Calculs d'aires, affichage de l'échelle, mesures de distances et d'angles,
4. Modification de contraste, smoothing, détection des contours, filtre médian,

5. Ajustement de l'histogramme des niveaux de gris, débruitage, correction d'éclairage,
6. Opérations logiques et arithmétiques entre images, traitements morphologies : érosion/dilatation, ligne de partage des eaux, squelettisation.

L'utilisateur peut reproduire des séquences de commandes en enregistrant une macro-commande.

8. Résultats des essais expérimentaux :

Plusieurs essais ont été réalisés, plusieurs parmi eux n'ont pas abouti. On citera ci-après un essai qui n'a pas donné les résultats souhaités et un deuxième qui a donné des résultats plutôt encourageant par rapport à une thématique qui n'a pas encore été abordé dans notre département.

8.1 Essai (1) :

Les échantillons de deux matériaux Boughrara-barrage et Bâb El-Assa ont été préparé suivant le protocole expérimental décrit plus haut. Les échantillons sont de diamètre 98mm et d'épaisseur 10mm, ils sont soumis à des conditions de dessiccation à la température ambiante (l'air libre) du début jusqu'à la fin de l'expérience (autour de $T = 18^{\circ}\text{C}$) et un fort taux d'humidité.

D'autre part, une série de photos sont prises à la surface supérieure des échantillons. Les photos ci-dessous (*Figure 3.16a, 3.16b, 3.17a et 3.17b*) présentent les deux échantillons à l'état initial et à l'état final.

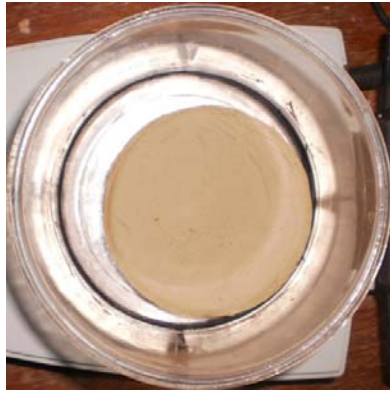


a) Sol de Boughrara Barrage

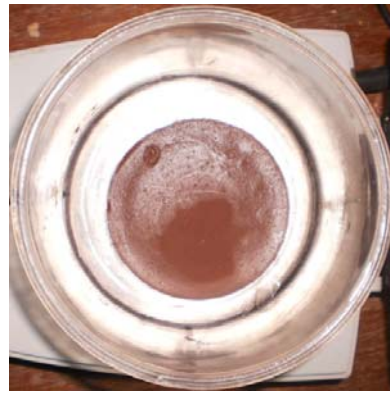


b) Sol de Bab El-Assa.

Figure 3.16 : Les deux échantillons à l'états initiaux.



a) Sol de Boughrara Barrage.



b) Sol de Bab El-Assa.

Figure 3.17 : Les deux échantillons à l'états finales.

L'évolution du retrait de ces matériaux sont montrés sur les *figures 3.18* et *3.19* suivantes :

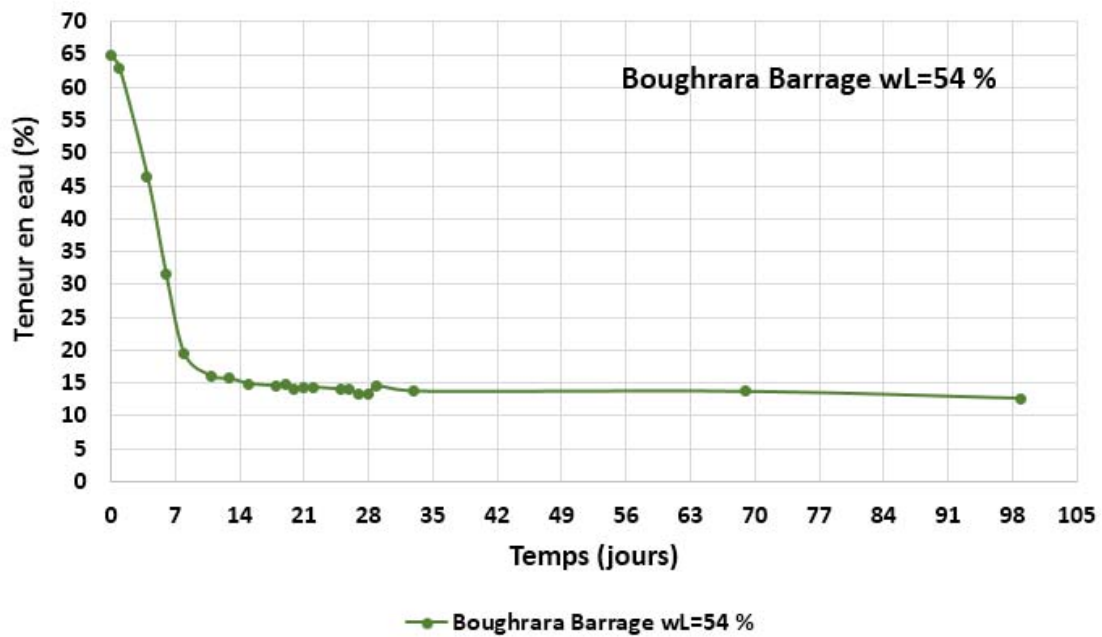


Figure 3.18 : La variation de la teneur en eau en fonction de temps de sol de Boughrara Barrage.

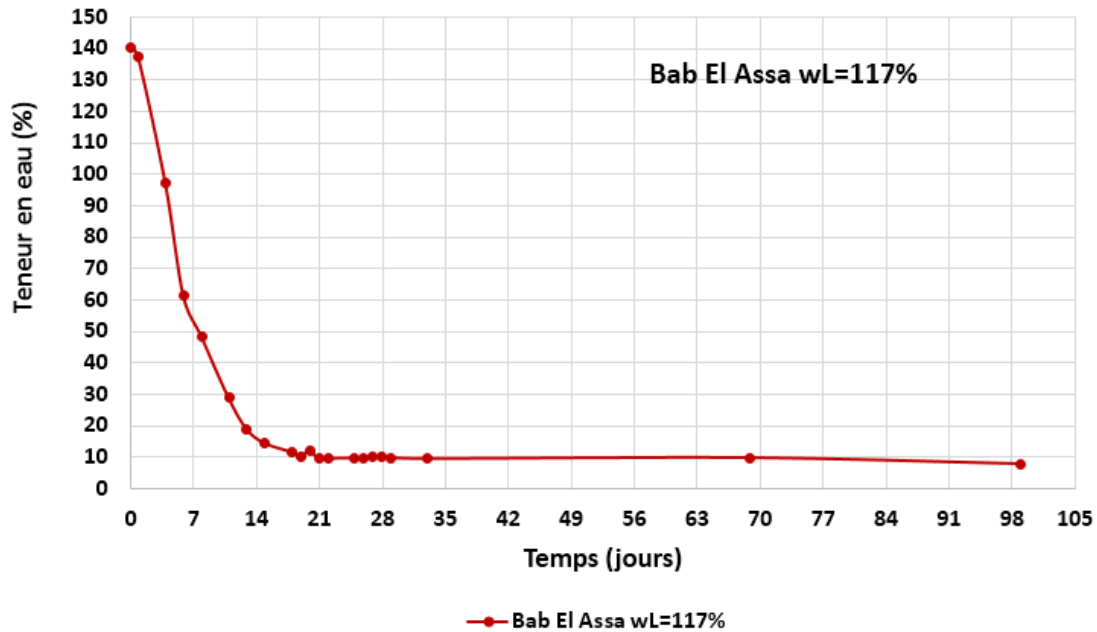


Figure 3.19 : La variation de la teneur en eau en fonction de temps de sol de Bâb El-Assa.

Après plus de 3 mois d'essai, les résultats montrent qu'il y a eu diminution du volume sans apparition de fissures. Le matériau le plus plastique a vu son volume diminuer d'une façon importante par rapport à celui de Boughrara-barrage.

La non apparition de fissures est peut-être due à la fine couche de vaseline déposée au fond du moule qui a éliminé les forces de frottement donc ça n'a pas favorisé l'apparition des fissures.

Une deuxième cause est le fait que le laboratoire est très humide, donc ça n'a pas favorisé un séchage rapide, d'où il y a eu juste une diminution de volume sans fissuration des échantillons.

8.2 Essai (2):

Une seconde série d'essais a été faite dans l'objectif de suivre l'amorçage de réseau des fissures ceci pour les 3 matériaux étudiés.

Tous les échantillons sont d'épaisseur identique $e = 0,5$ cm. Signalons aussi que les essais sont réalisés dans un autre laboratoire (ensoleillé) à une température $T = 30^{\circ}\text{C}$ à l'étuve et de $T = 22^{\circ}\text{C}$ à la température ambiante (air libre).

L'expérience est arrêtée lorsque la masse de l'échantillon se stabilise, c'est-à-dire quand le processus de perte en eau est pratiquement terminé. Cela se déduit lorsque la masse totale M_T mesurée aux intervalles de temps fixés ne change plus

pour au moins deux jours. L'échantillon est ensuite mis au four à une température de 105°C pour 24 heures afin d'obtenir sa masse sèche M_s .

A. Etude de réseaux de fissures :

Les essais de dessiccation à l'air libre ($T= 22^\circ\text{C}$) et à l'étuve $T=30^\circ\text{C}$) sur le sol de Boughrara Route, le sol de Boughrara Barrage et le sol de Bâb El-Assa (*figure 3.20, 3.21, 3.22, 3.26, 3.27, 3.28*) ont été suivis jusqu'à la stabilité de la teneur en eau. Il a été observé l'apparition de fissures dont la répartition est plus ou moins aléatoire.

Les *figures 3.23, 3.24, 3.25, 3.29, 3.30, 3.31* montrent la propagation de réseau fissuré pour chaque matériau en utilisant le principe d'imagerie en utilisant le logiciel Image J.

Un descriptif des principales étapes utilisées dans Image J pour aboutir à ces figures est décrit en *annexe de ce mémoire*.

Aussi on a quantifié la variation de longueur L , la largeur l et le nombre des fissures qui se sont développés en fonction de temps et seront représentées sur les *figures 3.32, 3.33, 3.34, 3.35, 3.36, 3.37, 3.38* ci-après :

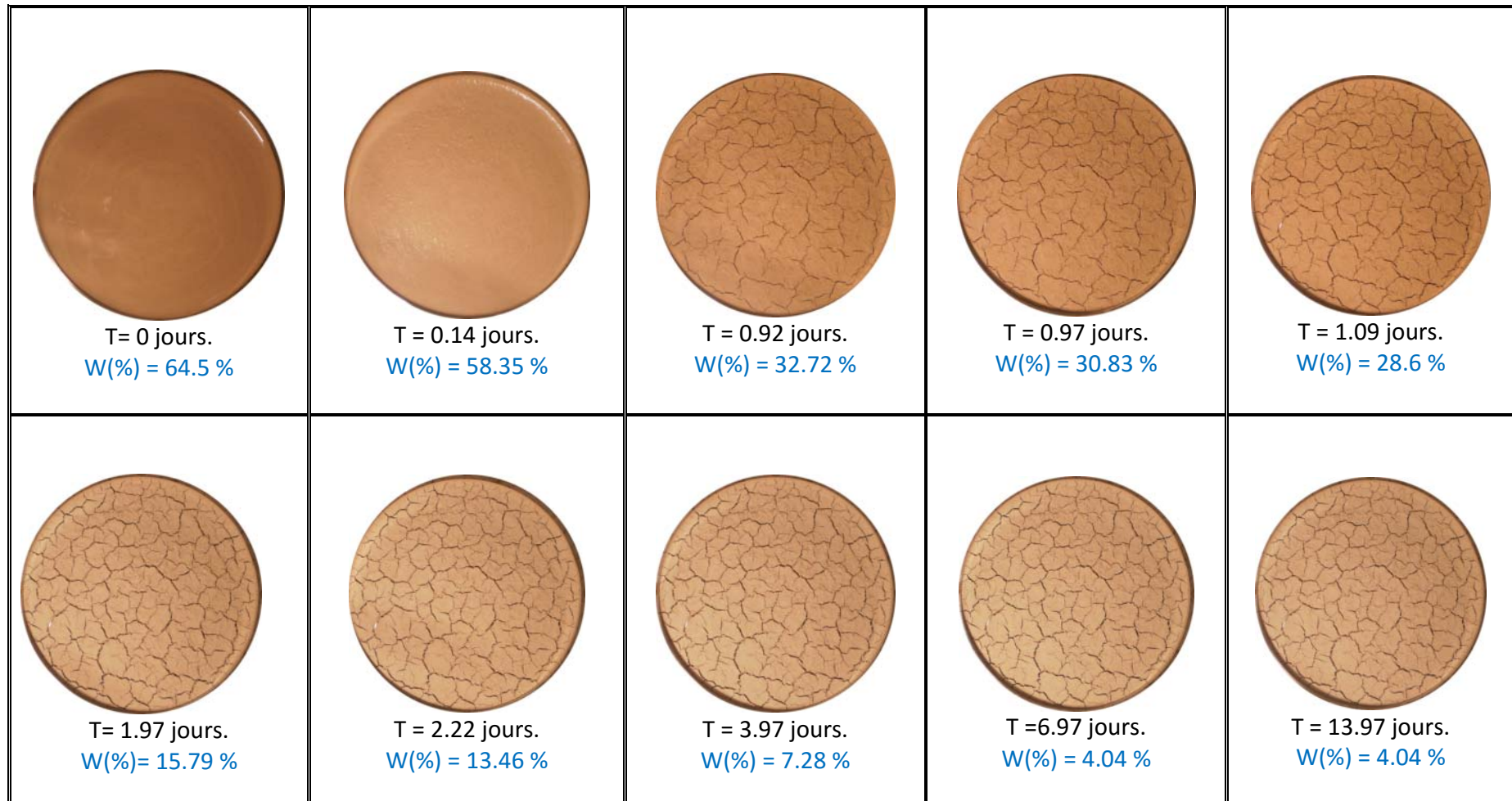


Figure 3.20 : Initiation et propagation des fissures au cours du temps à l'étuve ($T = 30^{\circ}\text{C}$) pour le sol de Boughrara Route

($W_L = 43\%$, $W_p = 23,45\%$).

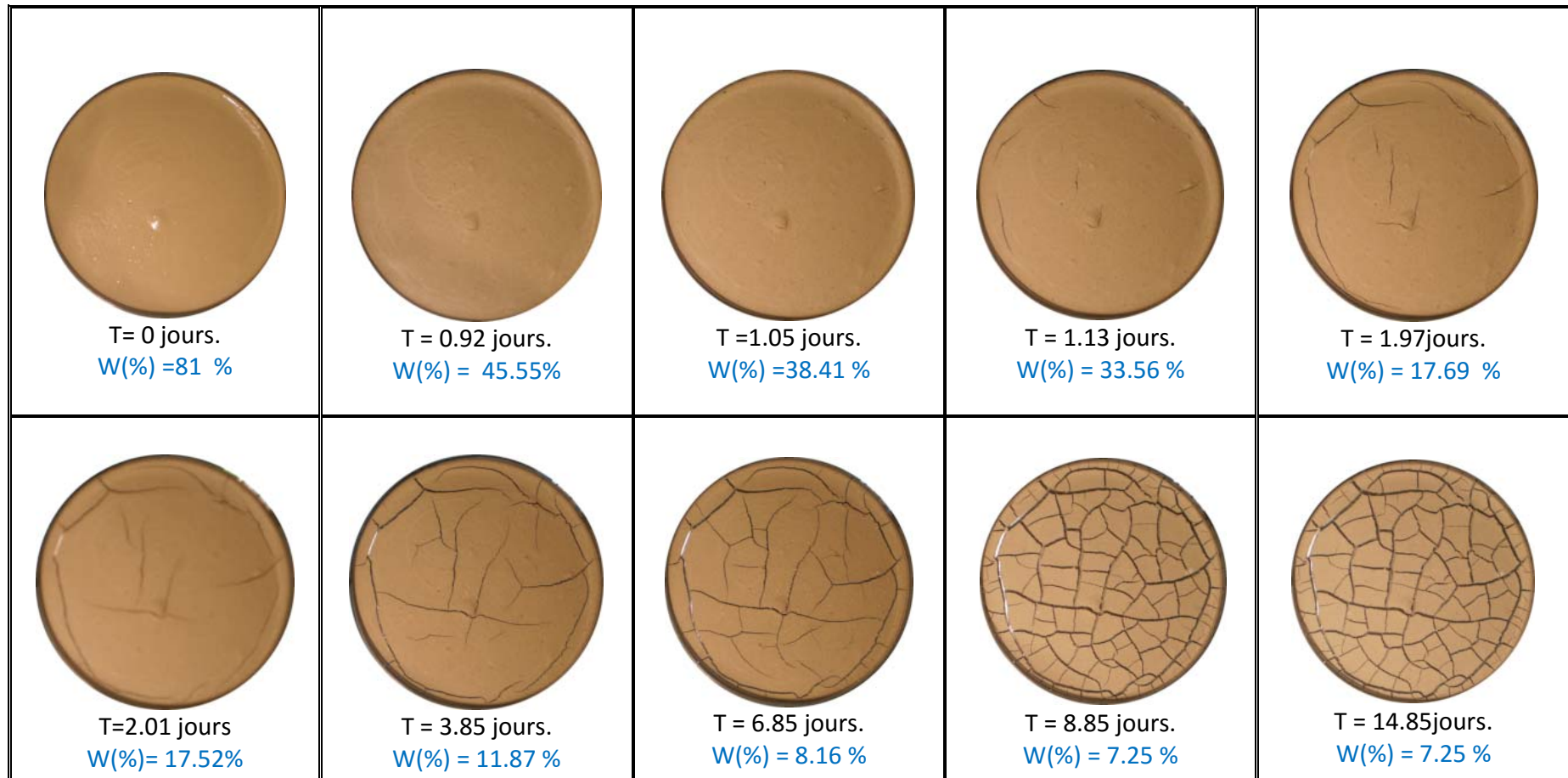


Figure 3.21 : Initiation et propagation des fissures au cours du temps à l'étuve (T= 30°C) pour le sol de Boughrara Barrage
($W_L=54\%$, $W_p=26\%$).

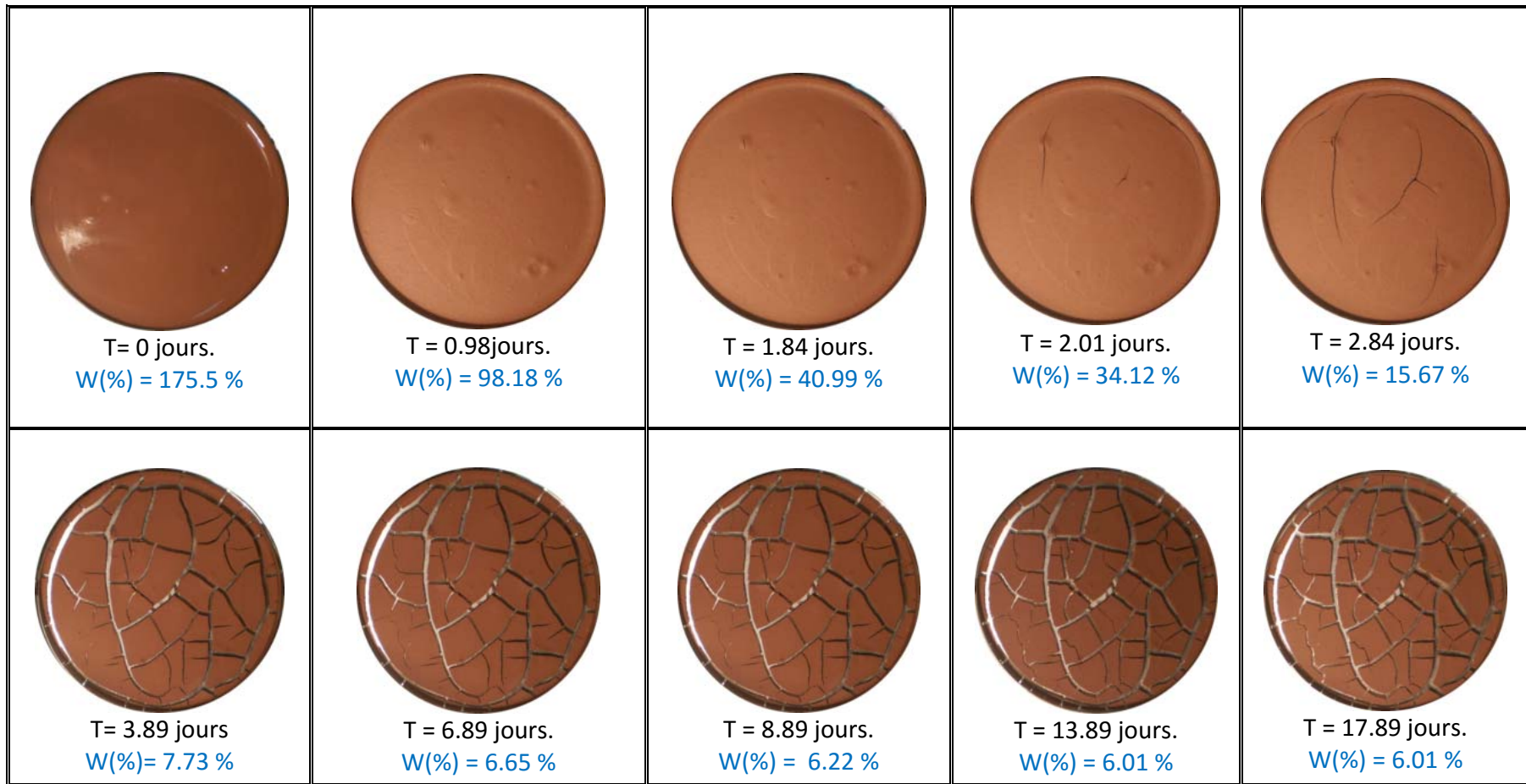


Figure 3.22 : Initiation et propagation des fissures au cours du temps à l'étuve ($T= 30^{\circ}\text{C}$) pour le sol de Bâb El-Assa ($W_L=117\%$, $W_p=41\%$).

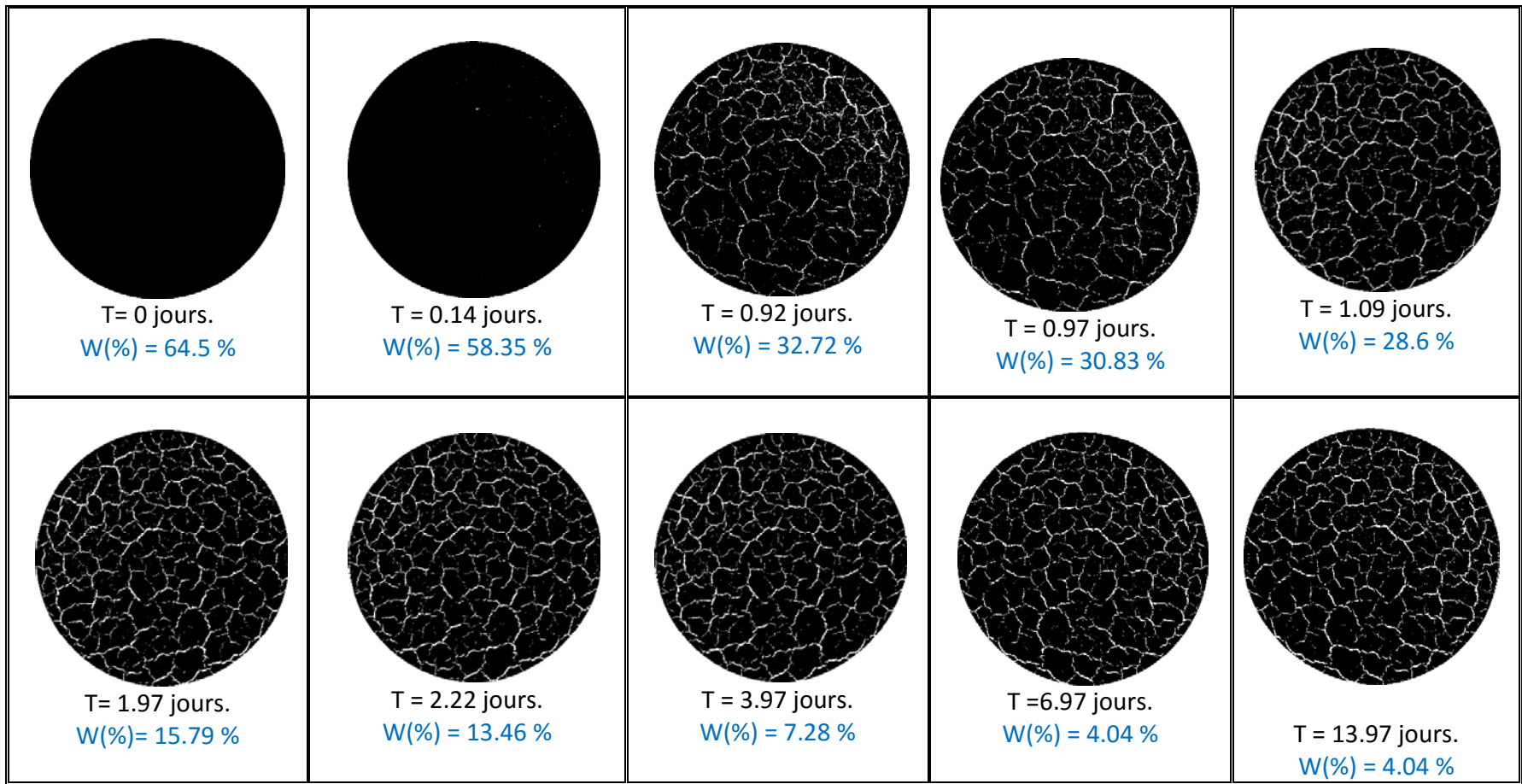


Figure 3.23: La propagation des fissures à l'étuve (T=30°C) par traitement d'image pour le sol de Boughrara Route (W_L=43%, W_p=23,45%).

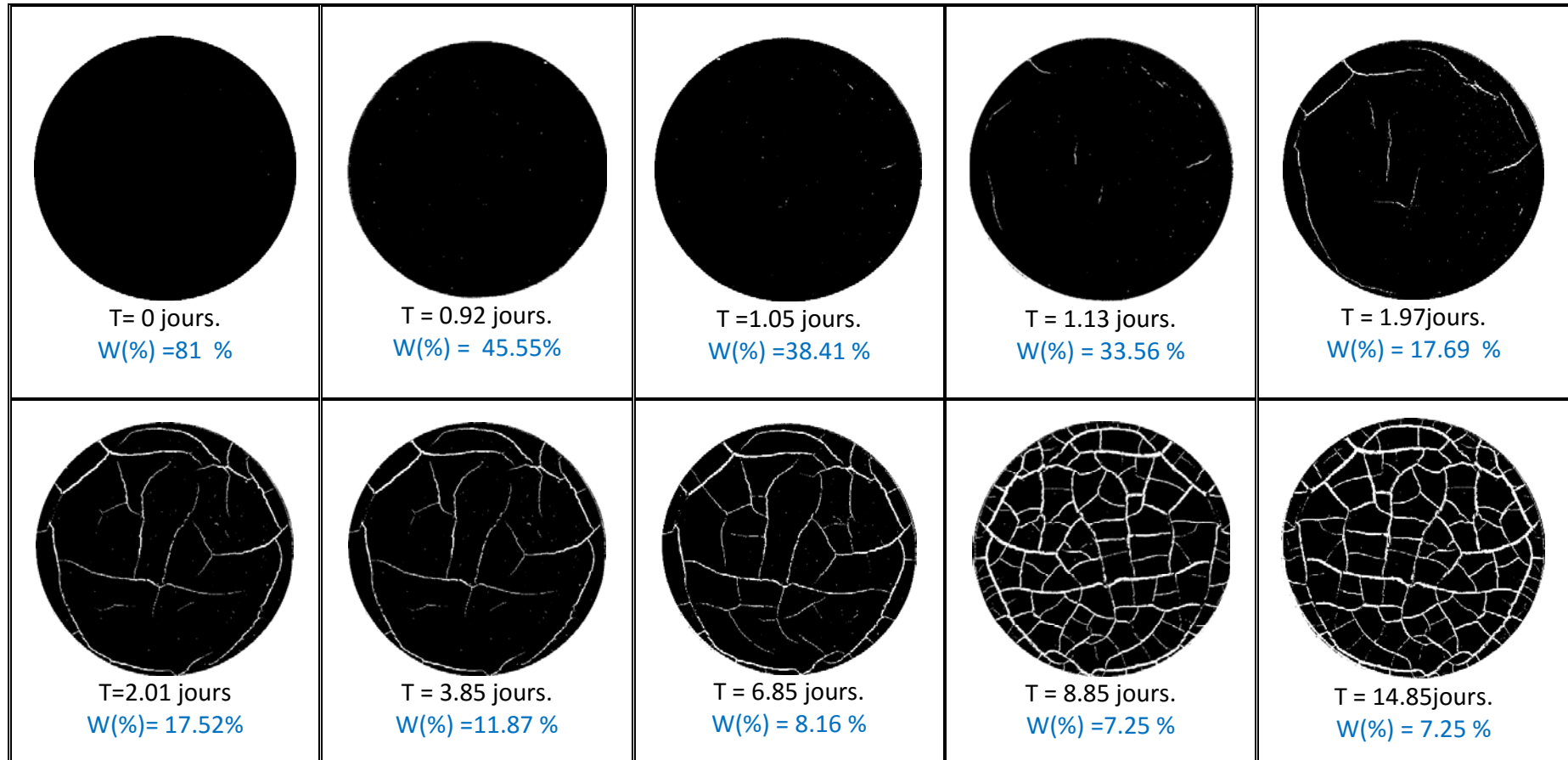


Figure 3.24: La propagation des fissures à l'étuve (T=30°C) par traitement d'image pour le sol de Boughrara Barrage (W_L=54%, W_p=26%).

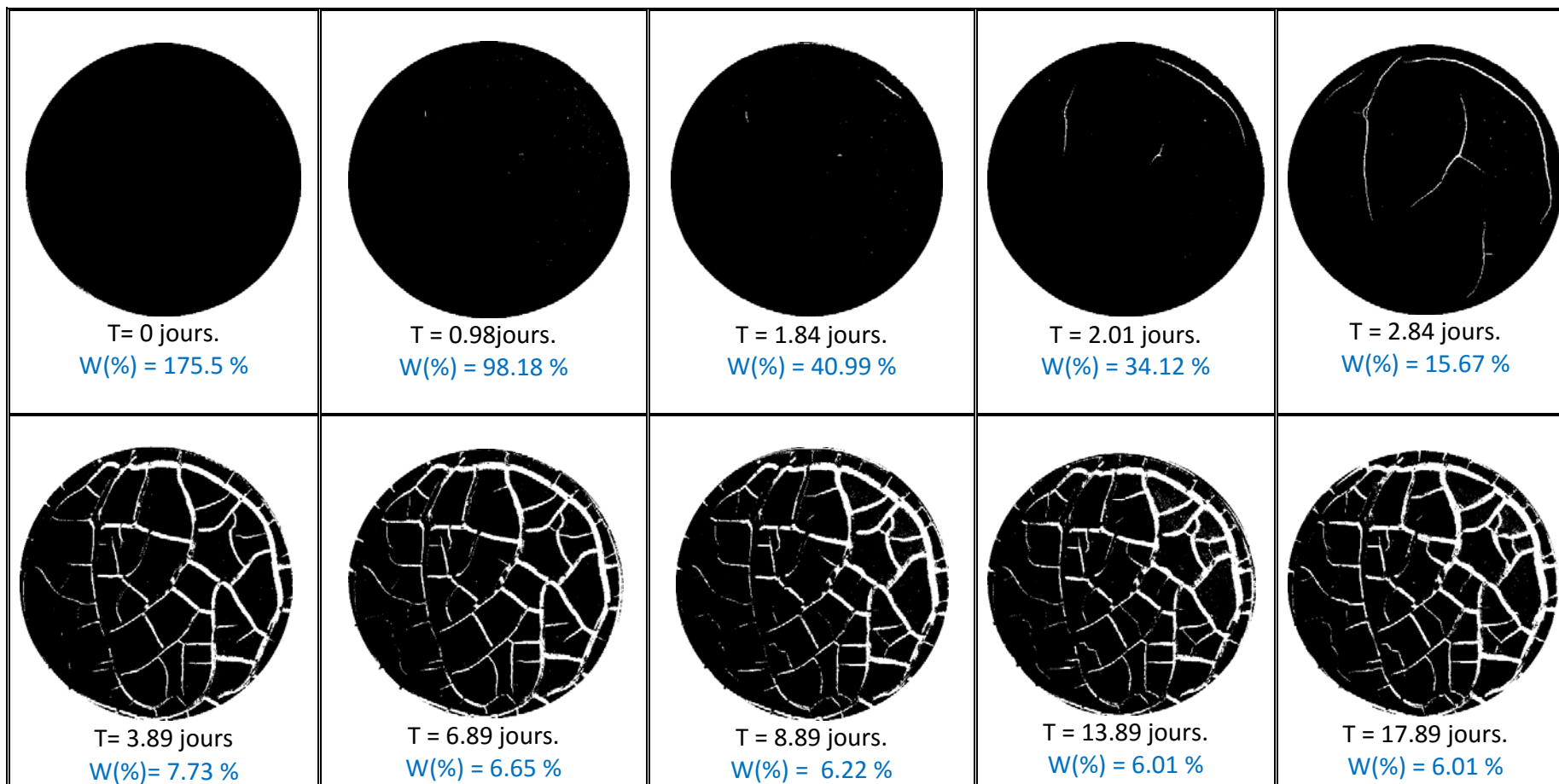


Figure 3.25: La propagation des fissures à l'étuve (T=30°C) par traitement d'image pour le sol de Bâb El-Assa
($W_L=117\%$, $W_p=41\%$).

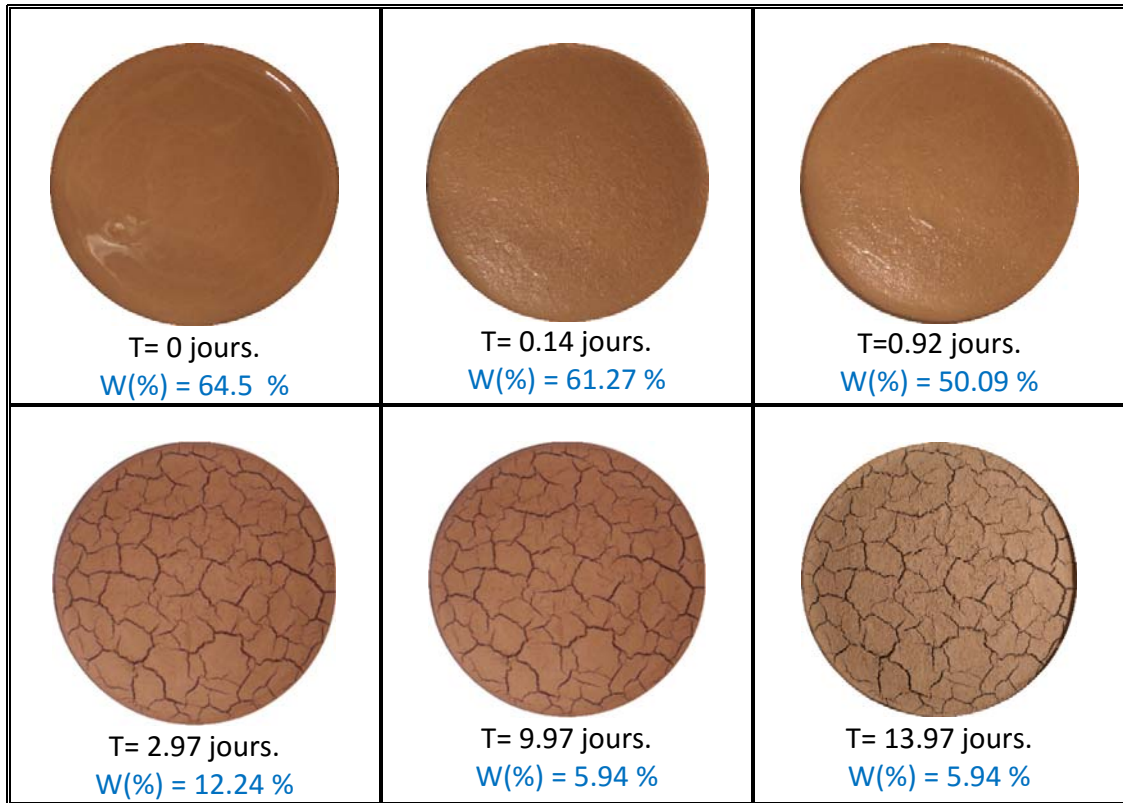


Figure 3.26 : Initiation et propagation des fissures au cours du temps à l'air libre ($T= 22^{\circ}\text{C}$) pour le sol de Boughrara Route ($W_L=43\%$, $W_p=23,45\%$).

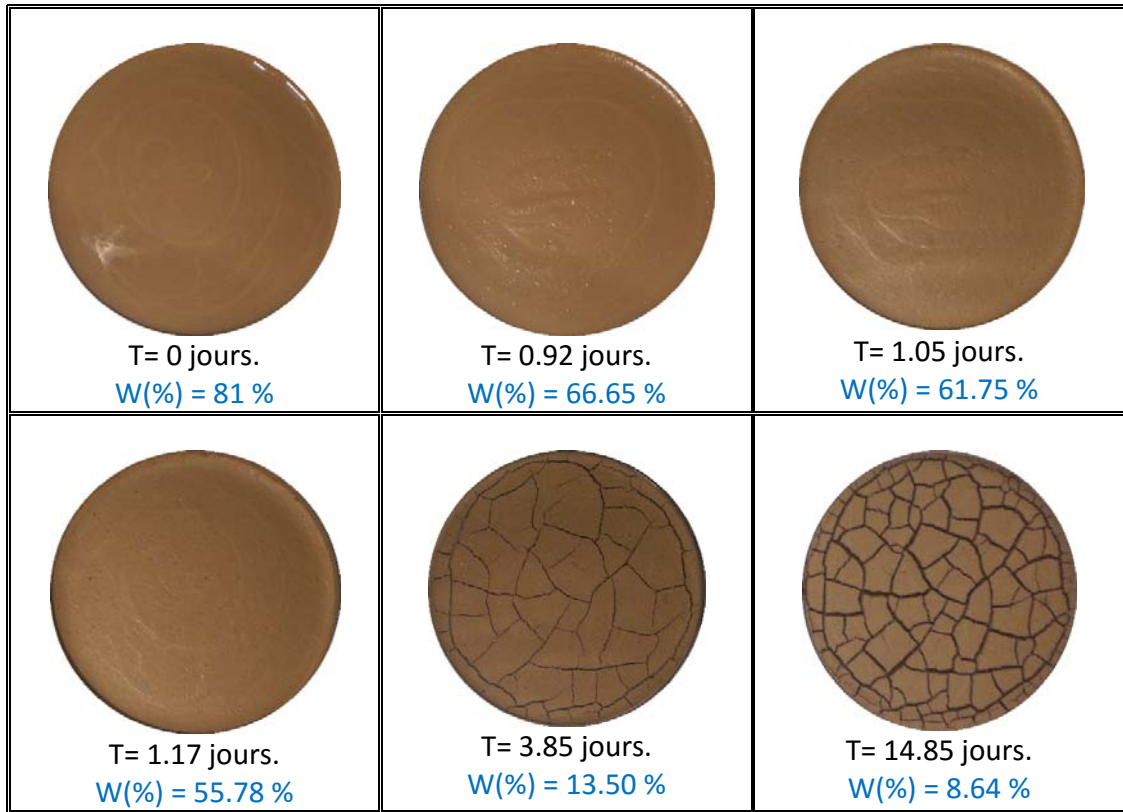


Figure 3.27 : Initiation et propagation des fissures au cours du temps à l'air libre ($T= 22^{\circ}\text{C}$) pour le sol de Boughrara Barrage ($W_L=54\%$, $W_p=26\%$).

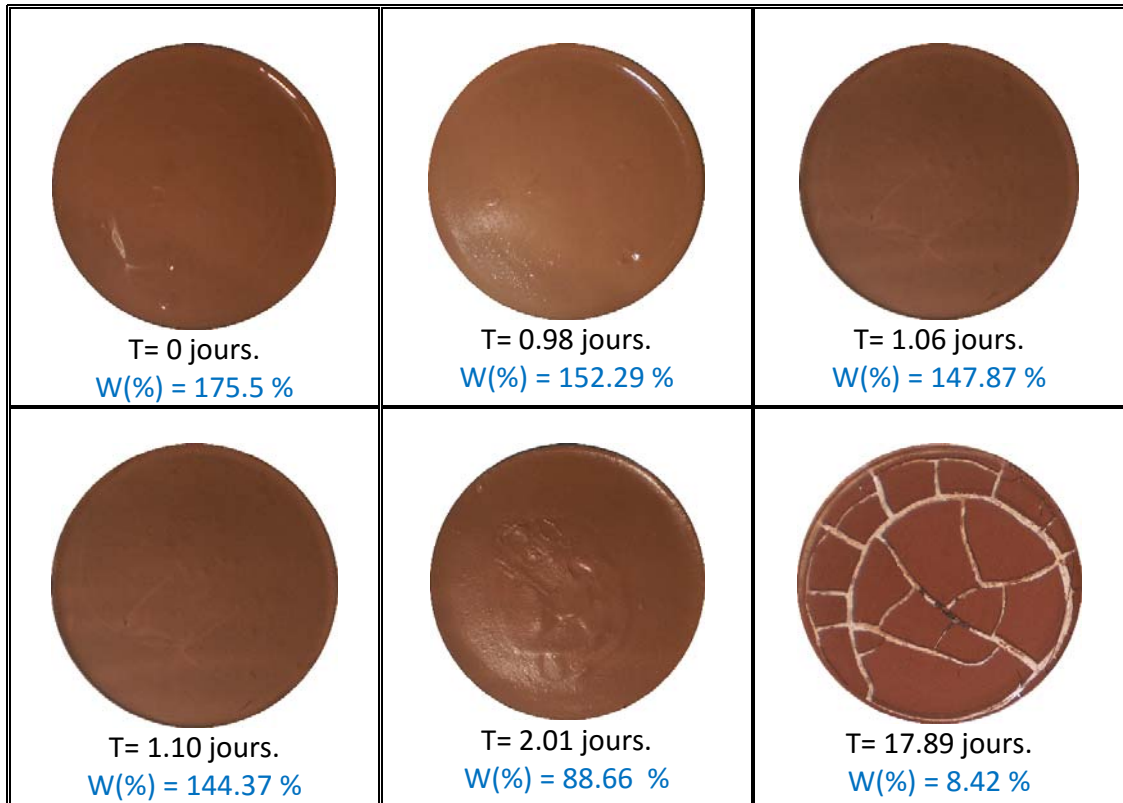


Figure 3.28 : Initiation et propagation des fissures au cours du temps à l'air libre (T= 22°C) pour le sol de Bâb El-Assa ($W_L=117\%$, $W_p=41\%$).

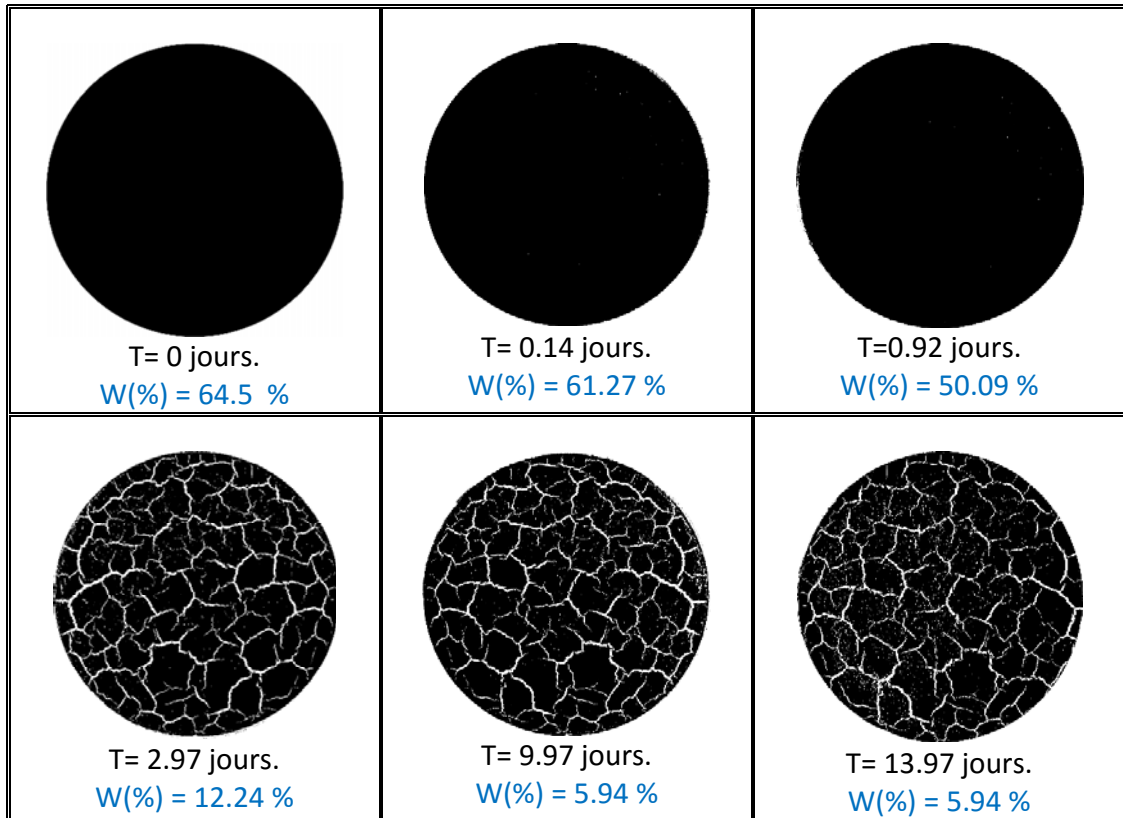


Figure 3.29: La propagation des fissures à l'air libre ($T=22^{\circ}\text{C}$) par traitement d'image pour le sol de Bouhrara Route ($W_L=43\%$, $W_p=23,45\%$).

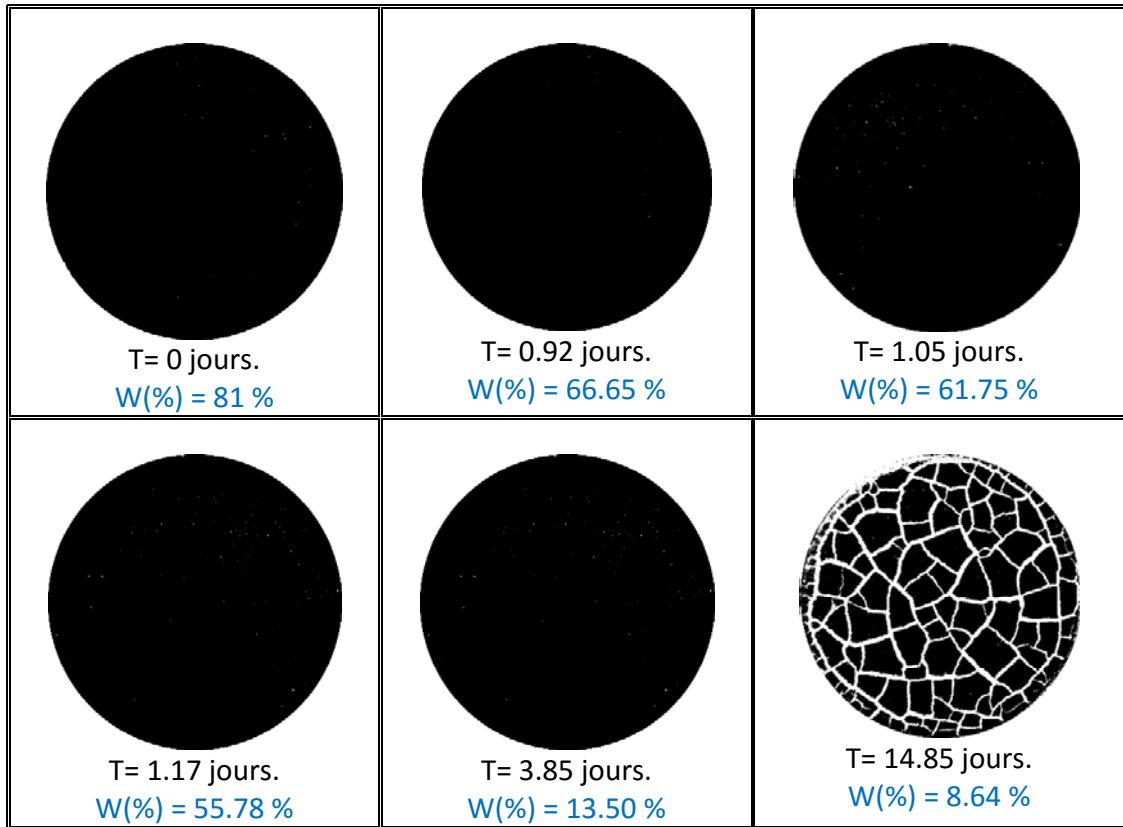


Figure 3.30: La propagation des fissures à l'air libre ($T=22^{\circ}\text{C}$) par traitement d'image pour le sol de Boughrara Barrage ($W_L=54\%$, $W_p=26\%$).

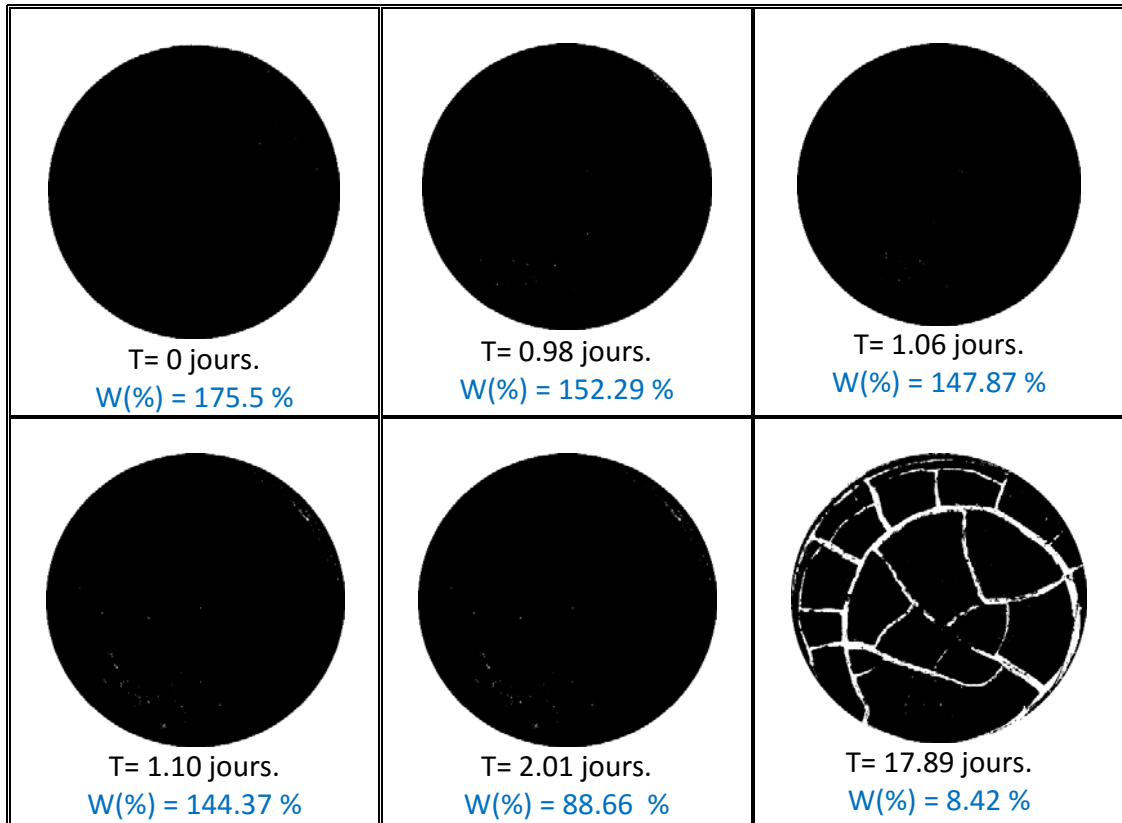


Figure 3.31: La propagation des fissures à l'air libre ($T=22^{\circ}\text{C}$) par traitement d'image pour le sol de Bâb El-Assa ($W_L=117\%$, $W_p=41\%$).

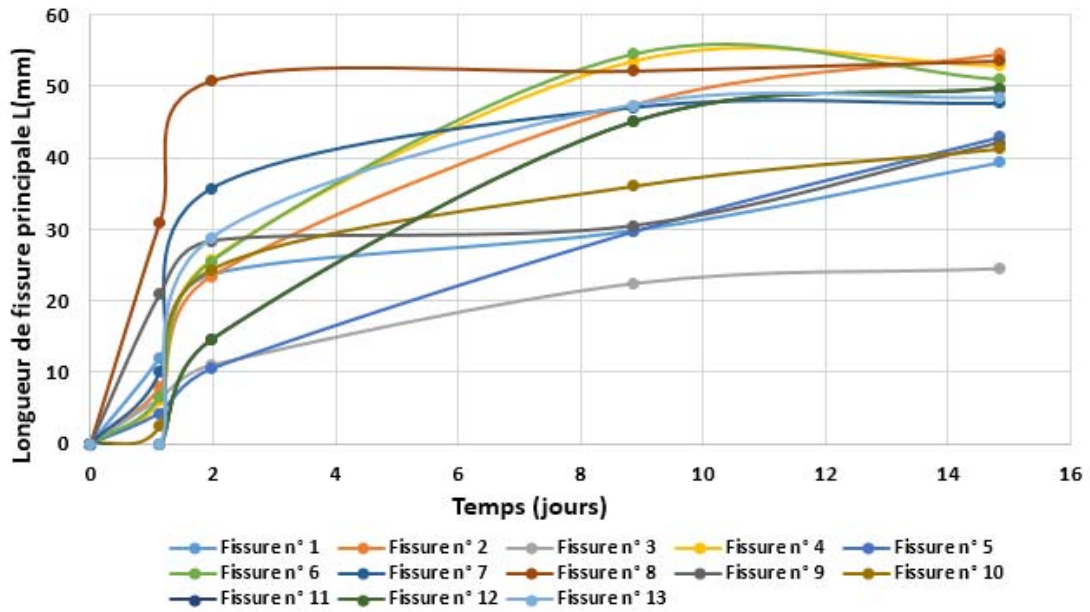


Figure 3.32 : Evolution de la longueur des fissures principales en fonction du temps pour le sol de Boughrara Barrage.

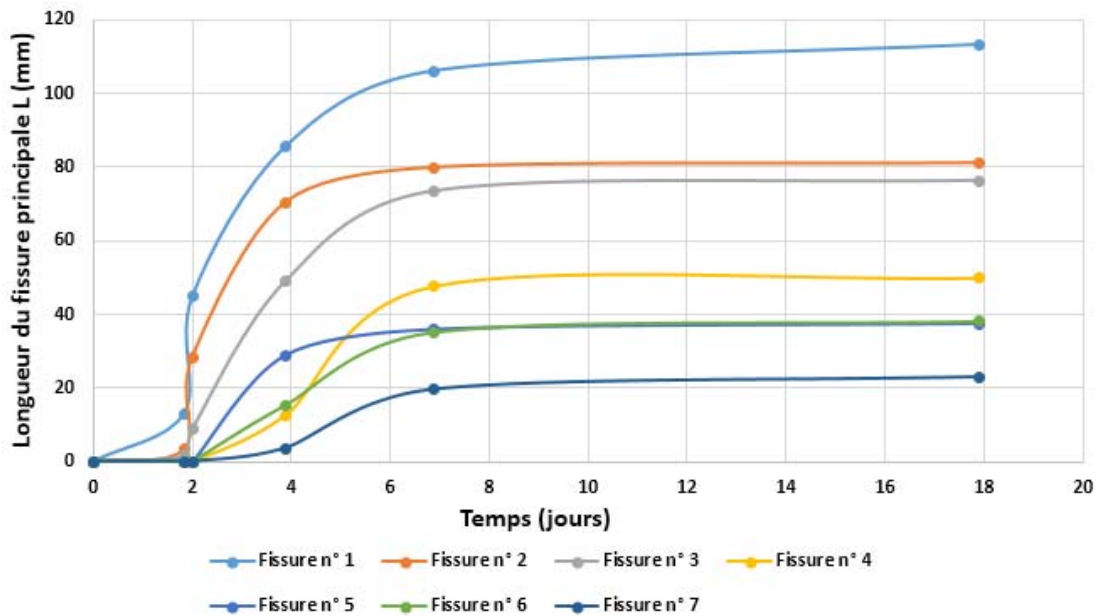


Figure 3.33 : Evolution de la longueur des fissures principales en fonction du temps pour le sol de Bâb El-Assa.

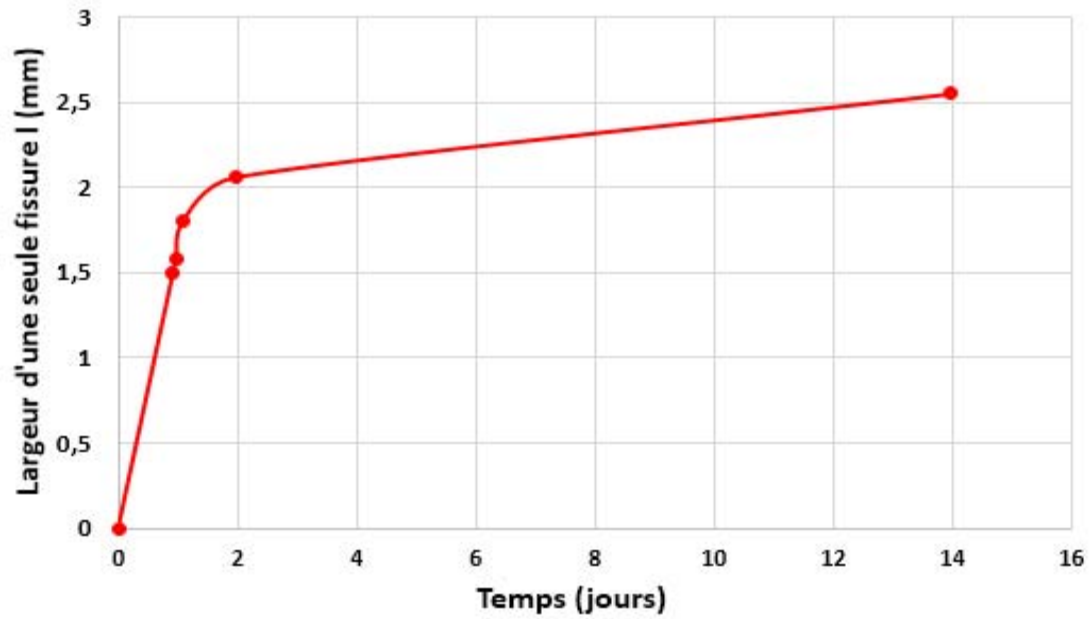


Figure 3.34: Evolution de largeur d'une seule fissure en fonction du temps Pour le sol de Boughrara Route.

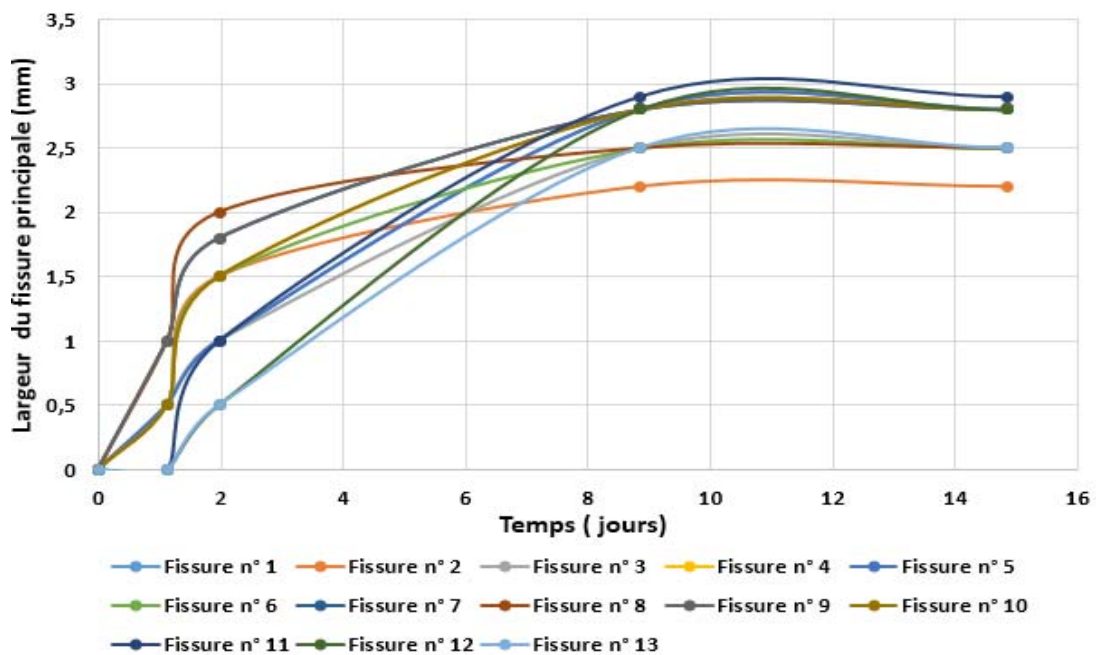


Figure 3.35: Evolution de largeur des fissures en fonction du temps Pour le sol de Boughrara Barrage.

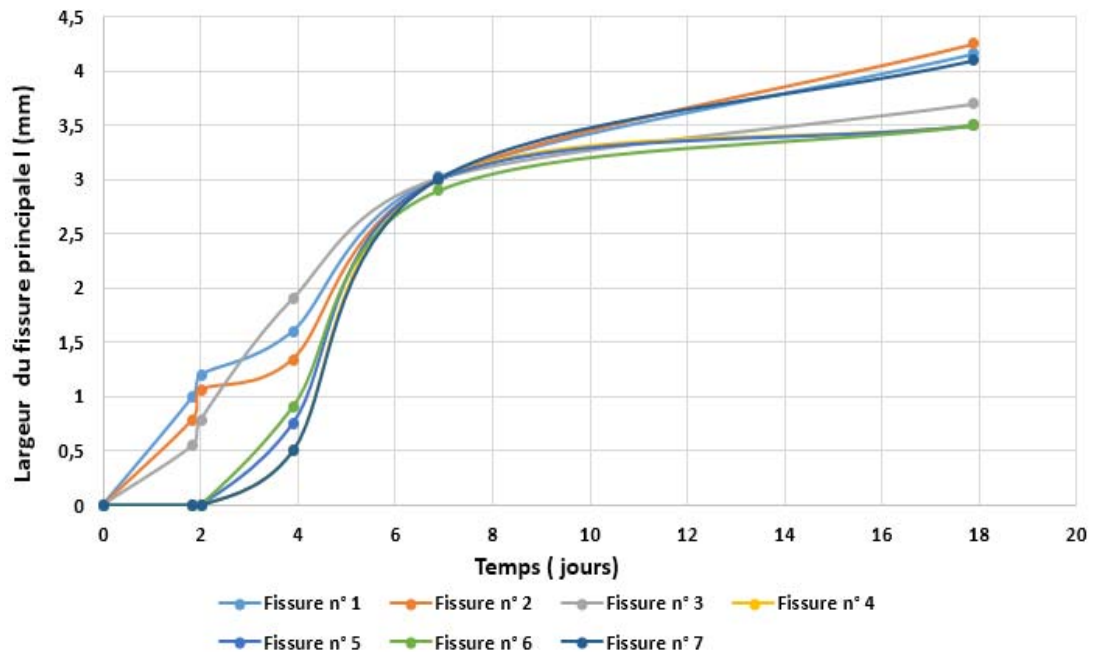


Figure 3.36: Evolution de largeur des fissures en fonction du temps Pour le sol de Bâb El-Assa.

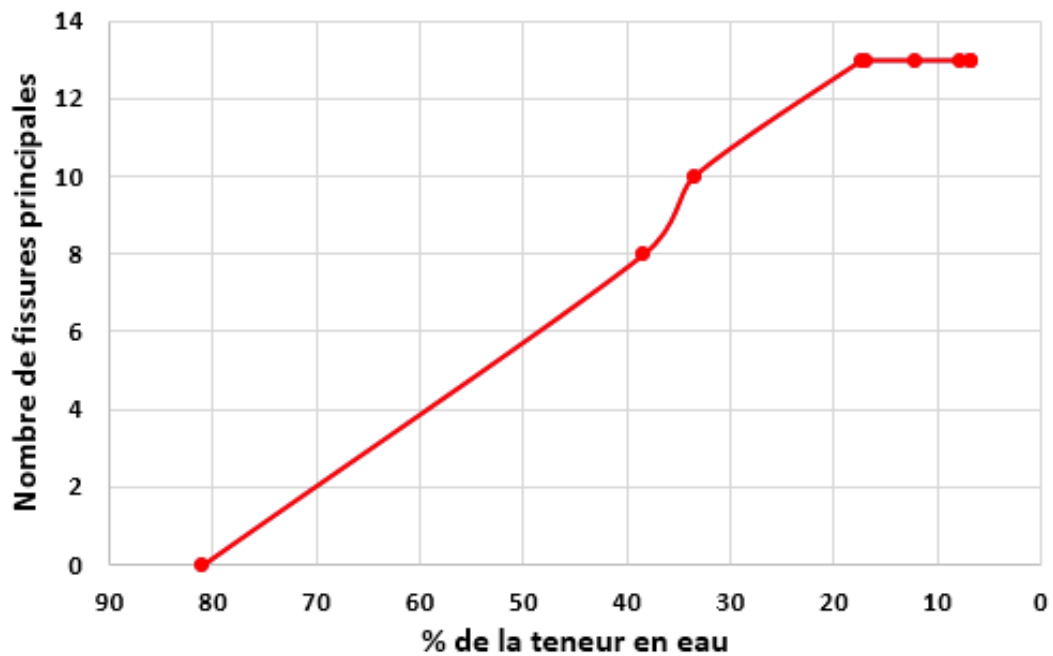


Figure 3.37: Evolution de nombre des fissures principales en fonction du la teneur en eau pour le sol de Boughrara Barrage.

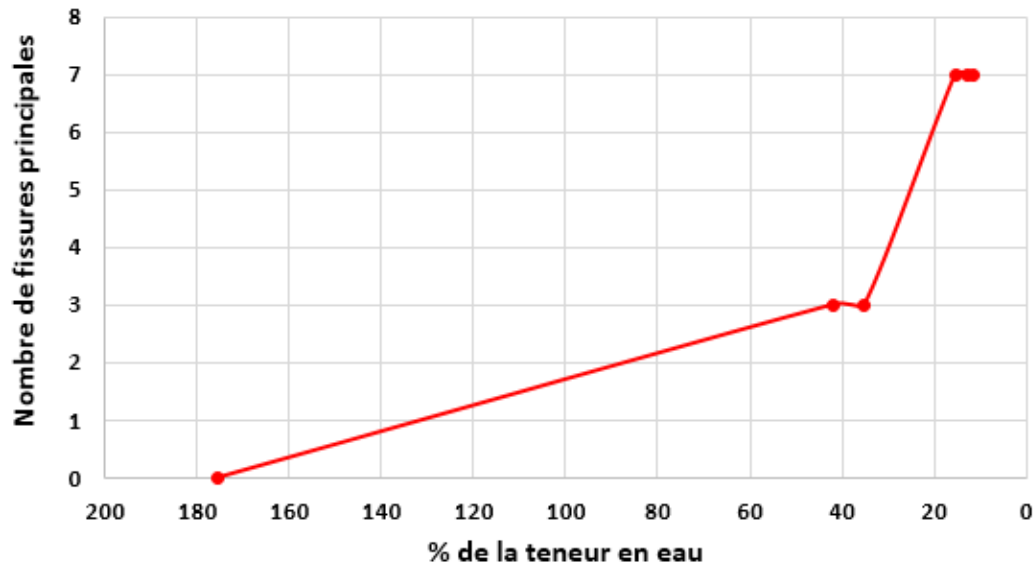


Figure 3.38: Evolution de nombre des fissures principales en fonction de la teneur en eau pour le sol de Bâb El-Assa.

Tous les résultats d'essais présentés sur *les figures 3.20, 3.21, 3.22, 3.26, 3.27, 3.28* à l'air libre ou à l'étuve montrent une diminution de la teneur en eau, rapide au début de l'essai puis qui tend progressivement vers un équilibre.

Signalons le fait que la vitesse de propagation à l'étuve est plus grande qu'à l'air libre.

Les figures montrent aussi l'amorce des premières fissures vers $t = 1,05$ jours pour le sol de Boughrara Barrage et $t = 1,84$ jours pour le sol de Bâb El-Assa juste à côté des parois, et se propage en séparant les parois de l'échantillon de sol.

Malheureusement pour le sol de Boughrara Route on n'a pas pu déterminer l'apparition de la première fissure par ce qu'il est déjà fissuré complètement à $t = 0,92$ jours. Ceci à cause de la vitesse de propagation qui est très rapide ($W_L = 43\%$).

On remarque en premier lieu que les fissures observées sont d'abord isolées puisque l'intersection n'est enregistrée qu'à $t = 1,97$ jours (Sol de Boughrara Barrage) et $t = 2,84$ jours (Sol de Bâb El-Assa). La longueur des fissures est alors assez importante pour que les fissures puissent se croiser.

Les premières minutes ne montrent pas d'évolution de la longueur totale des fissures, il apparaît ensuite une augmentation très rapide de L . A $t = 14,85$ jours, on obtient un palier de longueur totale $L = 52$ mm pour le sol de Boughrara Barrage et à $t = 17,89$ jours, on obtient un palier de longueur totale $L = 114$ mm pour le sol de Bâb El-Assa, ces résultats montre qu'il n'y a plus de création de fissures.

Les figures 3.34 et 3.35 représentent l'évolution en fonction du temps de la largeur moyenne des fissures principales. La largeur moyenne l va ensuite globalement augmenter jusqu'à une stabilisation vers $t = 14,85$ jours (Sol de Boughrara Barrage) et $t = 17,89$ jours (Sol de Bâb El-Assa) où le réseau fissuré n'évolue plus.

En calculant le nombre de fissures nous pouvons suivre en fonction du temps la création puis l'évolution du réseau fissuré, d'autre part en le reliant à la teneur en eau on retrouve la limite de retrait pour chaque sol étudié.

Les forces de traction surfaciques au fond du récipient sont de plus en plus grandes, au cours de la dessiccation, ce qui engendre l'avantage de contraintes de traction dans le sol.

Une fissure se développe localement quand la contrainte de traction atteint la valeur maximale limite du matériau ou encore sa résistance à la traction. Souvent la première fissure qui apparaît après celles qui se développent au niveau des parois, est située au milieu de l'échantillon et elle se forme très rapidement (*figure 3.21*, temps= 1,05 jours pour le sol de Boughrara Barrage et *figure 3.22*, temps= 1,84 jours).

Lorsque le sol continue à se désaturer la résistance à la traction augmente, et les écailles de sol peuvent se libérer du fond du récipient et cela va diminuer la surface de contact et entraîne donc l'arrêt localement du développement des contraintes de traction (les contraintes de traction sont relaxées). Par ailleurs, le phénomène de retrait continue sans apparition de nouvelles fissures. Seule l'épaisseur des fissures est susceptible d'augmenter par le retrait des parties séparées.

Lorsque la teneur en eau devient plus petite que la limite de retrait, la propagation des fissures s'arrête, et l'état hydrique du sol s'équilibre avec l'air ambiant a une teneur en eau résiduelle.

B. Limite de retrait W_s :

On a pu tracer la courbe de retrait de chaque matériau étudié qui est une expression graphique du comportement d'un matériau déformable initialement saturé et soumis à la dessiccation. Cette courbe est représentée, dans ce mémoire, par le pourcentage de la teneur en eau W (%) versus du temps exprimé par jours dans les deux cas à l'air libre et à l'étuve, et ce durant tout le processus de dessiccation.

Les courbes de retrait pour les différents matériaux testés sont présentées par les *figures 3.39, 3.40 et 3.41* suivantes :

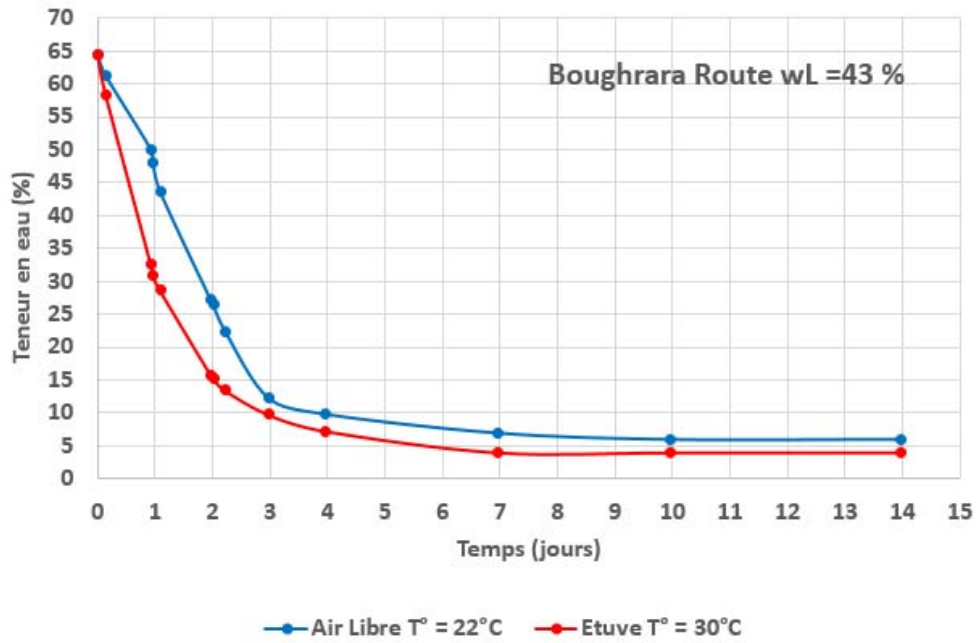


Figure 3.39 : La variation de la teneur en eau en fonction de temps de sol de Bouhrara Route.

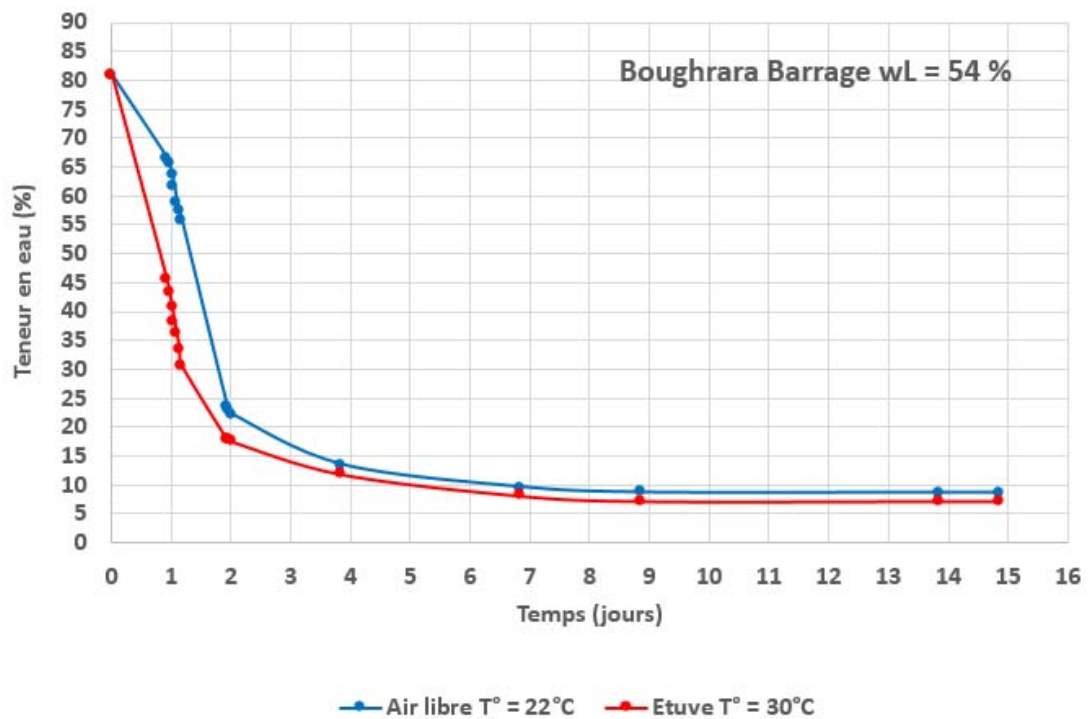


Figure 3.40 : La variation de la teneur en eau en fonction de temps de sol de Bouhrara Barrage.

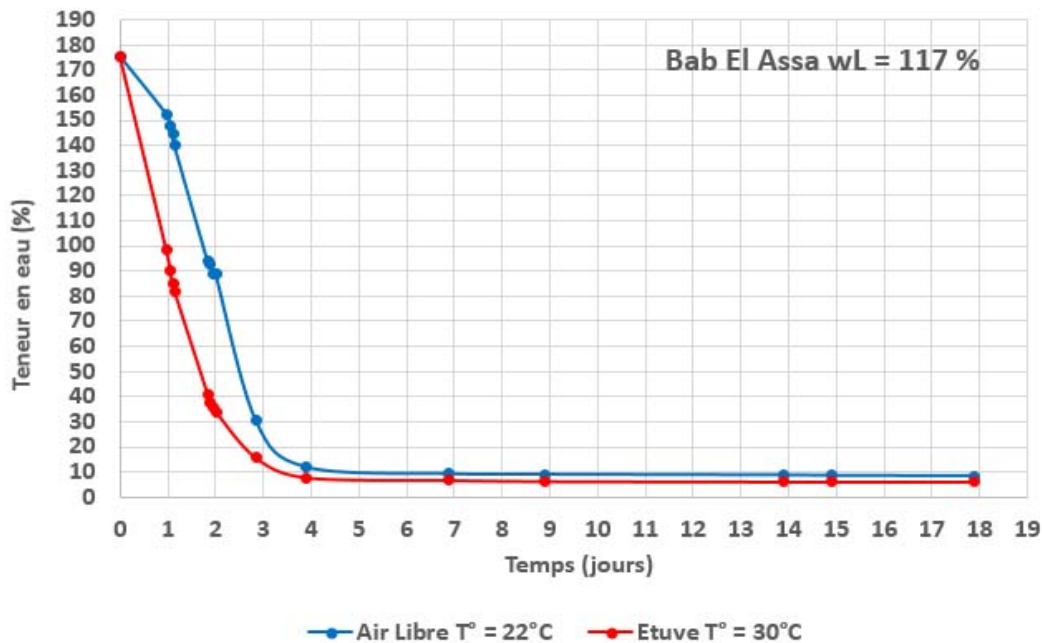


Figure 3.41 : La variation de la teneur en eau en fonction de temps de sol de Bâb El-Assa.

La limite de retrait W_s est définie graphiquement sur chaque courbe de retrait comme étant l'intersection entre la partie linéaire de la teneur en eau et la partie horizontale passant sur le segment de retrait stabilisés (Mbonimpa et al., 2006 ; Head, 2006).

Pour les conditions d'expérimentation considérées, les valeurs de la limite de retrait (procédure graphique) obtenues pour les différents matériaux analysés sont résumées dans le tableau 3.2. On présente aussi les valeurs des teneurs en eau initiales W_i .

Tableau 3.2 : Limites de retrait des matériaux testés.

Matériau	Teneur en eau initial W_i (%)	Limite de retrait à l'air libre W_s (%) (procédure graphique)	Limite de retrait à l'étuve W_s (%) (procédure graphique)
Bouhrara Route	64,5	13	11
Bouhrara Barrage	81	17	16
Bâb El-Assa	175,5	10	8

En analysant les résultats trouvés, la perte en eau durant le séchage comporte deux phases (figures précédent 3.39, 3.40 et 3.41) : une première phase où la teneur en eau diminue linéairement et une seconde où elle est stabilisée. La vitesse de la perte en eau augmente avec la température, les résultats trouvés à $T= 30\text{ °C}$ ne sont pas les même que les résultats trouvés à $T= 22\text{ °C}$. On remarque que à $T= 30\text{ °C}$ la vitesse de propagation des fissures est plus grande. Après stabilisation, la teneur en eau « résiduelle » des échantillons augmente alors que la température décroît. Ces résultats sont en accord avec ceux de [Tang et al., 2008](#).

A partir des Figures 3.39, 3.40 et 3.41, deux points particuliers dans l'évolution de la teneur en eau ont été définis. La teneur en eau critique initiale (ICWC) correspond à la teneur en eau du sol à l'apparition des fissures. La teneur en eau critique finale (TCWC) correspond à la teneur en eau à partir de laquelle la fissuration du sol n'évolue plus, tout en continuant à avoir une perte en eau.

On peut aussi remarquer à partir du *tableau 3.2* que les valeurs des limites de retrait déterminées graphiquement de l'air libre ($T=22\text{ °C}$) et à l'étuve ($T=30\text{ °C}$) sont assez proches.

Les limites de retrait W_s déterminées à partir des courbes de retrait varie entre 10 et 17% pour la température ambiante de ($T=22\text{ °C}$) et de 8 à 16% pour une température imposée de ($T=30\text{ °C}$) selon chaque matériau. Ces valeurs sont en accord avec les valeurs de la limite de retrait obtenues par [Qiu and Segó \(2001\)](#).

9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons mené une étude expérimentale sur les réseaux de fissures par dessiccation sur trois échantillons d'argile afin de caractériser les réseaux de fissures et d'identifier les processus à l'origine de leur apparition et propagation. Les argiles étudiées proviennent de la wilaya de Tlemcen et sont choisis selon leur limite de liquidité (un critère de choix).

Dans notre mémoire sur la fissuration des argiles soumise à des conditions de dessiccation, une campagne de 5 essais durant trois mois a été réalisée pour caractériser l'effet de la température et la limite de liquidité sur le réseau de fissures engendré. Cette étude vise une meilleure définition et compréhension des mécanismes de retrait et de fissuration des argiles en phase de dessiccation. La démarche poursuivie a consisté à effectuer des essais expérimentaux pour évaluer le retrait à l'air libre ($T=22\text{ °C}$) et à une température constante donnée ($T=30\text{ °C}$) en prenant un teneur en eau initiale $W_i = 1,5 W_L$, à la base de formation des fissures.

Ensuite, la démarche a consisté à comparer les résultats des essais expérimentaux entre eux. Elle sert aussi pour faire une comparaison avec les résultats de traitement d'image en utilisant le logiciel « ImageJ ».

Une analyse de la fissuration par dessiccation a été menée sur les matériaux. La méthode d'investigation menée sur une succession de photos numériques intégrant un traitement d'images, a permis de suivre précisément l'amorce puis le développement du réseau fissuré pour aboutir finalement à une description qualitative de ces réseaux.

CONCLUION GENERALE

Ce mémoire recherche vise à obtenir une meilleure définition et compréhension des mécanismes de retrait et de fissuration des trois sols argileux de la région de Tlemcen.

La démarche poursuivie dans cette étude a consisté à effectuer des essais expérimentaux pour évaluer le retrait d'une pâte préparée à une teneur en eau initiale qui vaut 1.5 la limite de liquidité du matériau étudié. Ces échantillons sont soumis à l'air libre et sous une température de 30°C fixée en mettant les spécimens dans une étuve.

Ensuite, la démarche a consisté à surveiller la progression des fissures lors de la dessiccation des argiles. Ce suivi est réalisé en prenant des photographies numériques à intervalle régulier pour finalement essayer de traiter ces données par le logiciel « Image J ».

Les quelques résultats expérimentaux obtenus montrent que :

- ✓ En ce qui concerne le retrait :
 - La perte en eau durant le séchage comporte deux phases pour l'ensemble des matériaux : une première phase où la teneur en eau diminue linéairement et une seconde où elle est stabilisée.
 - En comparant les échantillons soumis à l'air libre et ceux à une température de 30°C : La vitesse de la perte en eau augmente avec la température.
 - Les valeurs des limites de retrait déterminées à l'air libre (T=22°C) et à l'étuve (T=30°C) sont assez proches. Elles varient entre 10-17°C et 8-16°C pour les deux états cités précédemment.

- ✓ En ce qui concerne la fissuration :
 - L'amorce des premières fissures se fait d'une façon rapide pour les sols moins plastique (Boughrara-route) et elle dure relativement plus longtemps pour voir une fissure sur le sol de Bâb El-Assa qui est très plastique.
 - Après 15 jours d'essais, on obtient un palier de longueur totale L = 52 mm pour le sol de Boughrara Barrage et à 18 jours, on obtient un palier de longueur totale L = 114 mm pour le sol de Bâb El-Assa.

CONCLUSION GENERALE

Comme perspectives à ce travail, on propose de :

- ✓ Prendre des échantillons de sol plus représentatifs (20 cm x 20 cm) pour voir l'impact d'une grande surface ainsi qu'une épaisseur plus conséquente de 2 cm par exemple.
- ✓ Mettre un dispositif de caméra relié à une acquisition pour suivre 24h/ 24h l'évolution des fissures et non uniquement lors des heures d'ouverture du laboratoire.

ANNEXE

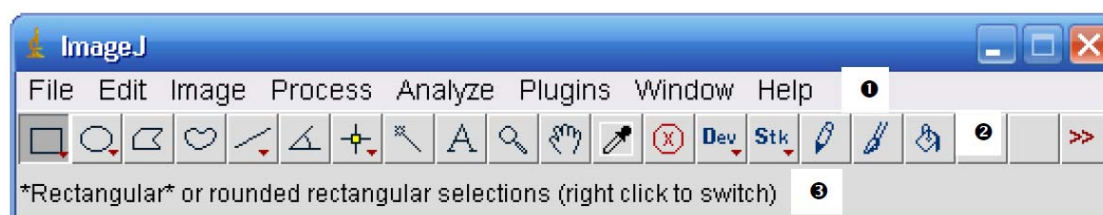
Cette annexe sert à monter les étapes de traitement d'image utilisé dans notre étude.

Traitement d'image en utilisant « ImageJ » :

FENETRE PRINCIPALE :

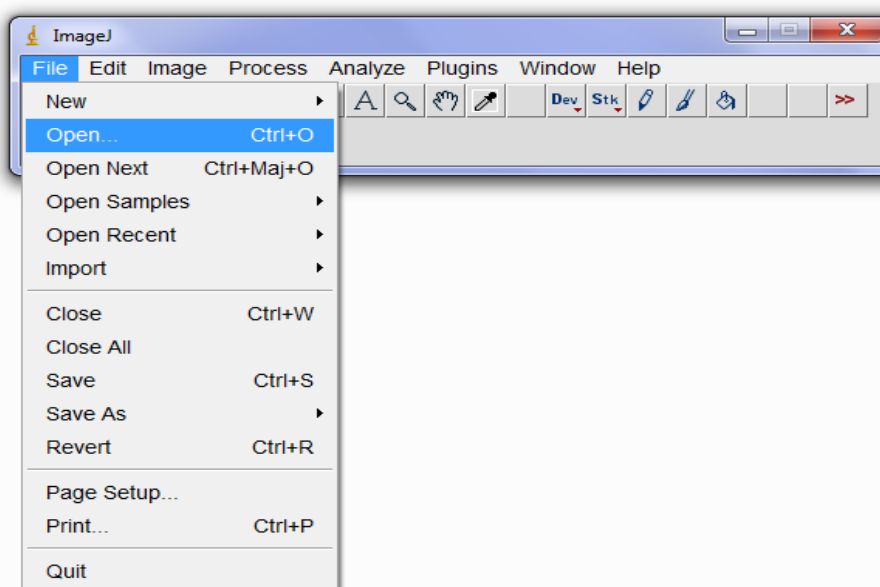
Image J se présente sous la forme d'une fenêtre principale flottante qui ouvre des fenêtres de données, elles aussi flottantes.

La fenêtre principale contient les menus (File, Edit...) ❶, les boutons des outils disponibles sous forme de logos ❷, et une barre d'information sur l'outil ou sur l'image ❸.

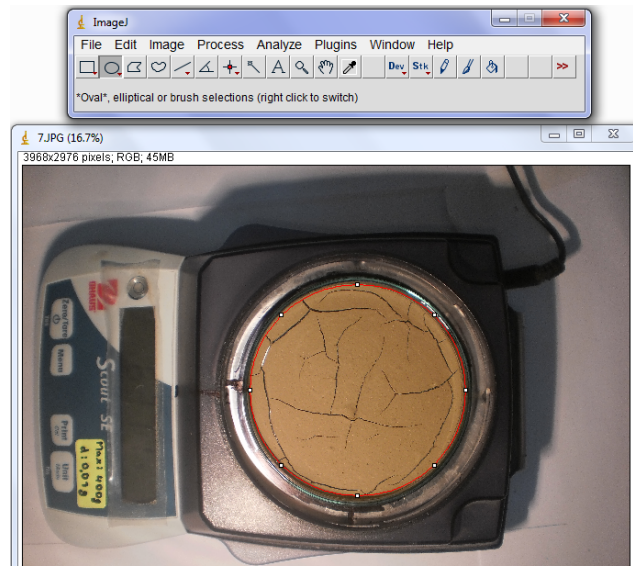


Pour traiter la longueur et la largeur des fissures avec logiciel Image J suivez les étapes suivantes :

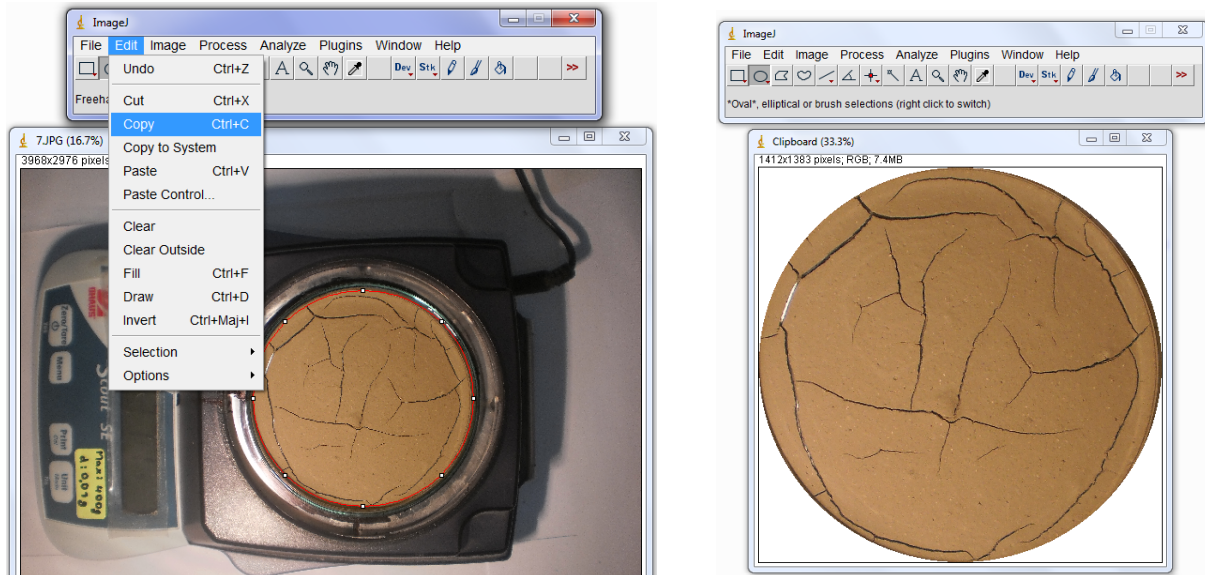
1- Cliquer File> Open> choisissez l'image.



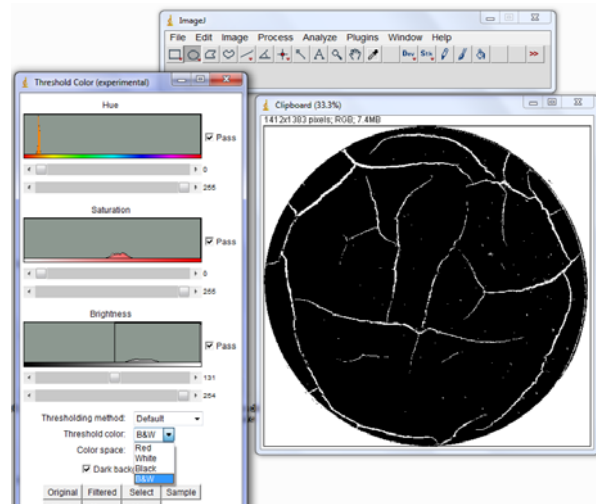
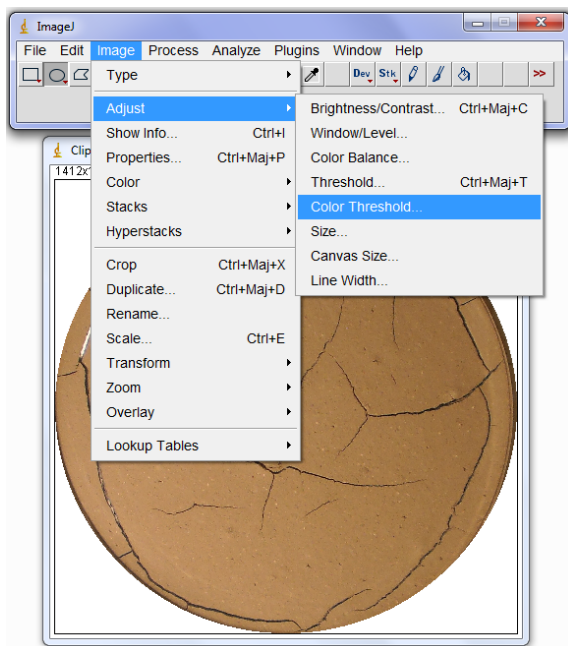
2- Cerner la partie intéressée d'image.



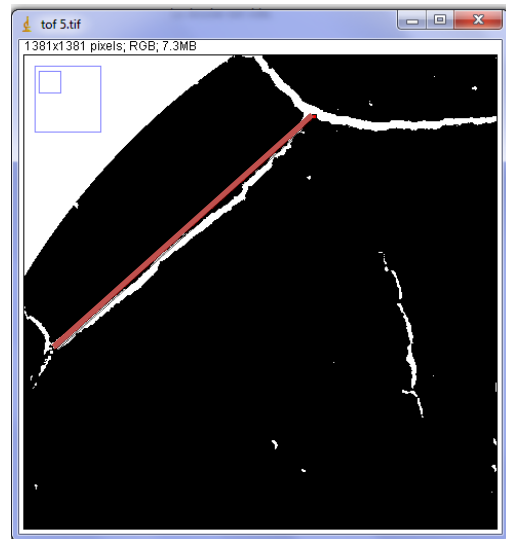
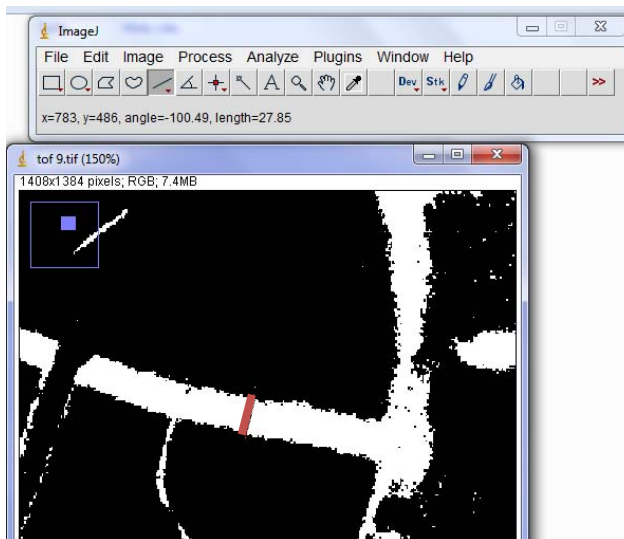
3- Copier la partie intéressée et coller dans un nouvelle interval.



4- Mettre l'image en Binary (noir et blanc).



5- Mesurer la longueur et la largeur du fissure.



BIBLIOGRAPHIE

Abu-Hejleh, A. N. et Znidarcic, D. (1995). Desiccation theory for soft cohesive soils. *ASCE J.Geotech.Engrg.*, 121 6:493–502.

AFNOR, « Norme française sol : reconnaissance et essais » :

XP P 94- 041 : Analyse granulométrique, méthode de tamisage par voie humide

XP P 94-060-1 et XP P 94-060-2, 1997. *Essai de dessiccation. Partie1 : Détermination conventionnelle de la limite de retrait. Partie2 : Détermination effective de la limite de retrait.*11 p

NF P 94- 051 : Détermination des limites d'Atterberg, la limite à la coupelle – limite de Plasticité au rouleau.

NF P 94- 054 : Détermination de la masse volumique, méthode du pycnomètre à eau.

NF P 94- 057 : Analyse granulométrique des sols par sédimentométrie.

NF P 94- 068 : Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à tâche.

Albrecht B.A, Benson C.H., « Effect of desiccation on compacted natural clay » , *J. Geotech. Geoenviron.*, vol.127, nol, **2001**, p. 67-75.

Amarasiri, A. L., Kodikara, J. K. et Costa, S. (2011). Numerical modelling of desiccation cracking. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 35(1) :82–96.

Ameur B. (1989). Sols gonflants : étude de cas. *Compte rendus de Symp Int de Mécanique des Sols*, Laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest (LTPO), Tiaret, Algérie, tome 1.

Aitchinson G.D., Holmes J.W. (1953). Aspects of swelling in the soil profile. *Aust. J. Appl.Sci.* 4, 244–259.

Avila, G. (2004). *Estudio de la retraccion y el agrietamiento de arcillas. Aplicacion a la arcilla de Bogotá (In Spanish).* Thèse de doctorat, Technical University of Catalonia, Barcelona, Catalonia(Spain).

Avila, G., Ledesma, A. et Lloret, A. (2013). One-dimensional cracking model in clayey soils. *In Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pages 1077–1080, Paris.

Ayad, R., Konrad, J. M. et Soulié, M. (1997). Desiccation of a sensitive clay: application of the model CRACK. *Canadian Geotechnical Journal*, 34 :943–951.

Azam, S., Ito, M. (2011). Unsaturated soil properties of a fissured expansive clay. Pan-Am CGS Geotechnical Conference.

Bahar R. & Kenai S. (2002). Désordres dus à l'infiltration des eaux : cas de la ville d'El-Affroun Rev Fr de Géot 101 : 91-103.

Bahar R. & Kenai S. (2008). Etude de quelques problèmes de fondations et d'ouvrages de soutènement dans les sols argileux. Actes du Symp Int Sécheresse et Constructions. Paris 2003, 413-418.

Bekkouche A., Djedid A., Bousmaha N. (1997) : Construire sur les sols expansifs, Séminaire national de genie civil, M'Sila, Algérie.

BENDI-OUIS A., (2014), « Comportement hydromécanique des sols fins compactés au voisinage de la saturation », Thèse de doctorat, Université A. Belkaid, Tlemcen (Algérie).

Ben Rhaeim H., Tessier D. et Pons CH.C. (1986) - Comportement hydrique et évolution structurale et texturale des montmorillonites au cours d'un cycle de dessiccation-humectation : partie I. Cas des montmorillonites calciques. *Clay Minerals*, vol. 21, pp. 9-29.

BIAREZ, J., FLEUREAU, J.M., ZERHOUNI, M.I. & SOEPANDJI, B.S., 1988. *Variations de volume des sols argileux lors de cycles de drainage-humidification.* Revue Française de Géotechnique, n° 41, pp. 63-71.

Bigot G., Zerhouni M.I. (2000) Retrait, Gonflement et tassement des sols fins, *Bull. labo.P.et Ch.*, 229, pp. 105-114.

Blight, G.E. (1997). "Interactions between the Atmosphere and the Earth". *Géotechnique*, 47(4), 715-767.

Bolt G.H. (1956) - Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clays. *Géotechnique*, vol. 6, pp. 86-93.

BOUKLIKHA. R et MECHERNENE. M., (2015), L'EFFET DU COMPACTAGE SUR LES CARACTERISTIQUES DE PERMEABILITE ET DE RESISTANCE D'UN SOL FIN, Mémoire de magister, Université A. Belkaid, Tlemcen (Algérie).

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.

BRGM (Communiqué de presse, Orléans, FRANCE. Le 12 Juillet 2011): sécheresse 2011: Aléa retrait-gonflement des sols argileux et prévention.

BRONSWIJK, J.J.B., 1988. *Modelling of water balance, cracking and subsidence of clay soils.* *Journal of Hydrology*, vol 97, pp. 199–212.

Caillère S. et Hénin S. (1959) - La classification des argiles. *XX Congr. Géol. Internat.*, Mexico, pp. 1-8.

COUGHLAN, K.J. MC GARRY, D., LOCH, R. J., BRIDGE, B. & SMITH, G. D. 1991. *The measurement of soil structure - Some practical initiatives.* *Australian Journal of Soil Research* 29: 869-889.

Corte, A., & Higashi, A. (1964). Experimental research on desiccation cracks in soil. *Research report No. 66, U.S. Army Material Command, Cold Region Research & Engineering Laboratory (CRREL), Hanover, N.H.*

Costa, S. et Kodikara, J. (2008). Modelling of desiccation crack development in clay soils. *In The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, pages 1099–1107, Goa, India.

DERFOUF F.M., (2014), « Contribution à l'étude des sols fins non saturés : Aspects du comportement volumique », Thèse de doctorat, Université A. Belkaid, Tlemcen (Algérie).

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.

Djedid A, Bekkouche A. & S.M. aissa Mamoune (2001). Identification et prévision du gonflement de quelques sols de la région de Tlemcen (Algérie). *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, N°233, p67-75.

Fredlund, D., Houston, S., Nguyen, Q., Fredlund, M. (2010). Moisture Movement Through Cracked Clay Soil Profiles. *Geotech. Geol. Eng.* 28, pp.865-888.

Freeah F., (2006), "Prise en compte du gonflement pour le dimensionnement des fondations superficielles", Thèse présentée pour obtenir le diplôme de magister en Génie

GENS, A. & ALONSO, E.E., 1992. *A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays.* Revue Canadienne de Géotechnique, vol. 29, pp. 1013-1032. Civil, Université de Batna.

Graham. C.B., 2004. Evaporation from Bare Soil and Soil Cracks: A Numeric Study. Thesis-Master of Science Oregon State University.

Grim R.E. (1962) - *Applied clay mineralogy.* McGraw-Hill Book Company, New York.

Groisman, A. et Kaplan, E. (1994). An experimental study of cracking induced by desiccation. *EPL (Europhysics Letters)*, 25(6) :415.

Hachichi A., Fleureau J. M. (1999). Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants d'Algérie, *Revue Française de Géotechnique* 86 :37-51.

HAINES, W.B., 1923. The volume-changes associated with variations of water content in soil. *Journal of agriculture. Science*, vol 13, pp. 296–311.

Hallaire, V. (1984). "Evolution of crack networks during shrinkage of a clay soil under grass and winter wheat crops. "Proceeding, ISSS Symposium on Water and Solute Movement in Heavy Clay Soils, J. Bouma and P.A.C. Raats (eds.). Wageningen, The Netherlands, 49-53.

Hallaire, V., 1988. La fissuration d'un sol argileux au cours du dessèchement. I Description in situ. *Agronomie*, 8,2, 139-145.

Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics.* Academic Press, San Diego, CA. 771 p.

Holtz R.D., Kovacs W.D. (1981) *An Introduction to Geotechnical Engineering.* Prentice-Hall, Upper Saddle River NJ.

Holtz R. D et Covacs W.D., (1996), « *Introduction à la géotechnique* », Edition de l'école Polytechnique de Montréal.

Hu, L., Péron, H., Hueckel, T., & Laloui, L. (2006). Numerical and phenomenological study of desiccation of soil. *Unsaturated Soil, Seepage, and Environmental Geotechnics*, 148, 166-173.

Jackson M.L. et Sherman G.D. (1953) - Chemical weathering of minerals in soils. *Adv. Agron.* vol. 5, pp. 219-318.

KAZI AOUAL. R & KENADIL. A., (2016), Comportement mécanique des sols compactés, Mémoire de magister, Université A. Belkaid, Tlemcen (Algérie).

Kodikara, J., Barbour, S. L. et Fredlund, D. G. (2000). Desiccation cracking in soils. *In Proc. of the Asian conf. on unsaturated soils -Unsaturated soils for Asia, Rahardjo and Toll and Leong eds.*, pages 693–698, Rotterdam. Balkema.

Konrad, J. M. et Ayad, R. (1997a). Desiccation of a sensitive clay: Field experimental observations. *Canadian Geotechnical Journal*, 34:929–942.

Konrad, J. M. et Ayad, R. (1997b). An idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation. *Canadian Geotechnical Journal*, 34:477–488.

KIM, D.J., VERECKEN, H. & FEYEN, J., 1992. *Comparison of multidisciplinary approaches and unification of concepts on the movement of water and soil in deformable porous media*. *Soil Sci.* 156, 141–149.

Lachenbruch, A. (1961a). Mechanics of thermal contraction cracks and ice-wedge polygons in permafrost. *Geological Society of America*, 70:1–69.

Lakshmikantha, M.R., Prat, P.C., Ledesma, A. (2006). An experimental study of cracking mechanisms in drying soils. Proceeding of the ISSMGE's Fifth International Congress on Environmental Geotechnics, Cardiff University, ... (Vol 1, pp 816-823).

Laloui. L., T. Hueckel. T., Hu. L.B., 2009. Desiccation cracking of soils. *European Journal of Civil and Environmental Engineering.*, Volume 13-n° 7-8/2009, pages 869-888.

Lecocq, N. et Vandewalle, N. (2003). Dynamics of crack opening in a one dimensional desiccation experiment. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 321 :431-441.

Lima L.A., Grismer M.E. (1992) Soil crack morphology and soil salinity. *Soil Sci.* 153, 149–153.

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.

Mbemba, F. S. (2010). *EVALUATION DE LA DESSICCATION, DU RETRAIT ET DE LA FISSURATION DE MATÉRIAUX SILTEUX PEU PLASTIQUES*. Thèse de Doctorat, UNIVERSITE DE MONTREAL, DEPARTEMENT DES GENIES CIVIL, GEOLOGIQUE ET DES MINES ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL.

MC GARRY, D. & DANIELLS, I.G., 1987. *Shrinkage curves indices to quantify cultivation effects on soil structure of a Vertisol.* Soil Science Society of America Journal 51:1575-1580.

Mi H. (1995) Kinematic wave formulation for flow through macroporous soil. Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Wayne State University, Detroit, MI.

Miller C.J., Mi H., Yesiller N. (1998) Experimental analysis of desiccation crack propagation in clay liners. *J. Am. Water Resource. Assoc.*, AWRA 34 (3), 677–686.

Millot G. (1964). *Géologie des argiles : Altérations, sédimentologie, géochimie.* Masson, 499 p.

Min, T-K., & Nhat, V. D. (2007). A Simple Model of Shrinkage Cracking Development for Kaolinite. *Journal of the KGS*, 23(9), 29-37.

Mitchell J.K. (1976) - *Fundamentals of soil behaviour.* First ed. John Wiley et Sons, New York, 437p.

Mitchell J.K. (1993) - *Fundamentals of soil behaviour.* 2nd ed. John Wiley et Sons, New York.

Morris, P. H., Graham, J., and Williams, D. J. 1992. Cracking in drying soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 29, No. 2: 263-277.

Nahlawi, H., Kodikara, J.K., 2006. Laboratory experiments on desiccation cracking of thin soil layers. *Geotechnical and Geological Engineering* 24, 1641-1664.

NOWAMOOZ, H. 2007. RETRAIT/GONFLEMENT DES SOLS ARGILEUX COMPACTES ET NATURELS, Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure de Géologie Laboratoire Environnement, Géomécanique & Ouvrages École Doctorale RP2E, France.

Péron, H., Laloui, L., Hueckel, T., & Hu, L. (2006). Experimental study of desiccation of soil. *Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soil, Carefree, AZ, United State* (Vol. 1, pp. 1073-1084). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.

Péron, H., 2008. Desiccation cracking of soil. Ph.D. Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland.

Péron, H., Herchel, T., Laloui, L., Hu, L.B., 2009b. Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soil : experimental characterization and mechanisms identification. *Canadian Geotechnical Journal* 46, 1177-1201.

PHILIPPONAT, G., 1991. *Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie.* Revue Française de Géotechnique, n° 57, pp. 5-22.

Plummer P.S., Gostin V.A. (1981) Shrinkage cracks : desiccation or syneresis. *J. Sediment.Petrol.* 54, 1147–1156.

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:

Rayhani, M.H.T., Yanful, E.K., and Fahher, A. 2007. Physical modeling of desiccation cracking in plastic soils. *Engineering Geology*, 97: 25-31.

Rodriguez, R., Sanchez, M., Ledesma, A., Lloret, A., 2007. Experimental and numerical analysis of desiccation of a mining waste. *Canadian Geotechnical Journal* 44, 644-658.

Saiyouri N. (1996) - *Approche microstructurale et modélisation des transferts d'eau et du gonflement dans les argiles non saturées.* Thèse de Doctorat, École Centrale de Paris, 228 p.

SCHUBERT, R., 1982. *Kapillarität in porösen Feststoffsystemen.* Vol 1, Springer-Verlag-Berlin – Heidelberg - New York.

Sima, J., Jiang, M. et Zhou, C. (2013). Modelling desiccation cracking in thin clay layer using three-dimensional discrete element method. *AIP Conference Proceedings*, 1542(1) :245–248.

Sitharam T.G., Sivapullaiah P.V., Subba Rao K.S. (1995) Shrinkage behaviour of compacted unsaturated soils. *Proceedings of the 1st Inter. Conf. Unsaturated Soils Unsat'95*, Paris, vol. 1, pp. 195-200, Balkema/Presses ENPC.

SPOSITO, G., 1973. *Volumes changes in swelling soils.* *Soil Sciences*, vol. 115, pp. 315-320.

TABBAL.D., 2013. *Impacte des fissures sur la sécheresse des sols argileux.* Thèse de Doctorat, Université Lille I Science et Technologie.

Tang C.S., Shi B., Liu C., Wang B.J. (2007) Factors affecting the surface cracking in clay due to drying shrinkage. *J. Hydraul. Eng.* 38 (10), 1186–1193 (in Chinese).

Tang C.S., Shi B., Liu C., Wang B.J. (2008) Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils. *Engineering Geology*, 101, pp 204-217.

Tang, C., 2009. Shrinkage and cracking behaviour of swelling soil under different temperatures (Available online: <http://www.paper.edu.cn>).

Tang, C.S., Cui, Y.J., Tang, A.M., Shi, B., 2010. Experimental evidence on the temperature dependence of Desiccation cracking behavior of of clayey soils. *Engineering Geology* 114, 261-266.

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.

TRABELSI.H., 2013. Etude expérimentale et numérique du comportement des argiles soumises à des conditions de dessiccation. Thèse de Doctorat, l'Ecole Nationale d'Ingenieurs de Tunis.

Tessier D., Blaise 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. Rapport INRA réalise pour le compte du MEDD. 287 p.

Towner, G. D. (1987). The mechanics of cracking of drying clay. *J. agric. Engrg. Res*, 36 :115–124.

TRAN. T.D., (2014), Rôle de la microstructure des sols argileux dans les processus de retrait-gonflement : de l'échelle de l'éprouvette à l'échelle de la chambre environnementale, Thèse de doctorat, l'École nationale supérieure des mines de Paris, Paris (France).

TRIPATHY, S., SUBBA RAO, K.S. & FREDLUND, D.G., 2002. *Water content – void ratio swell-shrink paths of compacted expansive soils.* *Revue Canadienne de Géotechnique.* pp. 938-959.

Vincent M., Bouchut J., Fleureau J.-M., Masrouri F., Oppenheim E., Heck J.-V., Ruaux N., Le Roy S., Dubus I., Surdyk N. (2006) - Étude des mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux et de ses interactions avec le bâti – rapport final. BRGM/RP-54862-FR, 378 p., 308 ill.

Vincent M., Hédou F., Chirouze M., Plat E., Le Roy S. (2008) – Cartographie à l'échelle départementale de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux à des fins préventives, Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1- 3 sept.2008, éd. Du LCPC, Paris, pp. 55-62.

Vogel, H. J., Hoffmann, H. et Roth, K. (2005a). Studies of crack dynamics in clay soil i. experimental methods, results, and morphological quantification. *Geoderma*, 125 :3-4:203–211.

Vogel, H. J., Hoffmann, H. et Roth, K. (2005b). Studies of crack dynamics in clay soil ii. a physically based model for crack formation. *Geoderma*, 125 :3-4 :213–223.

Voïnovitch I.A. (1971) - L'analyse minéralogique des sols argileux. *Eyrolles*, 93 p.

Yesiller N., Miller C.J., Inci G., Yaldo K. (2000) Desiccation and cracking behavior of three compacted landfill liner soils. *Eng. Geol.* 57, 105-121.

Yong R.N., Warkentin B.P. (1975) *Soil properties and behaviour*. Elsevier, 449 pp.

YULE, D.F. & RICHIE, J.T., 1980. *Soil shrinkage relationships of Texas vertisols*. Soil science society of America journal, vol 44, pp. 1285–1291.

Zhang, L., Fredlund, D.G. (2003). Characteristics of water characteristic curves for unsaturated fractured rocks. In: The second Asian conference on unsaturated soils, Unsat-Asia, Osaka, Japan, pp 425-428.

Zhang, L.M., Li, J.H., Fredlund, D.G. (2011). Unsaturated conductivity function for unsaturated cracked soil. *Unsaturated soils: 993-999*.

Zein el Abedine A., Robinson G.H. (1971) A study on cracking in some vertisols of the Sudan. *Geoderma* 5, 229-241.

Zenkri A., (2010), "Solutions de construction sur sol potentiellement gonflant application à la région d'In-Aménas", Thèse présentée pour obtenir le diplôme de magister en Génie Civil spécialité géotechnique, Université Houari Boumediene.

WEBGRAPHIE

Site du logiciel open source Image J : <http://imagej.net/Welcome>

ملخص

تشقق التربة نتيجة الجفاف ظاهرة ذات أهمية كبيرة في الجيوتقنية وبخاصة الجيوتقنية المحيطية. الهدف من هذه الدراسة هو محاولة فهم كيف، في مادة طينية التي توجد في حالتها الأولية على شكل عجينة مشبعة تظهر التشققات الصغيرة وكيف تتطور اثناء التجفيف في الهواء الطلق وفي درجة حرارة ثابتة تقدر ب 30 درجة مئوية. المنهجية التي نقترحها تجريبية وتعتمد على متابعة الشبكة المتشقة عن طريق مختلف الاعدادات التطورية مثل: المحتوى المائي، الطول المتوسطي للتشققات، العرض المتوسطي للتشققات وعدد التشققات. الكلمات المفتاحية: الطين، التشقق، التجفيف، التقلص، المحتوى المائي.

Résumé

La fissuration des sols due à la dessiccation est un phénomène d'une importance majeure en géotechnique et en particulier en géotechnique environnementale. L'objectif de cette étude est de tenter de comprendre comment, dans un matériau argileux qui, à l'état initial, se trouve sous forme d'une pâte saturée, la microfissuration apparaît et comment elle se développe au cours d'un séchage à l'air libre et à température constante de 30°C. L'approche que nous proposons est expérimentale et consiste à suivre le phénomène de retrait ainsi que le développement de réseau de fissures à partir de différents paramètres évolutifs tels que : la teneur en eau, la longueur de fissures, la largeur des fissures et le nombre de segments.

MOT-CLÉS : Argile, fissuration, dessiccation, retrait, teneur en eau.

Abstract

The soil cracking due to drying is a phenomenon of major importance in geotechnical and particularly in environmental geotechnics.

The objective of this study is to try to understand how, in the clay material in the initial state is in the form of a saturated paste, micro cracks appear and how it develops during drying in the free air and at a constant temperature of 30 ° C.

The approach we propose is experimental and is consist to follow the shrinkage phenomenon and the cracks development from various parameters such as water content, the total area of cracks, crack width and number of segments.

KEY WORDS: Clay, cracks, desiccation, shrinkage, water content.
