

THESE EN COTUTELLE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR

délivré par

L'Université Lille I Sciences et Technologies

L'Université Libanaise - Ecole Doctorale des Sciences et Technologie

Spécialité: Génie Civil

Présentée par

Diala TABBAL

Impact des fissures sur la sécheresse des sols argileux

Soutenue publiquement le 23 octobre 2013 devant le jury composé de :

M. Mouin HAMZE	Professeur, Secrétaire Général du CNRS Liban	Président
M. Fadi GEARA	Professeur, Doyen de la Faculté de Génie, USJ	Rapporteur
M. Nishimura TOMOYOSHI	Associate Professor, Ashikaga Institute of Technology	Rapporteur
M. Isam SHAHROUR	Professeur, Université Lille I S.T	Directeur
M. Fadi HAGE CHEHADE	Professeur, Université Libanaise	Directeur
M. Marwan SADEK	Maitre de Conférences. HDR, Université Lille I S.T	Co-Directeur

A ma très chère maman et à mon très cher papa

À mon mari Nabil

A mes sœurs et mes frères

A tous ceux qui me sont chers

Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé dans le cadre d'une thèse de doctorat en cotutelle entre l'Université Lille 1 Sciences et Technologie et l'Ecole Doctorale des Sciences et de Technologie à l'Université Libanaise avec le soutien financier de l'association «Azm et saadé» au Liban.

Les recherches qui font l'objet de ce mémoire ont été réalisées sur trois sites: en France, au sein du Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE); au Liban, dans le Centre de Modélisation "PRASE" à l' Ecole Doctorale des Sciences et Technologie à l'Université Libanaise ; et au Japon, au sein du laboratoire de génie civil à l'université "Ashikaga Institut of Technology".

Par ces quelques lignes, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement de cette thèse, en espérant n'avoir oublié personne...

J'adresse mes vifs remerciements à l'association «Azm et saadé» pour le soutien financier de mon travail de thèse. Je remercie vivement Professeur Mohamad KHALIL et l'Université Libanaise pour la bourse d'études qu'ils m'ont accordée.

Je tiens à remercier spécialement mon directeur de thèse en France Monsieur Isam SHAHROUR. Merci d'avoir cru en mes capacités, pour le temps et la patience que vous m'avez accordés tout au long de ces années. J'ai beaucoup apprécié travailler à vos côtés tant sur le plan scientifique que sur le plan humain. Je garde toujours beaucoup de plaisir à discuter avec vous et à bénéficier de vos conseils.

J'adresse mes vifs remerciements à mon directeur de thèse Libanais Monsieur Fadi HAGE CHEHADE d'avoir bien assuré la direction et l'encadrement de mes travaux de thèse. Merci pour votre gentillesse, votre patience, votre écoute et vos précieux conseils qui ont été prépondérants pour la bonne réussite de cette thèse.

Mes sincères remerciements et ma gratitude vont aussi à Monsieur Marwan SADEK, co-encadrant de ce travail de thèse, pour sa sympathie, sa disponibilité, ses conseils, ses encouragements et ses qualités humaines.

Soyez assurés, chers professeurs, de mon estime et de ma profonde gratitude.

Je souhaite remercier respectueusement Monsieur Mouin HAMZE de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse ainsi que Monsieur Fadi GEARA d'avoir accepté de rapporter cette thèse. Vos remarques pertinentes et vos conseils précieux m'ont beaucoup aidé à améliorer la qualité de ce travail.

Je tiens aussi à remercier M. Tomoyoshi NISHIMURA pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire et m'avoir guidé dans ce domaine mais également pour avoir bien voulu rapporter ce mémoire.

Je remercie aussi tous les membres du Laboratoire LGCgE pour la sympathie et l'aide qu'ils m'ont témoignées durant ces trois années de thèse. Mes vifs remerciements vont à Ahmad Al QADAD pour son aide et son support durant mon travail

Un très grand merci à tous mes amis, d'ici et de là-bas, pour nos innombrables moments avec mes meilleurs souhaits de réussite pour leurs vies professionnelles et personnelles.

Enfin, les mots les plus simples étant les plus forts, j'adresse toute mon affection à ma famille et ma ma belle-famille, et en particulier à maman Mona, papa Toufic, sœurs et frères. Malgré mon éloignement, votre confiance, tendresse et amour me portent et me guident tous les jours. Merci pour avoir fait de moi ce que je suis aujourd'hui. Je vous aime.

A l'amour de ma vie et mon mari Nabil AL ZOUABI: Tu as été toujours là durant tout ce travail. Tu m'as supporté, encouragé et apporté tout le confort dont j'avais besoin durant les moments les plus difficiles de mes recherches et ma rédaction. Les paroles ne suffisent pas pour décrire mes remerciements pour toi. Merci Mon Amour ...

Pour tout ce que vous m'avez donné, je vous remercie très sincèrement...

Diala

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet des fissures de dessiccation sur le comportement thermo-hydro-mécanique des sols argileux sensibles au phénomène de retrait.

Ce travail inclut une étude expérimentale caractérisant l'influence des fissures sur le séchage des sols fins ainsi qu'une étude numérique comprenant une modélisation du processus dans le but de présenter l'impact des fissures sur le comportement thermo-hydrique d'un milieu argileux non saturé.

L'étude expérimentale comprend des expériences de séchage réalisées en laboratoire sur des échantillons de sol intacts et fissurés où l'évolution de la teneur en eau a été suivie. Les processus liés la formation de nouvelles fissures ainsi qu'à la propagation des fissures sont aussi discutés.

Une modélisation numérique du processus de fissuration des sols fins est ensuite présentée. Dans cette étude, une analyse détaillée de l'influence des fissures sur l'interaction sol-atmosphère est présentée. Un modèle numérique bidimensionnel de l'interaction sol-atmosphère tenant compte de la présence des fissures a été développé. Ce modèle prend en compte le couplage thermo-hydrique d'un milieu argileux non saturé. Dans cette étude, on a montré l'impact des fissures sur le développement de la succion, sur la variation de la teneur en eau ainsi que sur la valeur d'entrée de l'air. L'influence des fissures sur le transfert hydrique en présence d'une structure à la surface du sol est également présentée. Cette étude propose aussi une approche simplifiée pour la prise en compte des fissures dans l'interaction sol-atmosphère.

Dans la dernière partie de ce travail, l'influence des fissures sur l'évolution du tassement du sol est présentée et discutée.

Abstract

The objective of this work is to study the effect of desiccation cracks on the thermo-hydro-mechanical behavior of clayey soils.

The study includes an experimental study to characterize the influence of cracks on the drying process of clay samples and a numerical study in order to present the impact of cracks on the soil-atmosphere interaction.

In the first phase of this study, an experimental work performed in the laboratory to characterize the influence of cracks on drying soil was conducted. Drying tests were conducted on samples of intact and cracked soil where the evolution of the water content and cracking due to drying were monitored.

In the second phase of this study, the influence of cracks on the thermo-hydro-mechanical behaviour of clayey soil is presented. A two-dimensional numerical model of soil-atmosphere interaction has been developed considering the presence of cracks.

The model takes into account the thermo - fluid coupling of an unsaturated clay soil. The model is used to simulate the evolution of evaporation during the drying process. It shows the impact of cracks on the suction development and water content evolution as well as the air entry value. This study also proposes a simple approach to the consideration of cracks in the soil-atmosphere interaction.

In the last part of this work, the influence of cracks on the mechanical behavior of fine soils is presented and discussed.

TABLES DES MATIERES

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	7
1.1. Introduction	8
1.1.1. La dessiccation	8
1.1.2. La sécheresse dans le monde.....	10
1.2. Comportement thermo-hydro-mécanique des sols argileux lors de la dessiccation..	12
1.2.1. Aspects hydriques	12
1.2.1.1 Profil de succion dans un sol soumis à la sècheresse	13
1.2.1.2 Courbe de rétention d'eau.....	14
1.2.1.3 Points caractéristiques de la courbe de rétention.....	14
1.2.1.4 Modèles empiriques de la courbe de rétention	15
1.2.1.5 Conductivité hydraulique	17
1.2.2. Comportement mécanique des sols non saturés	19
1.2.3. Comportement thermique des sols non saturés	20
1.3. Echange sol-atmosphère	21
1.3.1. Phénomène d'évaporation	21
1.3.1.1 Généralités	21
1.3.1.2 Phases de l'évaporation	22
1.3.1.3 Modèles de prévision de l'évaporation.....	25
1.4. Interaction sol-atmosphère	31
1.4.1. Bilan d'eau	31
1.4.2. Bilan d'énergie	32
1.4.3. Modèles proposés	32
1.5. Mécanisme de fissuration	38
1.5.1. Initiation des fissures.....	38
1.5.2. Structure et extension des fissures.....	38
1.5.3. Paramètres influençant sur la fissuration	41
1.5.4. Influence de la fissuration sur les propriétés hydrauliques du sol.....	44
1.5.5. Profondeur du front de dessiccation.....	45

1.5.6.	Impact des fissures sur l'évaporation	46
1.5.7.	Modélisation du processus de fissuration.....	48
1.6.	Conclusion	50

CHAPITRE 2: ETUDE EN LABORATOIRE DE L'INFLUENCE DES FISSURES SUR LE PHÉNOMÈNE DE SÉCHAGE..... 51

2.1.	Introduction	52
2.2.	Caractéristiques de l'argile utilisée (la Kaolinite)	52
2.3.	Techniques de contrôle de la succion	54
2.3.1.	Présentation des techniques.....	54
2.3.2.	Méthode de translation d'axes.....	55
2.3.2.1	Description.....	55
2.3.2.2	Appareil triaxial à translation d'axes.....	56
2.3.2.3	Procédure expérimentale	57
2.3.3.	Technique de contrôle par phase vapeur	61
2.3.3.1	Présentation	61
2.3.3.2	Procédure expérimentale	63
2.4.	Essais de séchage.....	64
2.4.1.	Mode opératoire	64
2.4.2.	Résultats obtenus.....	66
2.4.2.1	Retrait des échantillons intacts	67
2.4.2.2	Retrait des échantillons fissurés	68
2.5.	Conclusion	80

CHAPITRE 3: MODÉLISATION NUMÉRIQUE..... 81

3.1.	Introduction	82
3.2.	Modèle numérique.....	82
3.2.1.	Transferts thermo-hydriques	83
3.2.1.1	Transfert hydrique	83
3.2.1.2	Transfert de chaleur	86
3.2.1.3	Relation Humidité Relative – Succion	88
3.2.1.4	Echange sol-atmosphère	88

3.3.	Analyses du phénomène de sécheresse	90
3.3.1.	Massif de sol intact (non fissuré)	90
3.3.1.1	Présentation de l'exemple.....	90
3.3.1.2	Résultats.....	92
3.3.2.	Application à un massif de sol fissuré.....	96
3.3.2.1	Présentation de l'exemple.....	96
3.3.2.2	Influence des fissures.....	100
3.3.2.3	Etude paramétrique.....	109
3.4.	Elaboration d'une nouvelle approche pour le sol fissuré	114
3.4.1.	Présentation	114
3.4.2.	Validation	115
3.4.3.	Taux d'évaporation normalisé.....	122
3.5.	Etude de l'interaction sol-atmosphère en présence d'une structure	124
3.5.1.	Présentation de l'exemple	124
3.5.2.	Résultats des simulations	125
3.5.2.1	Sol intact	125
3.5.2.2	Sol fissuré	126
3.6.	Influence des fissures sur le comportement mécanique	129
3.6.1.	Modèle numérique.....	129
3.6.2.	Application à un sol intact.....	131
3.6.2.1	Présentation de l'exemple.....	131
3.6.2.2	Variation de la succion	132
3.6.2.3	Champs de déplacement	134
3.6.3.	Influence des fissures sur l'évolution du tassement vertical	137
3.6.3.1	Présentation	137
3.6.3.2	Résultats et discussions	139
3.7.	Conclusion	141

CONCLUSION GENERALE.....143

RÉFÉRENCES.....145

ANNEXE 1.....157

LISTES DES FIGURES

Figure 1.1: Dessiccation des sols argileux en période sèche (Source: BRGM)	9
Figure 1.2: Courbe de rétention d'eau d'un sol non saturé en cours de séchage (d'après Vanapalli et al., 1999).....	15
Figure 1.3: Variation de l'indice des vides avec la succion pour le sol de Mormoiron (LMSSMat) (Vincent et al., 2006).....	19
Figure 1.4: Trois phases d'évaporation (Hillel, 1980; d'après Wilson et al., 1994).....	23
Figure 1.5: Trois phases d'évaporation avec les conditions climatiques différentes (Hillel, 2004).....	24
Figure 1.6: Evaporation cumulée pour différentes natures de sols (Hillel, 1975).....	24
Figure 1.7: Relation entre le ratio de l'évaporation actuelle sur l'évaporation réelle et le potentiel matriciel (Aydin, 1998a; modifié par Aydin et al., 2005)	34
Figure 1.8: Changement des taux annuels d'évaporation potentielle E_p , d'évapotranspiration potentielle ET_r et d'évaporation réelle E_a pour les périodes 1994-2003 et 2070-2079 à Adana.....	36
Figure 1.9: Processus de l'initiation des fissures: (a) sol initialement saturé; (b) développement du ménisque à l'interface eau-air entre les particules; (c) forces capillaires 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).....	40
Figure 1.10: Étapes de fissuration d'une argile Saint-Alban intacte (Konrad et Ayad, 1997).	40
Figure 1.11: Evolution de la géométrie des fissures sur la surface de l'échantillon soumis à la dessiccation (Tang et al., 2011).....	41
Figure 1.12: Profil de la teneur en eau en période de la sécheresse (source: BRGM)	45
Figure 1.13: Distribution de la teneur en eau dans une fissure de 100mm de largeur et 550mm de profondeur, (Ritchie et Adams, 1974).....	47
Figure 1.14: Formation de deux fronts de séchage dans le sol après 48 heures de séchage.....	48
Figure 2.1: Courbe granulométrique de la kaolinite.....	53
Figure 2.2: Détermination du poids spécifique des grains (Essais de pycnomètre)	54
Figure 2.3: Schéma représentatif de la méthode de translations d'axes	56
Figure 2.4: Mise en place de l'échantillon et de la pierre poreuse dans la cellule de pression	58
Figure 2.5: (a) Application de la succion dans la cellule de pression, (b) Cellule triaxiale dans laquelle l'échantillon est placé, (c) Equipement utilisé pour l'obtention dans l'essai triaxial	59
Figure 2.6: Appareil triaxial utilisé	60
Figure 2.7: Courbe de rétention obtenue avec la méthode de translations d'axes.....	61
Figure 2.8: Boîte hermétique utilisée dans la technique de contrôle par phase vapeur(Tang et al. 1998)	62
Figure 2.9: Mis en place des boîtes hermétiques à différentes valeurs d'humidité relative contrôlée ..	64
Figure 2.10: (a) Vue en dessus des 2 échantillons intact et fissuré placés dans la boîte à succion imposée, (b) La boîte hermétique utilisée dans la technique à pression de vapeur	66
Figure 2.11: Echantillons du sol avant l'imposition de la succion.....	71
Figure 2.12: Evolution de la déformation dans les échantillons du sol au cours de la dessiccation: (a) après 1 jour, (b) après 2 jours, (c) après 3 jours, (d) après 4 jours, (e) après 7 jours, (f) après 8 jours, (g) après 9 jours, (h) après 21 jours.....	73
Figure 2.13: Variation de la teneur avec la succion (échantillons intacts)	75
Figure 2.14: Variation de la teneur en eau au cours du séchage (échantillons intacts)	75

Figure 2.15: Variation de la teneur en eau des échantillons intacts et fissurés durant les 21 jours d'essais	78
Figure 2.16: Influence des fissures sur la courbe de rétention de l'eau.....	79
Figure 3.1: a) Courbe de la perméabilité ; b) Courbe caractéristique du sol	86
Figure 3.2: a) Coefficient de la chaleur spécifique; b) Conductivité thermique	87
Figure 3.3: Géométrie et conditions aux limites du modèle utilisé (sol intact).....	91
Figure 3.4: Evolution du taux d'évaporation non cumulé (a) et cumulé (b) au cours de la dessiccation	92
Figure 3.5: Variation de la teneur en eau d'un sol intact	94
Figure 3.6: Variation de la succion dans un sol intact.....	94
Figure 3.7 Variation de la succion pour 3 profondeurs différentes	95
Figure 3.8 : Variation de la température dans le massif du sol soumis à la dessiccation	96
Figure 3.9: Géométrie et conditions aux limites du modèle utilisé dans la simulation du sol fissuré... ..	97
Figure 3.10: Etude de la zone influencée par es fissures pour trois profondeurs différentes du sol: 3m (a), 5m (b) et 10m (c).	99
Figure 3.11: Influence des fissures sur le taux d'évaporation non cumulée (a) et cumulé (b) d'une surface intacte et fissurée soumise à la dessiccation	101
Figure 3.12: Influence des fissures sur l'humidité à la surface du sol	101
Figure 3.13: Influence des fissures sur la variation de la teneur en eau dans la section a-a (a) et la section b-b (b).....	104
Figure 3.14: Influence des fissures sur le développement de la succion dans la section a-a (a) et la section b-b (b).....	105
Figure 3.15: Influence des fissures sur la variation de la succion à la surface et à 50 cm de profondeur	106
Figure 3.16: Influence des fissures sur la variation de l'humidité à la surface et à 50 cm de profondeur	106
Figure 3.17 : Développement de la succion dans le sol intact après 5,10, 15, 20, 25 et 30 jours de dessiccation	107
Figure 3.18: Influence de la présence des fissures sur le temps critique d'entrée d'air	108
Figure 3.19: Influence de la profondeur des fissures sur le taux d'évaporation.....	109
Figure 3.20: Influence de la profondeur des fissures sur le taux de succion: a) Succion pour les jours 1, 5 et 15; b) Succion pour les jours 20 et 30; c) Profils de la teneur en eau pour les jours 1,5 et 15; d) Profils de la teneur en eau la succion pour les jours 20 et 30.....	112
Figure 3.21: Influence de la profondeur des fissures sur le temps critique d'entrée d'air: Evolution de la succion à la surface du sol (a), Evolution du degré de saturation à la surface (b).....	113
Figure 3.22: Principe du modèle simplifié équivalent.....	114
Figure 3.23: Validation du modèle simplifié des sols fissurés - Variation de l'évaporation.....	115
Figure 3.24: Validation du modèle simplifié – Variation de la succion : section a-a (a), section b-b (b)	116
Figure 3.25: Validation du modèle simplifié sur les configurations données dans le tableau 3.1,.....	121
Figure 3.26: Variation du taux d'évaporation normalisé.....	122
Figure 3.27: Variation du taux de dessiccation α avec le temps	123
Figure 3.28: Géométrie du modèle utilisé dans l'interaction sol-atmosphère	124
Figure 3.29: Maillage du modèle numérique adopté dans les simulations.....	124
Figure 3.30: Variation de la succion à la surface du sol.....	125

Figure 3.31: Influence des fissures sur la succion induite à la surface par l'interaction sol-: a) après 1, 7, 10 et 15 jours ; b) après 20, 25 et 30 jours	127
Figure 3.32: Influence des fissures sur la succion induite dans le massif du sol après 30 jours: a) Sol intact, b) Sol fissuré.....	128
Figure 3.33: Géométrie du modèle numérique (a) et conditions aux limites (b).....	132
Figure 3.34: Succion déterminée par le modèle d'interaction sol-atmosphère	133
Figure 3.35: Variation du module (H) induite par la variation de la succion	133
Figure 3.36: a) Etat initial: Avant l'imposition de la succion, b) Etat Final: Après l'imposition de la succion.....	135
Figure 3.37: Evolution du tassement à la surface du sol : résultat obtenu par le calcul analytique...	136
Figure 3.38: Evolution du tassement dans la profondeur du sol	136
Figure 3.39: Comparaison entre le modèle analytique et calcul avec FLAC 3D - tassement à la surface du sol	137
Figure 3.40: Succion retenue pour le calcul du tassement dans le sol fissuré.....	138
Figure 3.41: Influence des fissures sur la variation de la succion (a), Influence des fissures sur la variation du module élastique H (b)	139
Figure 3.42: Evolution du tassement à la surface du sol dans le cas intact et fissuré.....	140
Figure 3.43: Evolution du tassement dans le massif du sol.....	140

Introduction Générale

Avec le réchauffement climatique planétaire, la sécheresse est devenue un phénomène de plus en plus préoccupant qui concerne de nombreux pays dans le monde.

D'après le GIEC (Groupement d'Experts Intergouvernemental sur l'Etude du Climat), la concentration de gaz à effet de serre continue d'augmenter dans l'atmosphère, principalement du fait des activités humaines (IPCC-GIEC, 2007): une augmentation de la température moyenne à la surface du globe de 0,76°C depuis 1860, dont 0,74°C depuis 1900 et 0,20°C depuis 1990.

D'ici 2100, selon les prévisions des modèles et suivant les différents scénarios possibles quant aux émissions de gaz à effet de serre, la température moyenne de l'air à la surface du globe devrait augmenter de 1,1 à 6,4°C par rapport à 1990.

La sécheresse, un problème mondial

En France, des épisodes de sécheresse sévères sont marquées au cours des 50 dernières années, tels que l'été 1976, les années 1989-1990, l'été 2003, 2005 et 2011.

Ce phénomène naturel est la cause de dommages très importants et concerne chaque année des milliers de constructions. Le montant total des remboursements effectués à ce titre depuis 1989 était évalué par la Caisse Centrale de Réassurance en juin 2010 à environ 4,5 milliards d'euros, ce qui correspond à plusieurs centaines de milliers de maisons sinistrées sur l'ensemble de la France plaçant la sécheresse en deuxième position parmi les sinistres les plus coûteux en France, derrière l'inondation (BRGM, 2011).

La France n'est évidemment pas le seul pays touché. D'autres régions dans le monde (Chine, Etats-Unis, Russie, les pays tropicaux en Afrique ...) ont aussi déclaré l'état d'urgence dans leurs pays en raison de l'aggravation de la sécheresse.

Ce qui est particulièrement préoccupant est que la sécheresse s'accélère et s'intensifie d'année en année à cause du réchauffement climatique (Cojean et al., 2009; Soubeyroux et al., 2008). Les écologistes sont certains de connaître encore des sécheresses qui pourraient même être pires à l'avenir (selon la Newsletter 'Actualités News environnement', 02/03/2009).

Selon Météo France, des sécheresses inhabituelles (plus graves et plus longues) apparaitront dès le milieu du siècle (2050). Les effets les plus nettement aggravés (par rapport à aujourd'hui et par rapport au déficit pluviométrique) porteront sur les sols superficiels (Projet ClimSec, 2011).

Dans le domaine du génie civil, l'effet de la sécheresse se traduit notamment par l'apparition de désordres au niveau des constructions reposant sur des sols argileux.

Les analyses des désordres constatés ont montré que, dans la plupart des cas, les sinistres sont liés au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux (MEEDDM/DGPR, 2007). De plus, la végétation, quand elle est présente à la proximité d'une construction, représente un facteur de sinistre aggravant pour la construction concernée.

En effet, la zone sous le bâtiment étant protégée conserve un équilibre hydrique sensiblement constant. Par contre, sa périphérie est directement exposée à l'évaporation. Le déséquilibre ainsi créé entre les deux endroits est à l'origine des tassements différentiels susceptibles de générer des dommages importants dans les constructions. Les dommages sont généralement caractérisés par l'apparition de fissures sur les façades, souvent obliques et passantes par les points de faiblesse que constituent les ouvertures, décollement, fissuration de dallages et de cloisons (www.argiles.fr).

Les constructions les plus touchées par les effets de la sécheresse sont les maisons individuelles notamment en raison de leur faible rigidité et de leurs fondations superficielles.

A l'échelle nationale, la France est particulièrement concernée par le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux. Plusieurs centaines de milliers d'habitations ont été touchées; plus de 8000 communes françaises touchées pour le seul été 2003 pour un coût total d'environ un milliard d'euros (Vincent et al. (2007, 2008)).

Face à cet enjeu économique et social important, de nombreuses études ont été menées sur le phénomène de la sécheresse. On cite notamment les actions en France par le MEEDDAT (Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT, 2008)(voir Cojean, 2008); la recherche dans le cadre du Programme RGCU (Réseau Génie Civil et Urbain): Retrait-gonflement des Argiles-RGA; le projet ARGIC (Analyse du Retrait-Gonflement et de ses Incidences sur les Constructions); la recherche dans le cadre du Projet Fondation MAIF: Impact du changement climatique en France sur la sécheresse

et l'eau du sol (MAIF, 2000)... L'objectif de ces projets est de modéliser les interactions sol-structure, d'examiner la pathologie des dommages consécutifs à l'aléa sur des constructions individuelles, identifier les techniques les plus adaptées de réparation des désordres et de caractériser les moyens de prévention de ce risque pour les constructions neuves et pour les bâtis existants.

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 lorsque soumis à des succions élevées (Hillel, 1998; Boivin et al., 2006). 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 du 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 du 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).

Dans un autre contexte, les fissures de dessiccation affectent les barrières argileuses mises en place pour l'isolation des déchets nucléaires. La perméabilité peut s'accroître dramatiquement; ce qui peut faire perdre à la barrière sa fonction protectrice.

La dessiccation est aussi la cause d'une dégradation irréversible des propriétés des sols agricoles. Les fissures de dessiccation engendrées par le retrait sont encore susceptibles d'occasionner un accroissement de l'oxydation des sulfures en favorisant un apport d'eau et d'air.

La fissuration des sols 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 les 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 tels 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), Rodríguez et al., 2007; Tang, 2009; Tang et al., (2008, 2010, 2011)).

Par contre, l'influence de la fissuration sur l'échange sol-atmosphère et son impact sur l'évaporation sont également peu étudiés. Peu de travaux expérimentaux ont été consacrés à l'étude de l'effet des fissures sur l'évaporation (Ritchie et Adams, 1974; Selim et Kirkham, 1970; Zornberg et al., 2007; Ta et al., 2009).

Du point de vue modélisation, on ne trouve dans la littérature que quelques études numériques réalisées 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.

Objectif de ce travail

Cette étude a pour but d'offrir une meilleure compréhension du mécanisme de la fissuration, et de proposer une modélisation du processus, dans le but de prédire l'impact des fissures sur l'échange sol-atmosphère. La thèse inclut une étude numérique pour l'analyse de la fissuration ainsi qu'une étude expérimentale menée sur des échantillons du sol argileux avec et sans fissures.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique: Dans un premier temps, nous présentons les effets de la sécheresse sur les constructions et l'étendue de ce phénomène inquiétant. Une description du phénomène du retrait-gonflement et celui de la fissuration des sols argileux seront ensuite présentés. Une deuxième partie est consacrée aux développements numériques réalisés ainsi que les études expérimentales. Cette partie permet de synthétiser les connaissances concernant les sols non saturés et leur comportement hydromécanique.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude expérimentale du comportement des sols argileux fissurés. Ce travail expérimental a été réalisé au laboratoire de génie civil à l'université «Ashikaga Institute of Technology» au Japon. Des essais de séchage ont été menés sur des échantillons argileux de type kaolinite pour étudier l'effet des fissures sur le processus du séchage des sols fins. Les résultats des essais de dessiccation sur des échantillons du sol intacts et fissurés soumis à des différentes valeurs de succions imposées sont présentés. L'interprétation des résultats obtenus permet de déterminer l'influence de la fissuration sur les propriétés de rétention de l'eau pour les sols fins.

Le troisième chapitre concerne le développement numérique réalisé afin de montrer l'effet des fissures sur le comportement des sols argileux en période de sécheresse. Ce chapitre est divisé en 4 parties :

La première partie présente le modèle numérique de l'interaction sol - atmosphère qui prend en compte le couplage thermo - hydrique d'un milieu argileux non saturé soumis à sa surface à un épisode de sécheresse. Ce modèle a été implanté dans un code de calcul aux éléments finis afin de calculer les profils de succion et de teneur en eau induits par l'échange sol-atmosphère. Dans un premier temps, le code de calcul 'ESNA' développé dans notre laboratoire depuis 2009 est présenté. Ensuite, nous analysons l'effet de la présence des fissures sur le comportement hydrique des sols fins. Cette analyse est menée via une série de simulations numériques sur un sol argileux avec et sans prise en compte des fissures.

Dans la deuxième partie, une nouvelle approche simplifiée permettant la prise en compte de la fissuration dans l'échange sol-atmosphère est proposée. La validation de cette approche

homogénéisée est ensuite présentée. Une étude paramétrique est effectuée pour tester l'efficacité de cette approche simplifiée.

Dans la troisième partie, nous nous intéressons à l'interaction sol-structure sous l'effet de la succion induite par l'échange atmosphérique. L'étude est réalisée pour des sols intacts et fissurés ce qui permet de cerner l'effet de fissuration.

La dernière partie de ce chapitre montre une application sur un modèle mécanique sur le logiciel en différences finies Flac3D tout en intégrant le couplage hydro-thermique. Ce modèle permet d'étudier le tassement de la couche de sol sous l'effet induit par la succion. L'impact de la fissuration est également étudié.

Le rapport est achevé par une conclusion générale qui rassemble les principaux résultats issus de cette recherche ainsi que les perspectives ouvertes par ce travail.

Chapitre 1 : Analyse Bibliographique

1.1. Introduction

Le réchauffement climatique est annoncé par le GIEC (Groupement d'Experts Intergouvernemental sur l'Etude du Climat) comme une quasi-certitude, avec des impacts importants sur la sécheresse. La concentration de gaz à effet de serre continue d'augmenter dans l'atmosphère, principalement du fait des activités humaines (IPCC-GIEC, 2007). Pour la période 1995-2006, on a recensé onze des douze années les plus chaudes depuis 1850. Par ailleurs, on a noté une augmentation de la température moyenne à la surface du globe de 0,76°C depuis 1860, dont 0,74°C depuis 1900 et 0,20°C depuis 1990. D'ici 2100, selon les prévisions climatiques et suivant les différents scénarios possibles à propos des émissions de gaz à effet de serre, la température moyenne de l'air à la surface du globe pourrait d'augmenter de 1,1 à 6,4°C par rapport à 1990 (IPCC-GIEC, 2001).

L'impact de ce constat sur le bilan radiatif de la Terre devient très inquiétant. Avec le changement du climat, nous connaissons de plus en plus de sécheresses dans la planète (Blight, 1997 ; Biddle, 1983). Ce qui est particulièrement préoccupant est que la sécheresse s'accélère et s'intensifie au cours des années à cause du réchauffement climatique (Cojean et al., 2009; Vidal et Soubeyroux, 2008).

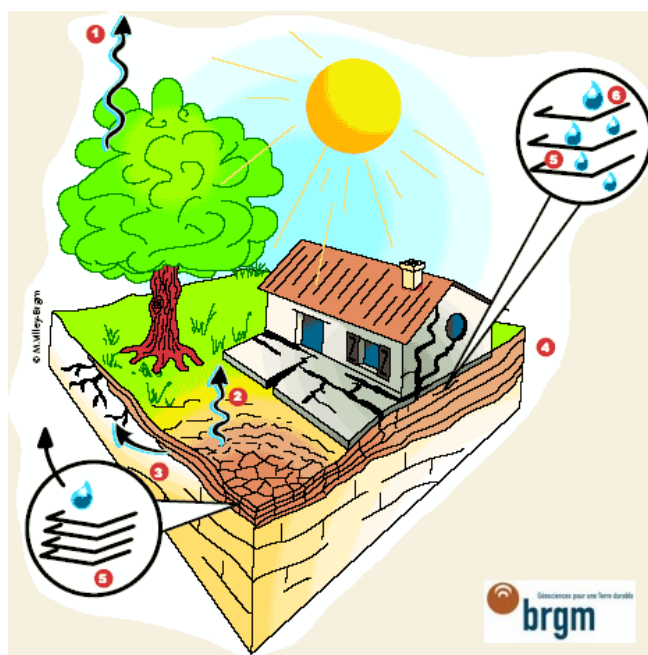
1.1.1 La dessiccation

La dessiccation est définie comme le processus de perte d'eau d'un sol en assèchement ou exposé à un environnement chaud (Péron et al., 2006b). Durant la dessiccation, cette perte en eau du sol provient essentiellement de l'évaporation. Les sols à granulométrie fine présentent des variations de volume parfois importantes lorsque leur teneur en eau varie en réponse aux conditions climatiques et à l'action de la végétation. Lors de périodes de sécheresse prolongée, la dessiccation provoque une réorganisation des constituants de ces sols; La réduction de la taille des pores et la diminution du nombre de pores, accompagnant la dessiccation, entraînent une diminution de volume liée à celle de la teneur en eau (Blight, 1997). Il en résulte alors un retrait du sol, qui se manifeste verticalement par un tassement et horizontalement par l'ouverture de fissures (Novak, 1999 ; Oleszczuk et Brandyk, 2008).

Les propriétés du sol et les conditions environnantes sont les facteurs importants contrôlant le phénomène de retrait des sols. Les phénomènes de capillarité, et surtout de la succion, provoquée par une baisse de la teneur en eau sont à l'origine du comportement au retrait et à la fissuration des sols en phase d'assèchement (Delage et Cui, 2000; Mbonimpa et al., 2006a).

En Europe, de graves sécheresses sont survenues au cours des dernières décennies. Ce phénomène naturel est à l'origine de dommages très importants et concerne chaque année des milliers de constructions (Commission européenne, 2007).

L'inspection des désordres constatés ont montré que les sinistres sont principalement liés au phénomène de retrait-gonflement des argiles (Arbizzi et al., 2008, Ducreux et Marand, 2008). Les désordres aux constructions pendant une sécheresse intense sont dus aux tassements différentiels du sol de fondation, pouvant atteindre plusieurs centimètres. En effet, la zone sous le bâtiment étant protégée conserve un équilibre hydrique sensiblement constant, contrairement à la zone autour du bâtiment qui est soumise à l'effet direct du climat et de la végétation. Le déséquilibre hydrique crée entre les deux endroits est à l'origine d'un tassement différentiel pouvant entraîner la fissuration, voire l'endommagement de la structure (Figure 1.1). Le problème est d'autant plus critique que le mouvement du sol est non uniforme. La végétation constitue un facteur de sinistre aggravant pour les constructions concernées.



Retrait-Gonflement

- 1- Evapotranspiration
- 2- Evaporation
- 3- Absorption par les racines
- 4- Couches argileuses
- 5- Feuillettes argileux
- 6- Eau interstitielle

Figure 1.1: Dessiccation des sols argileux en période sèche (Source: BRGM)

1.1.2 La sécheresse dans le monde

La France est particulièrement concernée par le risque d'augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur et des sécheresses (Caballero et al., 2007; Moisselin et al., (2002, 2006)). Des épisodes de sécheresse sévères sont marqués au cours des 50 dernières années, tels que l'été 1976, les années 1989-1990, l'été 2003, 2005 et 2011. Ces périodes de déficit hydrique ont mis en évidence la vulnérabilité des constructions sur certains sols argileux en période de sécheresse prolongée, suite au phénomène de retrait et de gonflement des sols. Plusieurs centaines de milliers d'habitations ont été touchées; plus de 8000 communes françaises touchées durant l'été 2003 pour un coût d'environ un milliard d'euros (voir www.argiles.fr), conduisant plus d'une commune française sur cinq à introduire une demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle.

D'après Météo-France, l'état hydrique des sols en juin 2011 révèle une sécheresse plus précoce et plus répandue qu'en 2003.

Ce phénomène génère des coûts de réparation très variables d'un sinistre à un autre, mais souvent très lourds. Selon le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), le retrait-gonflement des sols argileux concerne la France entière. Le montant moyen d'indemnisation d'un sinistre dû au phénomène de retrait / gonflement des argiles a été estimé à plus de 10 000 € par maison (MEEDDM/DGPR, 2007).

Les indemnisations apportées dans le seul cadre du régime des catastrophes naturelles ont été évaluées par la Caisse Centrale de Réassurance à 4,3 milliards d'euros en 2006, à environ 4,5 milliards d'euros en juin 2010 plaçant la sécheresse en deuxième position des causes d'indemnisation, derrière les inondations (Vincent et al., 2008; Communiqué de presse BRGM, 2011).

La France n'est évidemment pas le seul pays touché. En effet, dans les pays tropicaux en Afrique et aux Etats-Unis, la sécheresse est la plus coûteuse parmi les catastrophes naturelles (www.universcience.fr, 09/10/2003). Plus de la moitié des USA se trouve touchée par la sécheresse (www.actu-Environnement.com, 30 juillet 2012). Le dégât annuel causé par la sécheresse est estimé à 6-8 milliards de dollars aux Etats-Unis (Lautenbacher, 2005) avec une année particulièrement marquée de 1988 avec un coût de 39,4 milliards de dollars (Hayes et al., 2004).

Selon "U.S Drought Monitor", l'agence nationale de surveillance de la sécheresse au Texas, l'année 2011 a été la période la plus sèche depuis 44 ans dans le pays, et 94% du sol de cet état sont considérées comme "sévèrement sèches" à "exceptionnellement sèches" (www.lexpress.fr/actualite, publié le 07/06/2011).

Selon le journal "chinadaily" publié le 28 février 2013 (www.chinadaily.com.cn), la Chine est confrontée aujourd'hui à sa quatrième année consécutive de sécheresse et la sécheresse actuelle a touché 5,11 millions de terres cultivées.

Depuis le 15 mai 2011, le niveau d'eau du réservoir du barrage des Trois Gorges en Chine, le plus grand barrage du monde, est tombé à 154,8 mètres, en dessous de 156 mètres (notre-planete.info, 19 mai 2011). Dès 2009, la Chine a déclaré l'état d'urgence pour la sécheresse la plus importante depuis 50 ans dans le pays. La même déclaration a été prononcée en Angleterre (selon le "Figaro" du 15 octobre 2007) pour la pire sécheresse de 2007 depuis un siècle. Près d'un tiers des 108 communes du Chili se trouvent en état d'urgence en raison de la sécheresse et dix d'entre elles dans le nord du pays ont été déclarées "zones de catastrophe". ("Figaro" du 8 août 2012).

Le réchauffement mondial de la planète affecte aussi profondément les pays du Moyen-Orient. Ces pays connaissent des vagues de chaleur et des périodes de sécheresse de plus en plus longues. A titre d'exemple, au Liban, cela fait plusieurs années que la saison sèche commence plus tôt et dure plus longtemps.

Impact de la sécheresse sur les constructions

Les constructions les plus touchées par les effets de la sécheresse sont les maisons individuelles notamment en raison de leur faible rigidité et de leurs fondations superficielles. Les dommages sont généralement caractérisés par l'apparition de fissures sur les façades, d'orientations diverses et souvent concentrées dans les angles et traversant les portes et fenêtres (www.argiles.fr).

Les désordres se manifestent aussi par des décollements entre les éléments jointifs (garages, perrons, terrasses), fissuration de dallages et de cloisons, ainsi que par une distorsion des portes et fenêtres, une dislocation des dallages et des cloisons et, parfois, la rupture de tuyauteries et de canalisations enterrées.

Les désordres peuvent se manifester aussi sur les aménagements extérieurs tels que le décollement et l'affaissement des terrasses, des trottoirs et des escaliers extérieurs ainsi que la fissuration des dalles, du carrelage des terrasses et des trottoirs extérieurs.

1.2. Comportement thermo-hydro-mécanique des sols argileux lors de la dessiccation

L'évaporation entraîne les variations de différents paramètres dans le sol tels que la teneur en eau, la succion et la température. Ces variations provoquent par la suite des modifications notables des propriétés thermo-hydro-mécaniques du sol. Dans ce contexte, il est nécessaire d'étudier les principaux paramètres influençant le taux d'évaporation. Pour l'air, ils sont le rayonnement solaire, l'humidité et la vitesse du vent. Pour le sol, ce sont la succion et la teneur en eau.

1.2.1 Aspects hydriques

Le comportement hydrique dans un sol non saturé est engendré par l'accroissement de la succion matricielle; il est étroitement lié à la rétention d'eau et à la conductivité hydraulique. En effet, le coefficient de perméabilité dépend fortement de la saturation, qui varie considérablement avec la succion.

Pour décrire le transfert hydraulique des sols argileux non saturés, il est donc nécessaire de déterminer la variation de la perméabilité des sols en fonction de leur état hydrique (succion, degré de saturation ou teneur en eau).

1.2.1.1 Profil de succion dans un sol soumis à la sécheresse

La succion est une mesure de l'attraction entre le sol et l'eau. Elle est définie comme la différence entre la pression atmosphérique et la pression négative de l'eau (ou pression d'eau interstitielle), dans un échantillon de sol (Delage et Cui, 2000):

$$\Psi = -u = u_a - u_w \text{ (kPa ou L)} \quad [1.1]$$

Pour amener, à altitude constante, de l'eau libre de l'infini jusqu'au sol non saturé, il faut fournir une énergie pour résister à l'attraction exercée. Ce potentiel exprime l'énergie nécessaire pour extraire l'eau du sol.

On distingue deux composantes dans la succion: la succion matricielle et la succion osmotique.

La somme des deux est appelée la succion totale s ou Ψ .

La loi de Kelvin [1.2] permet d'exprimer quantitativement la succion totale, reliée à l'humidité relative :

$$\Psi = \left(\frac{RT}{gW_v} \right) \ln H_r \quad [1.2]$$

Ψ : succion (kPa)

R : constante de gaz parfaits ($R=8,3143 \text{ J/mol}^\circ\text{K}$)

T : température absolue (K)

g : Accélération due à la pesanteur ($g= 9,81 \text{ m/s}^2$)

W_v : Masse molaire de l'eau ($W_v =18,016 \text{ g/mol}$)

T : Température absolue (degrés Kelvin, K).

H_r : Humidité relative

Cette relation montre que la température affecte le comportement des sols non saturés. On remarque que la relation entre l'humidité ambiante et la succion correspondante est indépendante du sol.

Le profil de succion dans un sol dépend des conditions climatiques, des conditions de surface, de la profondeur de la nappe et des caractéristiques du sol telles que la perméabilité du sol et sa capacité de rétention (Fredlund et Rahardjo, 1993). La succion d'un sol varie dans une gamme très large: de 0 pour un sol saturé à 10^6 kPa pour un sol fin considéré comme sec.

1.2.1.2 Courbe de rétention d'eau

La rétention d'eau dans un sol réfère à la relation entre la quantité d'eau dans le sol et l'énergie par laquelle elle est tenue. Pour un sol donné, des variations du degré de saturation vont entraîner des variations de succion. La courbe de rétention d'eau (CRE), ou courbe caractéristique sol – eau (Soil Water Characteristic Curve 'SWCC') représente la relation entre la teneur en eau ou le degré de saturation S_r et la succion ψ . Cette relation est fondamentale pour la résolution des équations d'écoulement en milieu non saturé (Fredlund et al., 1994; Chertkov, 2004) et pour la description du comportement des sols non saturés.

1.2.1.3 Points caractéristiques de la courbe de rétention

La figure 1.2 montre une courbe typique pour un sol en cours de séchage. Deux paramètres sont d'un intérêt particulier sur cette courbe :

- a) La valeur d'entrée d'air («Air Entry Value», *AEV*): Elle correspond à la succion qui se développe dans le sol lorsque le matériau entame sa phase de désaturation. Si l'on impose une succion inférieure à celle-ci, on observe qu'il n'y a presque pas d'eau qui sort du sol. Il n'y a pas d'air qui pénètre dans le sol avant que la succion, n'atteigne la succion critique. Dès que la succion dépasse cette valeur critique, la saturation diminue.
Sa valeur peut être déterminée soit par la succion correspondant à un degré de saturation (S_r) de 90% ou 95% (ψ_{90} ou ψ_{95}), degré au-delà duquel le matériau est considéré quasi saturé, soit par la méthode des tangentes (Brooks et Corey, 1964; Fredlund et Xing, 1994). Cette valeur critique est liée à la taille maximale des pores d'un sol, car ce sont les plus grands pores qui drainent d'abord l'eau.

- b) Succion à la saturation résiduelle (ψ_r): C'est la succion à laquelle toute variation n'entraîne plus de variation importante de teneur en eau. La teneur en eau correspondante "teneur en eau résiduelle θ_r " est un paramètre clé pour la compréhension du mécanisme de dessiccation.

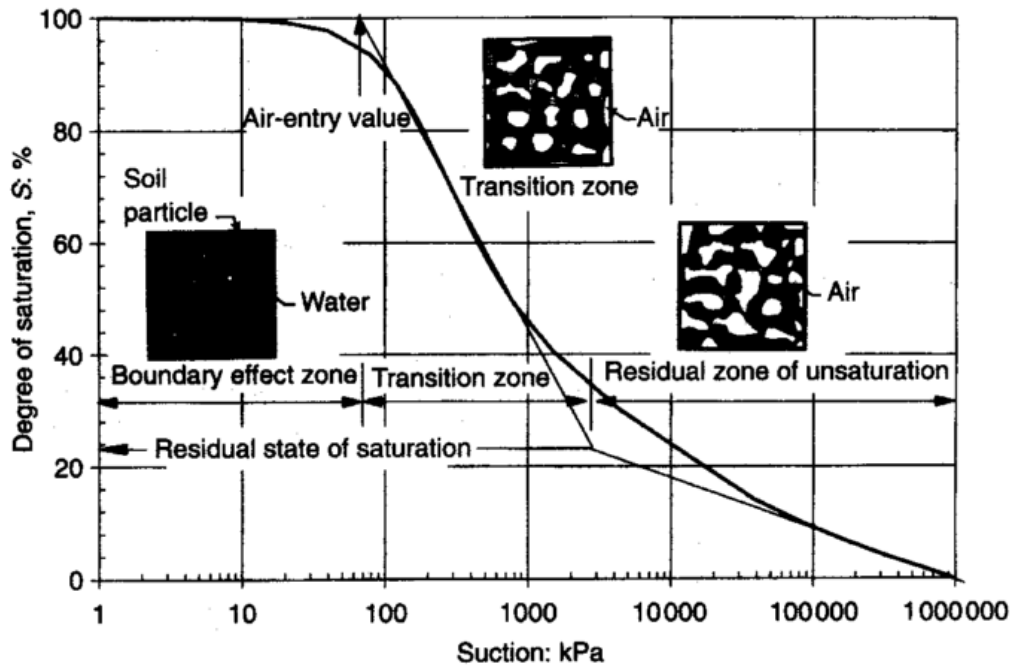


Figure 1.2: Courbe de rétention d'eau d'un sol non saturé en cours de séchage (d'après Vanapalli et al., 1999)

1.2.1.4 Modèles empiriques de la courbe de rétention

La courbe de rétention d'eau varie selon les types de sols. Plus le sol est fin, plus la pression d'entrée d'air est grande et plus les variations de succion sont importantes. Pour une argile, la succion peut atteindre des valeurs très importantes et sa teneur en eau résiduelle est souvent plus grande que celle d'un sable. Diverses formulations ont été proposées pour décrire la courbe de rétention d'eau (Tableau 1.1). Parmi ces modèles, les plus utilisées sont ceux de Gardner (1958), Brooks et Corey (1964), Van Genuchten (1980), et Fredlund et Xing (1994).

Tableau 1.1 Modèles de courbes de rétention d'eau

Auteurs	Equations	Paramètres
Brooks –Corey (1964)	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\Psi_a}{\Psi}\right)^{\lambda_{BC}} \quad \text{si } \Psi > \Psi_a$ $\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = 1 \quad \text{si } \Psi < \Psi_a$	Ψ_a succion d'entrée d'air λ_{BC} indice de distribution de la taille des pores, varie de 0.70 à 0.15 selon la texture des sols

<p>Van Genuchten , vG(1980)</p>	$\Theta(\Psi) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha_{vG} \Psi)^{n_{vG}}} \right]^{m_{vG}}$	<p>α_{vG} paramètre du sol lié à la hauteur de la frange capillaire</p> <p>n_{vG} , m_{vG} paramètres du modèle vG, liés à la distribution granulométrique</p>
<p>Gardner (1958)</p>	$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{1 + a_G (\Psi)^{n_G}}$	<p>a_G paramètre d'ajustement relié à la pression d'entrée d'air (KPa)</p> <p>n_G paramètre d'ajustement lié à la pente au point d'inflexion de la courbe de rétention de l'eau</p>
<p>Fredlund et Xing (1994)</p>	$\theta = c(\Psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\Psi}{a_f} \right)^{n_f} \right] \right\}^{m_f}}$ $c(\Psi) = 1 - \frac{\ln[1 + (\Psi/\Psi_r)]}{\ln[1 + (\Psi_0/\Psi_r)]}$	<p>n_f paramètre d'ajustement lié à la pente maximale de la courbe</p> <p>m_f paramètre d'ajustement de la courbe relié à la teneur en eau résiduelle et au facteur de correction</p> <p>a_f valeur approximative de la valeur d'entrée d'air</p> <p>Ψ_0 Succion du sol liée à la teneur en eau résiduelle (Kpa) ($\Psi_0 = 10^7$ cm ou 10^6 kPa)</p>
<p>Pham and Fredlund (2008)</p>	$\Theta(\Psi) = \left\{ [\theta_s - S_1 \log(\Psi) - \theta_r] \frac{a}{\Psi^b + a} + w_r \right\} \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\Psi}{\Psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\Psi_r} \right)} \right]$	<p>S_1 pente de la partie de la courbe liée aux faibles succions</p> <p>a, b paramètres d'ajustement de la courbe de rétention</p>
<p>ET : $\Theta(\psi)$ teneur en eau volumique effective, Ψ_a succion d'entrée d'air, ψ_r succion à la teneur en eau résiduelle (KPa), θ_s teneur en eau saturée, θ_r teneur en eau résiduelle</p>		

1.2.1.5 Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique 'k' contrôle les caractéristiques de l'écoulement de l'eau. C'est donc un paramètre important pour le retrait des sols fins. Dans un sol non saturé, le coefficient de perméabilité n'est pas constant, il varie en fonction de la combinaison de l'indice des vides et du degré de saturation ou bien de la teneur en eau (Fredlund et Rahardjo, 1993).

Physiquement, au fur et à mesure que le sol se déshydrate, l'air occupe de plus en plus le volume des pores de sorte que le trajet de l'eau devient de plus en plus étroit et tortueux. Par conséquent, la perméabilité diminue fortement lorsque la saturation diminue. La variation de la succion engendre un changement dans l'état de saturation du sol ou bien dans la teneur du sol plus important que celui produit par la variation de la contrainte normale nette (Fredlund et Rahardjo, 1993). Dès lors, pour l'analyse d'écoulements transitoires dans un sol non saturé, le coefficient de perméabilité est souvent exprimé soit en fonction de la saturation qui est liée à la succion, soit directement en fonction de la succion elle-même. Dans la pratique, la courbe de rétention d'eau est utilisée pour déterminer la conductivité hydraulique non saturée k_u en fonction de la conductivité relative k_r et de la conductivité hydraulique saturée du sol k_{sat} :

$$K_u = K_r * K_{sat} \quad [1.3]$$

Diverses formulations ont été proposées pour décrire les variations de la perméabilité dans les sols à grains fins (Voir Tableau 1.2).

Tableau 1.2: Quelques modèles utilisés pour la conductivité hydraulique d'un sol non saturé

Auteurs	Equations	Paramètres
Brooks and Corey (1964)	$K(\Psi) = K_s \left(\frac{\Psi_a}{\Psi}\right)^{m_{BC}} \text{ si } \Psi \geq \Psi_a$ $K(\Psi) = K_s \text{ si } \Psi \leq \Psi_a$	Ψ_a succion d'entrée d'air m_{BC} constante caractéristique du sol K_s conductivité hydraulique saturée

Auteurs	Equations	Paramètres
Gardner (1958)	$K(\Psi) = K_s \cdot \exp(\alpha_G \Psi)$	α_G constante qui dépend de la nature du sol
Gardner (1970)	$K(\Psi) = \frac{K_s}{(1 + \Psi/\Psi_m)}$	Ψ_m succion matricielle pour laquelle $k = 0.5 K_s$
Van Genuchten (1980) – Mualem (1976)	$K(\Psi) = K_s K_r(\Psi)$ $= K_s \frac{\{1 - (\alpha_{vG} \Psi)^{n_{vG}-1} [1 + (\alpha \Psi)^{n_{vG}}]^{-m_{vG}}\}}{[1 + (\alpha_{vG} \Psi)^{n_{vG}}]^{m_{vG}/2}}$	α_{vG} paramètre du sol lié à la hauteur de la frange capillaire n_{vG}, m_{vG} paramètres du modèle vG, liés à la distribution granulométrique
Fredlund et al, (1994) modifié par Leong E. C, Rahardjo H (1997)	$K_r = \frac{1}{\left[\ln \left(e + \left(\frac{\Psi^n}{a} \right) \right) \right]^{mp}}$	a, n, m, p paramètres de la courbe

Les équations de Gardner (1958) , van Genuchten (1980) et Leong et al., (1997) sont les équations couramment les plus utilisées pour la prédiction de la conductivité hydraulique non-saturée.

1.2.2 Comportement mécanique des sols non saturés

L'influence de la succion sur le comportement mécanique des sols fait l'objet de nombreuses recherches.

La figure 1.3 montre la variation de l'indice des vides en fonction de la succion pour l'argile de Mormoiron en France (Projet Argic-BRGM, 2009). Une grande sensibilité hydrique a été observée puisque l'indice des vides varie dans une large gamme de 1,2 à 0,2 quand la succion augmente de 0 à 1000 MPa.

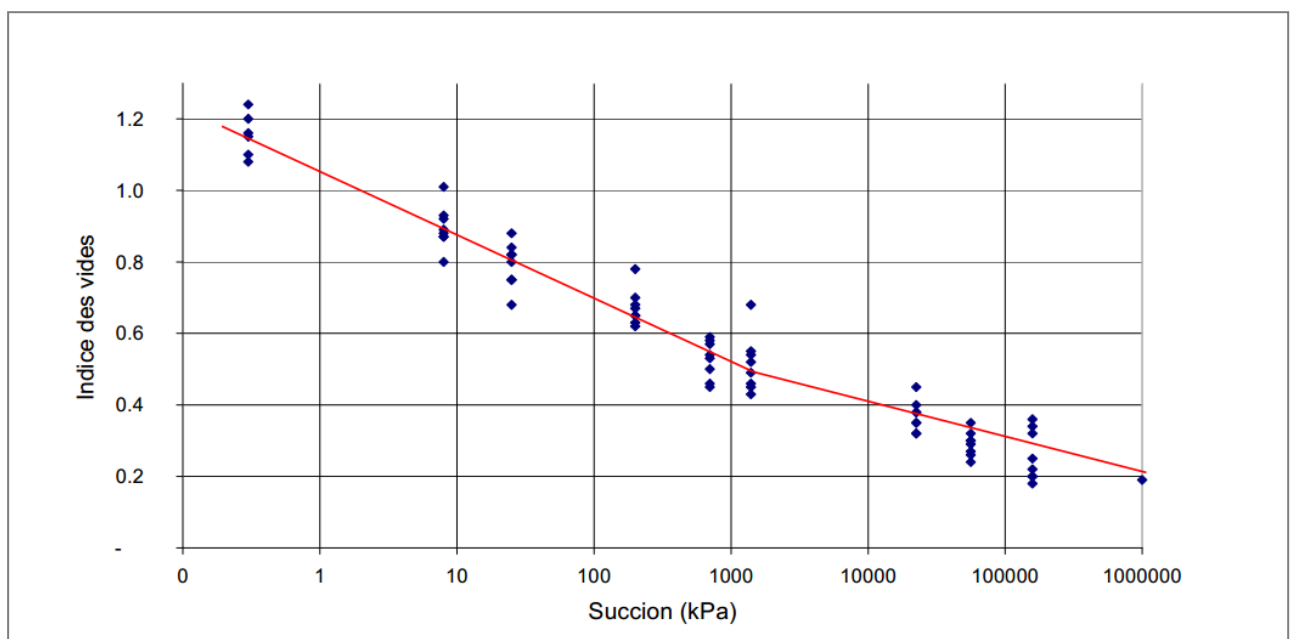


Figure 1.3: Variation de l'indice des vides avec la succion pour le sol de Mormoiron (LMSSMat) (Vincent et al., 2006)

Les résultats des essais à succion contrôlée ont mis en évidence le comportement des sols non saturés (Alonso et al., (1987,1990); Alonso et Olivella, 2006; Fredlund et al., 1993). On cite notamment :

– La compressibilité du sol diminue lorsque la succion augmente: la succion rend le sol plus "rigide" (Alonso et al., 1990). Ces résultats sont aussi confirmés par les essais œdométriques menés le cadre du projet Argic (BRGM, 2009).

– La pression de préconsolidation augmente quand la succion augmente: la succion rend la surface de plasticité plus grande (Alonso et al., 1990)

– Une variation de la succion peut engendrer une déformation volumique irréversible (Alonso et al., 1990).

Les résultats d'essais triaxiaux à succion contrôlée montrent que la résistance au cisaillement augmente avec la succion: La cohésion apparente augmente avec la succion; l'influence de la succion sur l'angle de frottement n'est pas observée clairement.

1.2.3 Comportement thermique des sols non saturés

Le comportement thermique d'un sol se réfère en général à sa conductivité thermique qui est utilisée dans la description du transfert de la chaleur (Blight, 1997; Cui et al., 2005). Le modèle le plus utilisé est celui de De Vries (1963). Abu-Hamdeh et al. (2000) ont montré que la conductivité thermique change avec la texture du sol, la teneur en eau, la concentration en sel, et la quantité de matière organique dans le sol. Les résultats affirment que la conductivité thermique du sol diminue avec l'augmentation de la teneur en sel, ainsi qu'avec l'augmentation de la matière organique.

Selon Campanella et Mitchell (1968), un échantillon du sol soumis à une augmentation de la température sans changement de l'état de contrainte totale, va conduire à un réarrangement des particules solides, dont la conséquence est un tassement de l'échantillon afin de permettre à la structure de sol de supporter la même contrainte. La conductivité thermique est fonction de la teneur en eau et de la succion. Le sol argileux a généralement une conductivité thermique inférieure à celle du sable.

1.3. Echange sol-atmosphère

L'échange sol-atmosphère comprend deux processus, à savoir l'infiltration et l'évaporation.

L'infiltration se produit en phase liquide tandis que l'évaporation se produit en phase vapeur.

Dans les régions exposées à un environnement chaud, l'évaporation est à la base de la dessiccation des sols qui engendre à son tour une diminution de la teneur en eau 'W'. Pour les matériaux à perméabilité relativement faible, comme le sol argileux, l'évaporation peut être considérée comme la cause principale de la perte en eau près de la surface.

1.3.1 Phénomène d'évaporation

1.3.1.1 Généralités

L'évaporation à partir de sols nus ne dépend pas seulement des conditions atmosphériques, mais aussi des propriétés du sol. Trois conditions sont nécessaires pour l'évaporation.

D'abord, une alimentation d'énergie continue; un gradient de pression de vapeur d'eau négatif entre l'air proche de la surface et l'air à la surface du sol et le vent; et une alimentation d'eau continue du sol (Lal et Shukla, 2004; Musy et Higy, 2004).

L'énergie est utilisée pour produire la chaleur latente pour la vaporisation. Cette énergie provient le plus souvent de l'atmosphère sous forme de radiation solaire. Elle est positive dans la journée et nulle dans la nuit.

La deuxième condition pour l'évaporation est le déficit de la pression de vapeur d'eau. La pression de vapeur d'eau dans l'air doit être inférieure à celle de la surface du sol et la vapeur doit être emportée par diffusion ou/et par convection. Si cette condition n'est pas vérifiée, l'évaporation est impossible.

Ces deux conditions sont purement atmosphériques et elles sont influencées par les facteurs météorologiques comme la température et l'humidité de l'air, la vitesse du vent et la radiation.

La troisième condition concerne le sol: une alimentation continue de l'eau au sein du sol à la surface d'évaporation. Cette condition dépend des propriétés hydrauliques du sol en surface telles que la teneur en eau et la succion ainsi que des paramètres liés au transfert d'eau dans le sol comme la conductivité hydraulique.

Ces trois conditions sont indispensables et déterminantes pour l'évaporation. En effet, une forte radiation, un fort gradient de pression de vapeur d'eau et/ou une surface de sol humide engendrent un taux d'évaporation important. C'est le cas sol dans les régions arides et semi arides soumis au phénomène de la sécheresse.

1.3.1.2 Phases de l'évaporation

Deux types d'évaporation sont définis dans la littérature:

- L'évaporation potentielle (PE) qui s'effectue à partir de la surface de l'eau libre.
- L'évaporation actuelle (AE) qui s'effectue à partir de la surface du sol et qui varie avec la teneur en eau.

Afin d'étudier le processus de l'évaporation, Hillel (1980 d'après Wilson et al. 1994) a réalisé une expérimentation sur un sol avec une surface de sol initialement saturé. L'expérience a été répétée quatre fois avec des conditions climatiques différentes: la température, le vent et l'humidité relative. Les résultats typiques sont présentés sur les figures 1.4 et 1.5 montrant la relation entre le rapport AE/PE (taux d'évaporation réel/taux d'évaporation potentiel) et la variation de la teneur en eau à la surface d'un sol sableux. Il a été observé que l'évaporation se déroule en trois phases:

Phase 1: Taux d'évaporation constant: Cette phase correspond à un taux d'évaporation constant et maximal. Le taux d'évaporation réelle dans cette phase est approximativement égal au taux potentiel ou maximal ($AE/PE = 100\%$). Cette phase a lieu quand le sol est saturé ou quasi saturé. Dans l'étude de Penman, c'est une surface d'eau libre avec une quantité d'eau importante. L'évaporation du sol dans cette période est en grande partie déterminée par les conditions climatiques telles que la température de l'air, la radiation, etc. D'autre part, la durée de cette

phase dépend à la fois de la conductivité hydraulique, ainsi que de l'intensité des facteurs météorologiques. En général, la première phase se termine après quelques heures ou quelques jours.

Phase 2: Taux d'évaporation descendant: Cette phase est caractérisée par une chute importante du taux d'évaporation. Le sol n'est plus saturé à la surface et il n'est plus capable de répondre à la demande de l'atmosphère. L'évaporation poursuit; la surface du sol devient plus sèche et le taux d'évaporation tombe finalement à une faible valeur résiduelle. L'évaporation est principalement déterminée par les propriétés hydrauliques du sol. Cette phase peut durer longtemps.

Phase 3: Taux d'évaporation faible: Cette phase est la phase résiduelle avec un taux d'évaporation faible. Cette phase peut être atteinte, en fonction des sols et des conditions climatiques, après une longue durée d'évaporation de quelques semaines voire des mois. Elle commence quand la surface de sol est suffisamment sèche pour que le transfert d'eau en phase liquide cesse. Le transfert se passe principalement en phase vapeur.

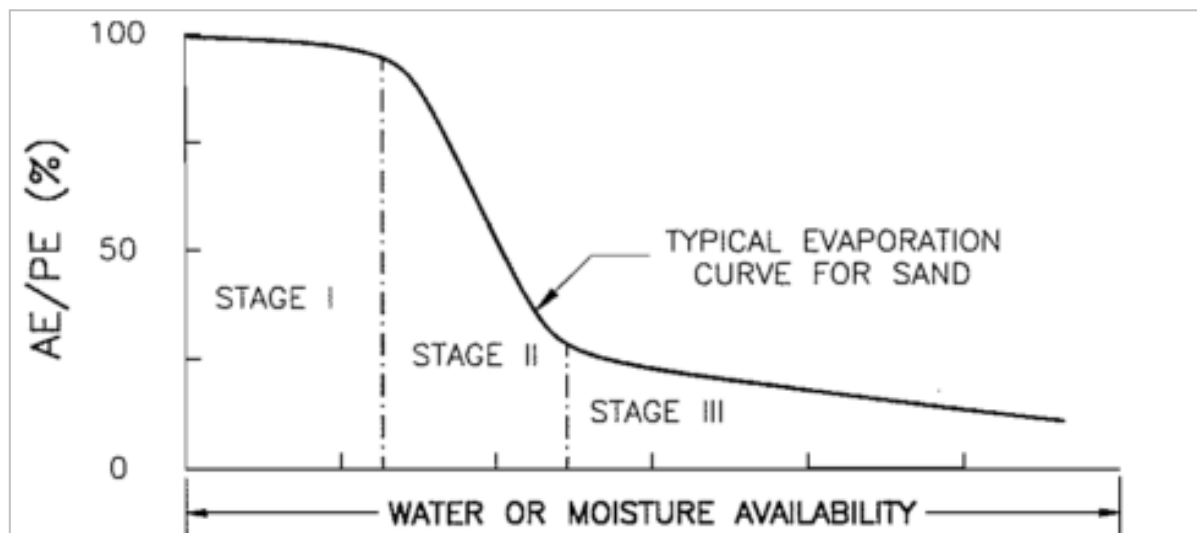


Figure 1.4: Trois phases d'évaporation (Hillel, 1980; d'après Wilson et al., 1994)

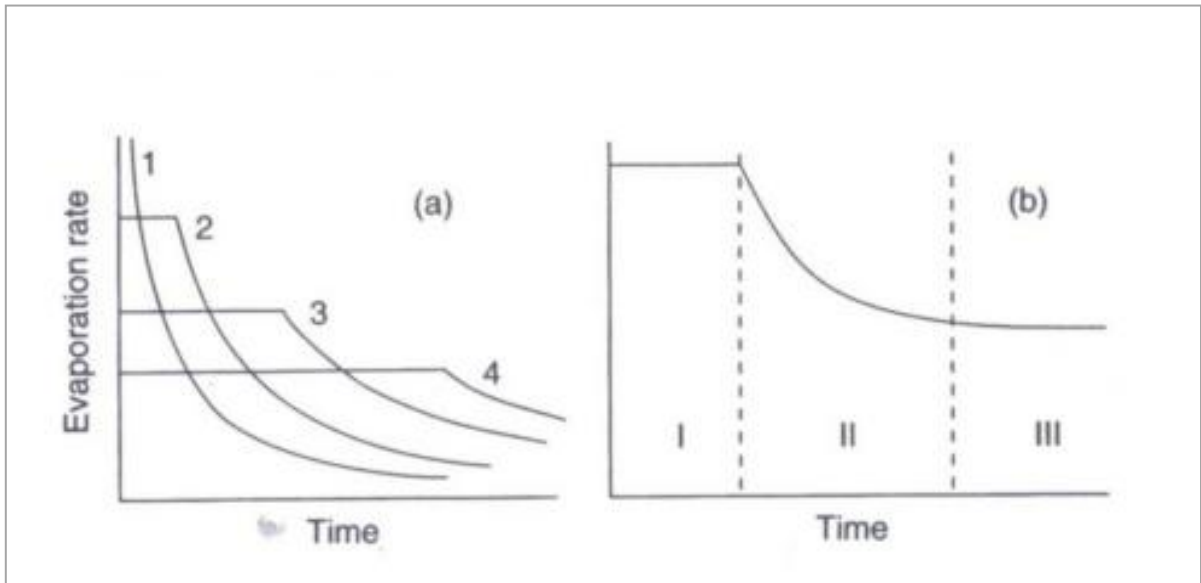


Figure 1.5: Trois phases d'évaporation avec les conditions climatiques différentes (Hillel, 2004)

Des travaux réalisés par Hillel et Van Bavel (1976) et Hillel (2004) sur des sols de textures différentes ont montré que la différence de conductivité hydraulique peut influencer le taux d'évaporation cumulé. Avec le temps, une texture grossière présente moins d'évaporation qu'une texture fine capable de soutenir plus longtemps la première phase (Figure 1.6).

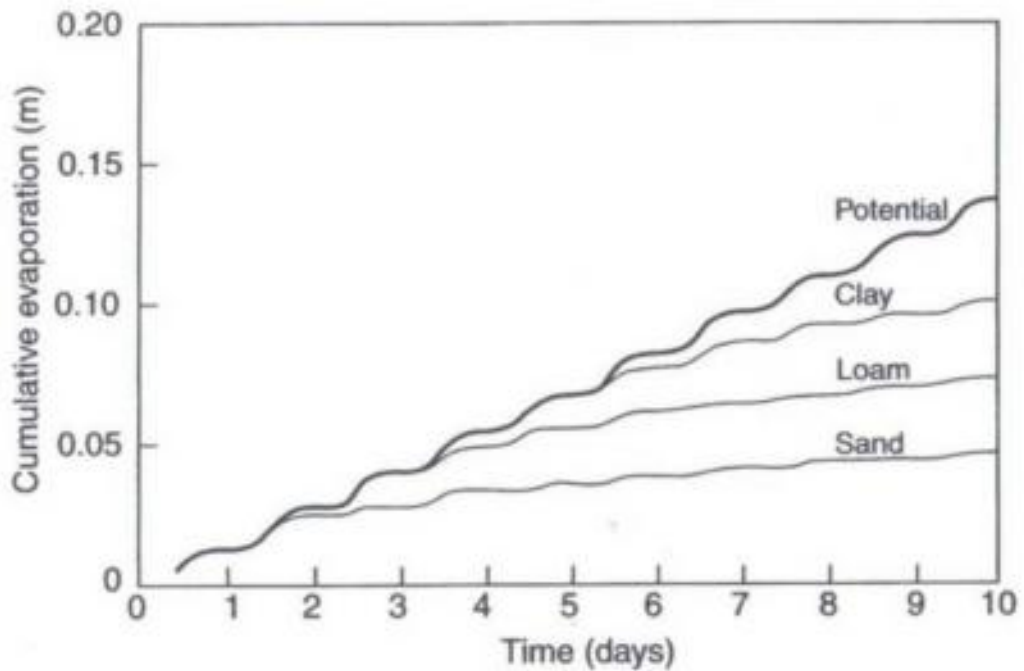


Figure 1.6: Évaporation cumulée pour différentes natures de sols (Hillel, 1975)

1.3.1.3 Modèles de prévision de l'évaporation

Les méthodes d'estimation de l'évaporation peuvent être groupées dans plusieurs catégories incluant notamment les équations du bilan d'énergie, aérodynamiques, combinatoires (dérivées de Penman), empiriques et semi-empiriques.

Méthodes aérodynamiques

Les méthodes aérodynamiques utilisent le concept du mouvement de la vapeur d'eau de la surface évaporante vers l'atmosphère et dérivent de la physique même du phénomène. Ce sont les plus vieilles méthodes pour estimer l'évaporation d'une surface libre et elles restent parmi les plus attractives par leur simplicité.

Ces méthodes utilisent les paramètres de l'air et du sol pour calculer directement le taux d'évaporation qui peut être une valeur moyenne sur une longue période, une semaine ou un mois, ou une valeur instantanée. Les formules proposées sont généralement empiriques ou semi-empiriques. Elles sont basées sur l'équation de Dalton (1802 d'après Penman 1948):

$$E = C (P_{vs} - P_a) \quad [1.4]$$

Le terme C est fonction de la vitesse du vent et peut être écrit sous la forme $1/r_a$ où r_a représente la résistance aérodynamique.

- P_{vs} : la pression de vapeur d'eau saturante à la température de surface
- P_a : la pression de vapeur dans l'air au-dessus de la surface du sol.

Parmi les méthodes qui se trouvent dans la littérature, on cite les formules les plus utilisées:

La formule de Thornthwaite (1954)

L'estimation de l'évaporation mensuelle de Thornthwaite, valable pour le mois m, est donnée par la formule suivante en (mm):

$$AE_m = 16.2 \left(\frac{10 T_m}{\Sigma i} \right)^a \quad [1.5]$$

- AE_m : Evaporation mensuelle (mm)
- T_m : Température mensuelle moyenne (°C)
- i est l'indice thermique annuel donné par :
 $i=(T/5)^{1.5}$ et T : température journalière moyenne (°C)
- $a = 6.75 * 10^{-9} (\Sigma i)^3 - 7.7*10^{-7} (\Sigma i)^2 + 0.08 (\Sigma i) + 0.49$
 a prend la valeur limite de 0,5 pour toutes les températures normales.

Cette méthode s'applique plutôt pour des zones humides et elle n'est pas appropriée pour les zones arides.

Formule de Turc (1954, 1955 d'après Blight 1997)

Cette formule tient compte de la limite d'alimentation d'eau par la prise en compte de la précipitation.

$$E_m = \frac{P_m}{0.9+(P_m/L)^2} \quad [1.6]$$

- E_m : Evaporation mensuelle (mm)
- P_m : Précipitation mensuelle (mm)
- T_m : Température moyenne (°C)

Comme E_m est exprimée en fonction de P_m , la formule n'est plus valide dans la période de sécheresse où la précipitation est nulle mais l'évaporation continue à se produire.

Méthode de Penman (1948)

Les méthodes issues des travaux de Penman (1948) sont aujourd'hui parmi les méthodes les plus utilisées, et la méthode de Penman reste la référence dans ce domaine.

Ces méthodes sont basées sur les principes physiques du bilan d'énergie. Les formules d'évaporation sont définies en combinant l'approche aérodynamique de Dalton et l'approche du bilan d'énergie (d'où leur nom 'approche combinatoire').

Penman (1948) a proposé une approche jugée la plus rationnelle. Sa formulation est basée sur le bilan d'énergie à la surface du sol et sur le transfert de masse :

$$E = \frac{\Delta R_n / L_v + \eta E_a}{\Delta + \eta} \quad [1.7]$$

- $E_a = f(u) (P_{vs} - P_a) = 0,165 (P_{vs} - P_a) \times (0,8 + u_2/100)$ (mm/jour)
- E : taux d'évaporation potentielle (mm/jour)
- Δ : pente de la courbe de la pression de vapeur d'eau saturante en fonction de la température (Pa/°C)
- R_n : radiation solaire nette entrante (W/m² ou J/m²s)
- L_v : chaleur latente pour la vaporisation d'eau (J/kg)
- η : constante psychrométrique (66 Pa/°C)
- u_2 : vitesse du vent à deux mètres du sol (km/jour)
- P_{vs} : pression de vapeur d'eau saturante (mbar)
- P_v : pression de vapeur d'eau réelle (mbar)

Penman - Wilson (1990)

Wilson (1990) a apporté une modification à la formule de Penman (1948) pour le calcul du taux d'évaporation réelle à la surface de sols non saturés: il a utilisé la pression de vapeur d'eau réelle à la surface au lieu de la pression de vapeur d'eau saturante, puisque l'utilisation de la pression de vapeur d'eau saturante à la surface a toujours tendance à surestimer le taux d'évaporation.

$$E = \frac{\Delta R_n / L_v + \eta E_a}{\Delta + \eta A} \quad [1.8]$$

- B : 1 / humidité relative de l'air
- A : 1 / humidité relative de la surface du sol

La méthode de Penman est la plus utilisée pour estimer le taux d'évaporation (Rosenberg et al., 1983, (d'après Wilson 1990)). Sa popularité est due à sa simplicité et pertinence.

Formule de Penman-Monteith (Monteith, 1965)

La formule de Penman - Monteith (Monteith, 1965) fait intervenir explicitement des paramètres liés aux caractéristiques de végétation. Monteith exprime la fonction du vent sous la forme :

$$K = \frac{\rho_a \cdot C_p}{r_a} \quad [1.9]$$

où r_a est la résistance aérodynamique, décrivant la résistance du haut de la végétation et représente les échanges turbulents entre l'air au-dessus de la végétation et l'air présent au sein de la végétation. r_a s'exprime sous la forme:

$$r_a = \frac{\left[\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) \right]}{K^2 u(z)} \quad [1.10]$$

Dans le cas d'une culture sèche, Monteith a introduit le paramètre (r_s) pour prendre en compte la résistance liée au couvert végétal à la diffusion de la vapeur d'eau. L'équation de l'ETP s'écrit alors sous la forme (mm/jour):

$$ETP = E0 = \frac{\Delta R_n + \frac{\rho_a \cdot C_p}{r_a} (e_a - e_d)}{\lambda \rho_w \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right]} \quad [1.11]$$

Cette équation est valable pour une culture sèche qui couvre la surface du sol saturé.

Approche de Ritchie (1972)

Ritchie (1972) a développé une approche qui considère que l'évaporation se développe en deux phases distinctes. Durant la première phase, la résistance de surface est égale à zéro et le taux d'évaporation est proche du taux potentiel. La seconde phase correspond à l'assèchement de la couche superficielle du sol, et le taux d'évaporation diminue progressivement. Cependant, l'approche de Ritchie (1972) n'est pas en mesure de prédire l'évaporation journalière, mais elle est capable de donner estimations sur l'évaporation cumulée du sol sur des périodes importantes (semaines-mois) (Wallace et al., 1999).

La formule de Priestley–Taylor (1972)

L'approche de Priestley et Taylor (1972) consiste à relier le terme aérodynamique dans la formulation de Penman à une fraction du terme énergétique. La formule s'écrit en (mm/jour) :

$$ETP = \frac{\alpha_{pt} \Delta R_n}{\lambda \rho_w (\Delta + \gamma)} \quad [1.12]$$

Où α_{pt} est un paramètre à calibrer selon les conditions locales. La valeur initiale de $\alpha_{pt} = 1.26$ donne de bonnes estimations pour les climats humides et $\alpha_{pt} = 1.74$ fournit les meilleurs résultats pour les climats arides (Shuttleworth, 1993).

Les méthodes basées sur la température

Les méthodes de calcul de l'ETP basées sur la température sont généralement simples et utilisent des coefficients obtenus empiriquement. Ces méthodes sont empiriques et leur utilisation dans un contexte différent (climat, pas de temps) de celui pour lequel elles ont été développées est délicate. Les modèles d'ETP basés sur la température prennent généralement la forme (Xu et Singh, 2001):

$$ETP = c \cdot T_a^\alpha \quad [1.13]$$

$$ETP = c_1 \cdot D \cdot T_a (c_2 - c_3 \cdot RH) \quad [1.14]$$

T_a est la température de l'air; D est la durée moyenne d'insolation; RH est l'humidité relative de l'air; c , c_1 , c_2 , c_3 et α sont des constantes.

Plusieurs équations dans la littérature correspondent à cette catégorie; On cite parmi ces formules celles de Blaney-Criddle, de Hamon et de Romanenko. Ces formules sont présentées rapidement ci-dessous.

La formule de Blaney et Criddle (1950) (Blaney H.F., Criddle W.D., 1950)

La forme habituelle de l'équation de Blaney - Criddle s'écrit en (m/j):

$$ETP = D \left(\frac{0.46T_a + 8.13}{1000} \right) \quad [1.15]$$

Des études ont montré que cette formule conduit généralement à une sous-estimation de l'ETP en région aride et à une surestimation de celle-ci en région humide (Xu et Singh, 2001).

Méthode de Romanenko (1961)

Romanenko a mis au point une formule valable au pas de temps mensuel et basée sur une relation entre l'ETP, la température et l'humidité relative. Cette formule s'écrit en (m/j):

$$ETP = 4.5 \cdot 10^{-3} \left(1 + \frac{T_a}{25} \right)^2 \left(1 - \frac{e_d}{e_a} \right) \quad [1.16]$$

Les méthodes basées sur le rayonnement

Les équations empiriques basées sur le rayonnement sont généralement issues du bilan d'énergie. La plupart des équations prennent les formes (Xu et Singh, 2000):

$$ETP = f(RH, U) \cdot w(T, h) \cdot R_g \quad [1.17]$$

$$ETP = f(RH, U) \cdot w(T, h) \cdot R_n \quad [1.18]$$

- F : fonction de l'humidité relative et de la vitesse du vent
- w : fonction dépendant de la température et de l'altitude
- R_g: rayonnement solaire global
- R_n: rayonnement net

Parmi les formules basées sur le rayonnement et couramment utilisés, on cite celles: de Turc (1955), de Makkink (1957), de Doorenbos et Pruitt (1977) et d'Abtew (1996).

1.4. Interaction sol-atmosphère

L'évaporation directe se produit essentiellement dans une zone de faible épaisseur située immédiatement sous la surface du sol, où l'apport énergétique nécessaire à la vaporisation de l'eau est suffisant. Ce processus d'évaporation dépend d'une part de la demande d'évaporation de l'air et d'autre part de la capacité du sol à satisfaire cette demande.

On voit ainsi une interaction entre le sol et l'atmosphère, qui dépend essentiellement des conditions climatiques et des propriétés du sol. Dans l'étude de l'interaction sol-atmosphère, l'interface sol-atmosphère est l'élément clé qui définit les conditions à la surface de sol en termes de température et de succion. Deux équations sont utilisées pour simuler l'échange sol-atmosphère:

- Une équation qui exprime le bilan d'eau en fonction des précipitations, du ruissellement, de l'évaporation et de l'infiltration.
- Une équation qui exprime le bilan d'énergie à la surface du sol.

1.4.1 Bilan d'eau

Le bilan d'eau pour le sol est la somme algébrique (Blight, 1997):

- Des précipitations (la pluie, la neige, le brouillard etc.) considérées comme une entrée.
- De l'évaporation, de l'interception par le feuillage des arbres et du ruissellement, qui sont considérées comme des pertes.

Ce bilan d'eau peut s'exprimer par l'équation :

$$B = P - (E + I_{int} + R_{off}) \quad [1.19]$$

- B: Bilan d'eau (mm/jour)
- P: Précipitations (mm/jour)
- E: Evaporation (mm/jour)

- I_{int} : Interception (mm/jour)
- R_{off} : Ruissellement (mm/jour)

En cas d'absence d'arbres, on prend $I_{int} = 0$.

1.4.2 Bilan d'énergie

Quand le rayonnement solaire arrive à l'interface sol-atmosphère, il est adsorbé par l'atmosphère, l'eau et le sol. Le bilan énergétique peut être donc représenté par l'équation suivante :

$$R_n = G + H + L_v E \quad [1.20]$$

R_n : Flux de rayonnement net à la surface du sol (W/m^2 ou J/m^2s)

G : Flux de chaleur du sol (W/m^2 ou J/m^2s) qui est la chaleur transmise dans le sol

H : Flux de chaleur sensible dans l'air (W/m^2) qui est l'échange de chaleur entre le sol et l'atmosphère par le processus de convection thermique

$L_v E$: Flux de chaleur latente d'évaporation (W/m^2) qui est l'échange de chaleur entre le sol et l'atmosphère par les processus d'évaporation et de condensation à la surface du sol

L_v : Chaleur latente d'évaporation (j/kg)

E : Flux massique d'eau correspondant à l'évapotranspiration (kg/m^2s)

1.4.3 Modèles proposés

On trouve dans la littérature de nombreux modèles basés sur le bilan énergétique pour la modélisation de l'interface sol-atmosphère. La plupart de ces modèles prennent en compte le couplage entre le transfert d'humidité (l'eau liquide et vapeur) et le transfert de chaleur pour le calcul du flux d'évaporation.

Le modèle le plus couramment utilisé pour estimer l'évaporation de la surface du sol nu est celui développé par (Wilson et al., 1994). Ce modèle est basé sur la formule de "Penman-Wilson, 1990" pour le calcul de l'évaporation en zone non saturée. Le modèle présente un

couplage entre le transfert de chaleur et de masse dans le sol. La loi de Darcy pour le flux d'eau liquide et la loi de Fick pour le flux de la vapeur d'eau dans le sol ont été utilisées. Les résultats des simulations (profils de la teneur en eau et de la température) ont été validés sur des essais de séchage de deux colonnes de sable Beaver Creek de 42 jours. Le modèle numérique ainsi que les résultats expérimentaux confirment les trois phases d'évaporation décrites précédemment par (Hillel, 1980). Les résultats ont montré encore que la première phase est fortement contrôlée par la conductivité hydraulique du sol. Et, que le taux d'évaporation dans la troisième phase de séchage est réduit d'un facteur environ égal à 20 par rapport au taux d'évaporation initial.

Ainsi, la formule de Penman (1948) pour l'évaporation potentielle peut être utilisée pour estimer le taux d'évaporation durant la première phase. Par contre, l'utilisation de cette formule pour les phases 2 et 3 surestime la valeur réelle de l'évaporation.

Les résultats ont montré également que l'utilisation de la pression de vapeur réelle corrige les difficultés liées à l'évaporation en zone non saturée. Cette modification donne une meilleure prédiction du flux d'évaporation et permet de s'approcher de la valeur réelle de l'évaporation.

Aydin et al. (2005) ont utilisé un modèle simplifié (Aydin, 1998a) pour estimer l'évaporation des différents sols sur une base de données climatique quotidienne. Le modèle utilise la succion (Ψ), mesurée à proximité de la surface du sol, comme paramètre pour l'estimation de l'évaporation réelle à partir d'un sol nu (Aydin, 1998). L'évaporation potentielle journalière est d'abord calculée à partir de l'équation de Penman - Monteith avec une résistance à la surface égale à zéro (Aydin et al., 2005). Le modèle suppose que l'évaporation se produise d'abord à partir d'un sol humide avec un taux égal au taux potentiel jusqu'à atteindre une valeur seuil du potentiel matriciel, Ψ_{tp} (cm d'eau), près de la surface du sol. Au-delà de cette valeur seuil, la surface du sol devient progressivement plus sèche et le front du séchage se déplace dans le sol (Figure 1.8). Le taux d'évaporation du sol diminue progressivement jusqu'à entrer en équilibre avec l'atmosphère en dessus, qui est devenu presque de l'air sec. Lorsque la couche supérieure du sol s'assèche jusqu'au maximum ou bien en d'autres termes le potentiel matriciel atteint sa valeur minimale (Ψ_{ad}), l'évaporation devient minime (Figure 1.7). La couche superficielle du sol agit, alors, comme une barrière à l'écoulement de l'eau vers la surface (Hillel, 1980).

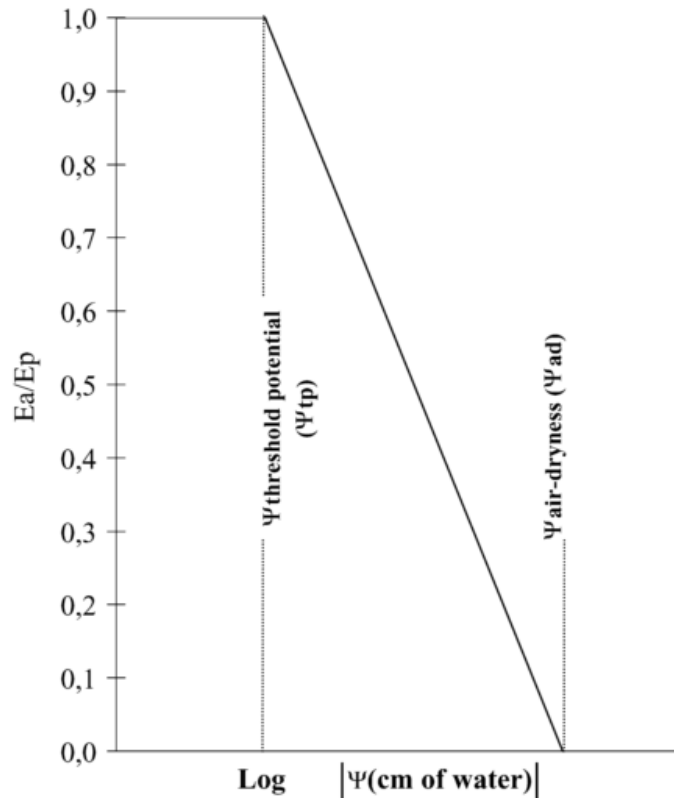


Figure 1.7: Relation entre le ratio de l'évaporation actuelle sur l'évaporation réelle et le potentiel matriciel (Aydin, 1998a; modifié par Aydin et al., 2005)

Le ratio E_a/E_p est calculé à partir de l'expression suivante :

$$E_a = \frac{\log|\Psi| - \log|\Psi_{ad}|}{\log|\Psi_{tp}| - \log|\Psi_{ad}|} E_p \quad [1.21]$$

- E_a, E_p : Taux d'évaporation réels et potentiels (mm/jour) respectivement
- Ψ : Succion à la surface du sol (cm d'eau)
- Ψ_{tp} : Succion matricielle au moment où E_a/E_p commence à descendre en dessous de 1 (cm d'eau)
- Ψ_{ad} : Succion correspondant à l'air sec (cm d'eau). Sa valeur est déterminée par :

$$\Psi_{ad} = \frac{R_g T}{mg} \ln H_r \quad [1.22]$$

- R_g : Constante de gaz
- T : Température absolue (K)

- m : Masse moléculaire de l'eau ($\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$)
- g : Accélération due à la gravité ($981\text{cm}/\text{s}^2$)
- H_r : Humidité relative de l'air

Aydin et al. (2008) ont réalisé un travail pour prédire quantitativement les changements de l'évaporation à partir des sols nus obtenues pour les périodes 1994-2003 et 2070-2079 dans la région méditerranéenne. La région d'étude, Adana, au sud de la Turquie, se caractérise par un climat semi-aride avec des hivers doux et pluvieux et des étés chauds et secs. La température moyenne annuelle est de 18.5°C , les précipitations annuelles moyennes sont de 700 mm, et l'humidité relative moyenne est de 66% (Aydin et Huwe, 1993). Les données du changement climatique pour les périodes 1994-2003 et 2070-2079 ont été obtenues à l'aide d'un modèle climatique régional développé au Japon (Sato et al., 2007).

Une combinaison du modèle déjà présenté (Aydin et al., 2005) avec le modèle de Aydin et Uygur (2006) a été réalisée pour estimer l'évaporation actuelle E_a de sols nus et le potentiel hydrique à la surface du sol avec les paramètres d'entrée suivantes: les paramètres climatiques pour calculer l'évaporation potentielle, la diffusivité moyenne du sol sec et la teneur en eau volumique correspondant à la capacité au champ. Une comparaison entre les résultats à présent et dans le futur montre une augmentation de 8,0% pour l'évaporation potentielle et 7,3% pour l'évapotranspiration potentielle à la surface des sols nus, suite à une augmentation de température prévue de $1,4^\circ\text{C}$ et à un changement des autres facteurs climatiques comme le rayonnement solaire, l'humidité relative et vitesse du vent dans les années 2070 (comme prévu par la MRC Japon) (Figure 1.8). Pour l'évaporation réelle, les résultats montrent une diminution du taux annuel de 50 mm (équivalent à une diminution de 16,5%) pour la période de 2070-2079 par rapport à la période de référence de 1994-2003 en raison d'une baisse de la pluviométrie. Selon MRC, les précipitations annuelles moyennes diminueront d'environ 300 mm (équivalent à une baisse de 46%) par la période de 2070-2079. Dans un climat plus chaud avec moins de précipitations, la demande évaporative de l'atmosphère augmente suite à la diminution de la disponibilité de l'eau; favorisant ainsi la sécheresse du sol (Figure 1.9).

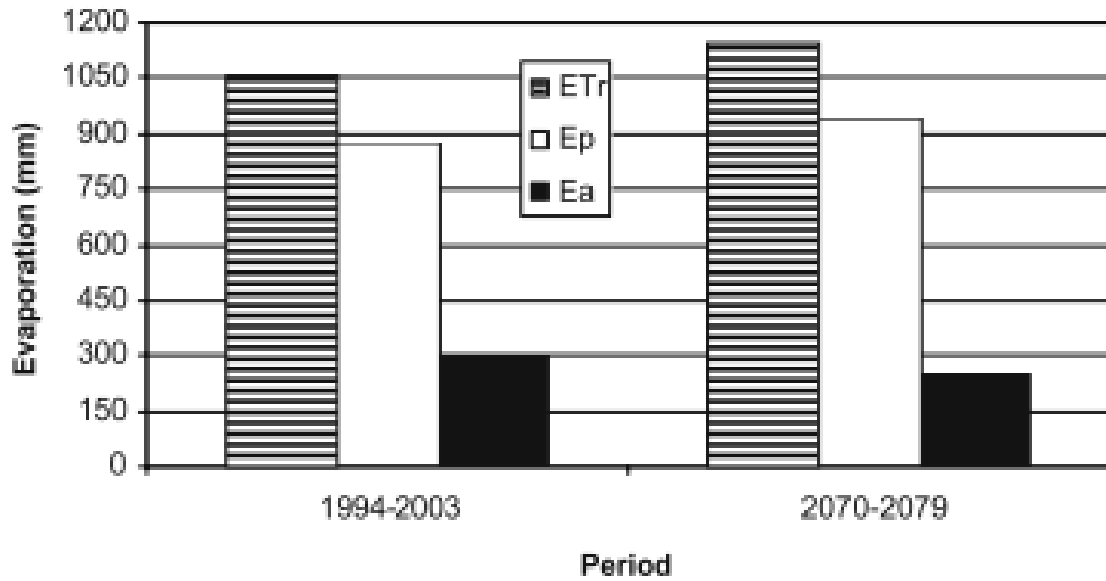


Figure 1.8: Changement des taux annuels d'évaporation potentielle E_p , d'évapotranspiration potentielle ET_p et d'évaporation réelle E_a pour les périodes 1994-2003 et 2070-2079 à Adana

Qui et al. (1998) ont proposé un modèle simplifié basée sur le bilan d'énergie à la surface du sol pour l'estimation de l'évaporation. Le modèle est basé sur la température à la surface du sol sec comme paramètre clé pour la prédiction de l'évaporation en conditions sèches.

L'avantage de cette méthode est qu'elle nécessite peu de paramètres et le calcul des résistances aérodynamique (r_a) et de la surface du sol n'est pas exigé. Le modèle utilise l'hypothèse suivante: En supposant que la température de l'air à une hauteur de référence est la même partout et que r_a du sol exposé au séchage est approximativement égal à r_a du sol sec (Fox, 1968; Ben-Asher et al., 1983), r_a et par suite l'évaporation peuvent être exprimées sous la forme:

$$r_a = \frac{\rho C_p (T_{sd} - T_a)}{R_{nd} - G_d} \quad [1.22]$$

$$LE = R_n - G - (R_{nd} - G_d) \frac{T_s - T_a}{T_{sd} - T_a} \quad [1.23]$$

Les paramètres d'entrée nécessaires sont ainsi la température (T_s , T_a et T_{sd}), le rayonnement net (R_n et R_{nd}) et le flux de chaleur du sol (G et G_d). Avec :

- G : Flux de chaleur du sol ($\text{J.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
- G_d : Flux de chaleur dans le sol sec (K)
- R_n : Rayonnement net entrant ($\text{J.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
- R_{nd} : Rayonnement net du sol sec ($\text{J.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
- T_a : Température de l'air (K)
- T_s : Température de la surface du sol en cours de séchage (K),
- T_{sd} : Température de la surface du sol sec (K)

Les résultats ont montré que la température à la surface du sol sec et la température de l'air sont les paramètres les plus sensibles lors de la prédiction de l'évaporation à partir d'un sol nu. Il en est de même pour le rayonnement solaire. Les résultats montrent encore qu'il est possible de remplacer le flux de chaleur dans le sol par une valeur égale à 10% du rayonnement net dans un sol sec sans provoquer une erreur significative. Cette relation peut être utilisée pour estimer l'évaporation du sol par la méthode proposée si G_d n'est pas disponible.

Bitelli et al. (2008) ont proposé un modèle numérique pour simuler le transfert couplé de la chaleur, du flux d'eau liquide et du flux de la vapeur d'eau dans le sol. Le modèle est utilisé pour déterminer la température du sol, le flux d'énergie sensible, le transfert de chaleur et la teneur en eau ainsi que l'évaporation à la surface du sol sur la base des données météorologiques. Le modèle a montré que le flux de vapeur joue un rôle important dans le transfert de masse et d'énergie et qu'il peut induire des variations importantes dans la teneur en eau près de la surface du sol. Différentes équations de la résistance de la surface du sol ont été utilisées pour le calcul d'évaporation. Les résultats ont montré que ce paramètre est un élément fondamental dans l'interaction sol-atmosphère. Les résultats ont montré encore que le mouvement de l'eau dans le sol est fortement lié aux variations de la température et qu'il est important de considérer le couplage entre le transfert de chaleur, de flux d'eau liquide et de la vapeur d'eau lors de l'évaluation du bilan énergétique dans le sol et pour obtenir une bonne quantification des paramètres de résistance à l'interface sol-atmosphère.

1.5. Mécanisme de fissuration

La sécheresse provoque le phénomène du retrait qui peut aller jusqu'à la fissuration du sol. L'initiation et la propagation des fissures ont une influence importante sur les propriétés des sols durant le séchage (Deng et Shen, 2006). On trouve dans la littérature un nombre importants d'études réalisées sur le phénomène de retrait et de fissuration pour des matériaux argileux. De nombreuses recherches ont été consacrées à l'analyse des mécanismes d'amorçage et de développement des fissures dans les sols.

1.5.1 Initiation des fissures

Une série d'expériences ont été menées sur des échantillons du sol soumis au séchage pour étudier les conditions qui mènent à l'apparition des fissures de 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 Hejleh and 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 la succion. 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 interparticulaires. Des fissures se forment à ce point et se propagent en libérant une partie des contraintes de traction (Figure 1.9).

1.5.2 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 résiduelles, 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 1.10 schématise les différentes phases conduisant à la formation de fissures de dessiccation dans l'argile Saint-Alban intacte. Les mécanismes observés peuvent être décrits par les six principaux événements:

- (a) - Formation des fissures primaires après 17 heures et un espacement moyen de 20 à 24 cm.
- (b) - Augmentation des contraintes de traction au sein de chaque polygone suivi d'un élargissement des fissures ($e = 4\text{mm}$) et propagation des fissures primaires.
- (c) - Formation des fissures secondaires lorsque les contraintes de tension développées atteignent la résistance à la traction du sol.
- (d) - Formation de fissures sub-horizontales à l'intérieur 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).
- (e) - Formation d'un nouvel ensemble de fissures verticales sous de fissures horizontales.
- (f) - Formation de protubérances sous les polygones produits.

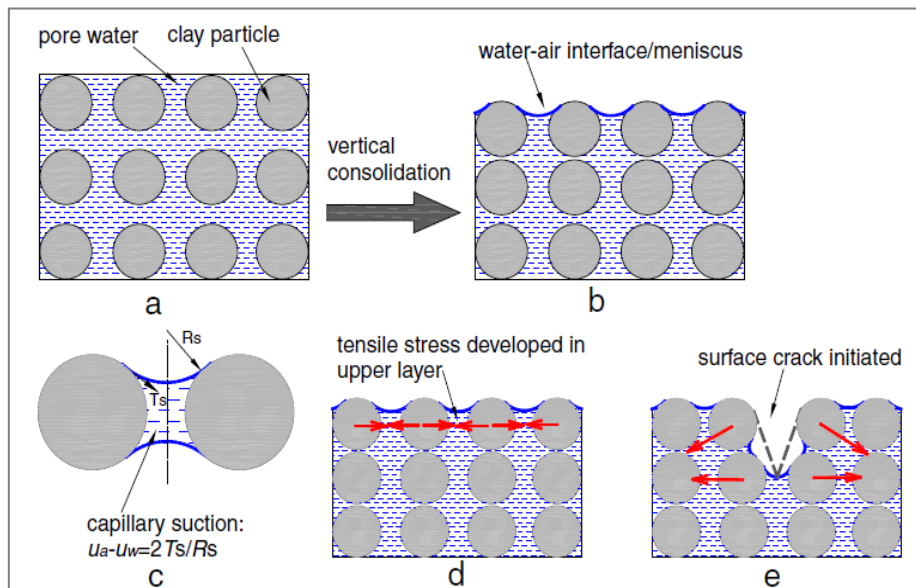


Figure 1.9: Processus de l'initiation des fissures: (a) sol initialement saturé; (b) développement du ménisque à l'interface eau-air entre les particules; (c) forces capillaires entre les particules; (d) développement des contraintes de tension dans la tranche superficielle et (e) initiation des fissures à la surface (Tang et al., 2011)

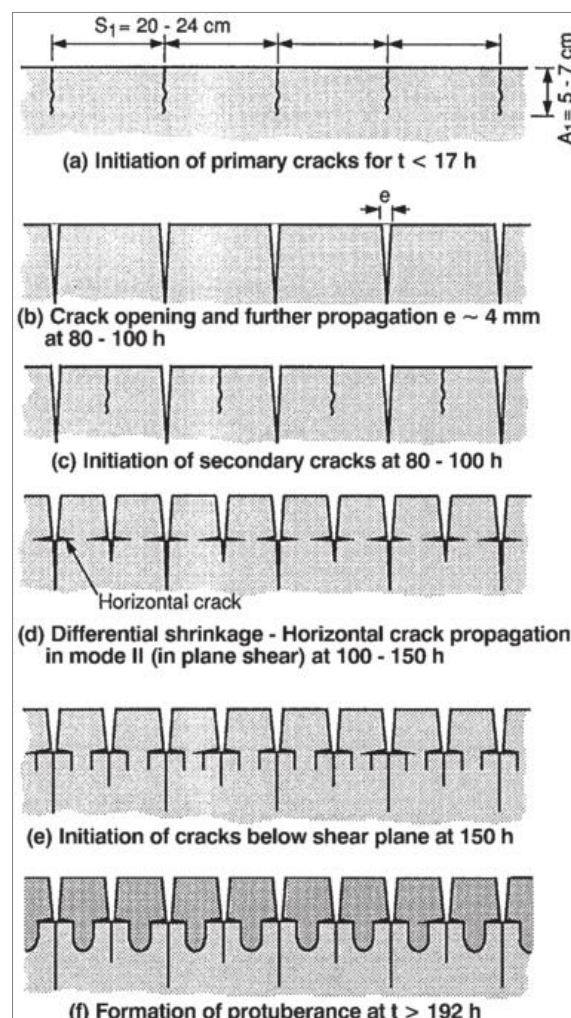


Figure 1.10: Étapes de fissuration d'une argile Saint-Alban intacte (Konrad et Ayad, 1997).

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

- 1- Fissures initiales: fissures indépendantes qui commencent près des bords.
- 2- Fissures secondaires: fissures 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 1.11 montre les résultats de fissuration réalisée au laboratoire par (Tang et al., 2011) sur un échantillon d'un sol argileux soumis à la dessiccation.

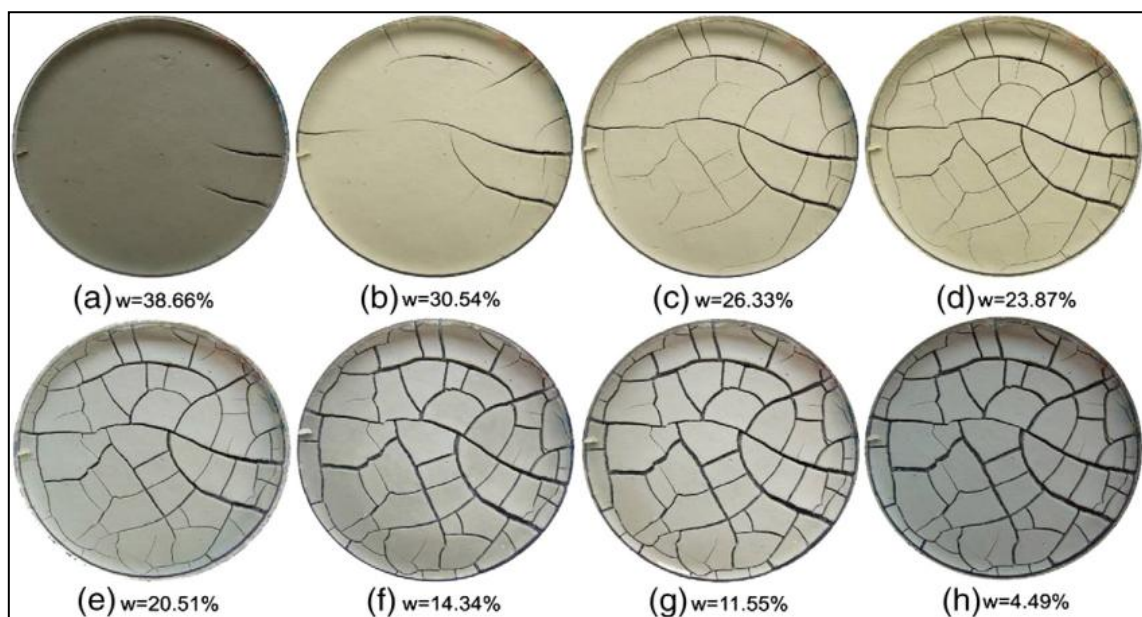


Figure 1.11: Evolution de la géométrie des fissures sur la surface de l'échantillon soumis à la dessiccation (Tang et al., 2011)

1.5.3 Paramètres influençant sur la fissuration

Une série d'études expérimentales récentes cherchent à caractériser le phénomène de fissuration des sols argileux par un suivi continu de leur évolution hydrique.

Ces essais visent à étudier les différents paramètres influençant sur la fissuration, ainsi qu'à suivre le réseau des fissures dans le sol à partir de différents paramètres tels que: la teneur en eau, l'humidité relative, le degré de saturation, la largeur moyenne des fissures, le nombre de segments et le taux de fissures... (Miller et al., 1998; Kodikara et al., 2000; Nahlawi et Kodikara, 2006; Péron et al., (2006, 2009); Yesiller et al., 2000; Kodikara et Choi, 2006; Krisdani et al., 2008; Laloui et al., 2009; Rayhani et al. (2007, 2008); Prat et al., 2006; Vogel et al., 2005; Rodríguez et al., 2007; Li et al., 2009; Tang, 2009; Li et Zang, 2010; Tang et al., (2007, 2008, 2010, 2011)).

Min et Nhat (2007) ont montré que le processus de dessiccation et donc de retrait et de fissuration, dépend des conditions d'expérimentation comme les propriétés du sol, la densité du matériau, le taux de dessiccation et l'épaisseur de l'échantillon. Ils ont classé les conditions qui contrôlent la fissuration des sols en deux catégories:

- Les conditions extrinsèques qui incluent la température, l'humidité relative et la vitesse du vent;
- Les conditions intrinsèques dont les conditions d'humidité du sol, la structure du matériau, la composition chimique et physique.

On donne ci-dessous une synthèse des résultats obtenus :

Influence du type de sol

Le phénomène de retrait et de fissuration affecte plus les sols ayant une teneur importante en particules fines (Blight, 1997). Tang et al. (2008) mentionnent que la largeur moyenne des fissures et taux de fissuration sont liés à la teneur en particules fines. Un sol ayant une teneur plus élevée des particules fines est susceptible à présenter des fissures avec une largeur moyenne plus élevée.

Influence de l'épaisseur de l'échantillon

Les travaux de Tang et al. (2008), de Lakshmikantha et al. (2006) et de Kodikara et Choi (2006) sur des échantillons de formes et de tailles différentes ont montré que les dimensions (diamètre et

épaisseur) des échantillons ont une influence importante sur la géométrie des fissures et sur le taux de perte d'humidité: Le nombre de fissures diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de l'échantillon.

Colina (1992) observe un réseau de fissuration très espacé dans les éprouvettes épaisses et plus dense dans les éprouvettes minces. Il affirme qu'il existe un rapport d'échelle minimum (diamètre sur épaisseur) au-dessous duquel le sol ne se fissure pas.

Nahlawi et Kodikara (2006) ont observé que la teneur en eau lors de l'initiation des fissures augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de l'échantillon du sol.

Influence du degré de Saturation

Nahlawi et Kodikara (2006) et Péron et al. (2006, 2009) ont réalisé des essais sur des matériaux argileux initialement saturés. Ils ont observé qu'à l'initiation des fissures, le degré de saturation est presque égal à 100%, et que la succion et la teneur en eau correspondante sont proches de la valeur d'entrée d'air (AEV) c'est-à-dire le début de la phase de désaturation. Ces conclusions sont confirmées par d'autres auteurs (Rodríguez et al., 2007; Péron et al., (2006, 2009b) et Tang et al., 2011).

Tang et al. (2011) montrent que la plupart des affaissements verticaux survient avant l'initiation de fissure. La plupart du retrait volumique se développe au cours de la première phase de l'évaporation lorsque l'échantillon est encore saturé.

Influence de la température

L'effet de la température sur le processus de fissuration a été investigué par plusieurs auteurs (Tang, 2009; Tang et al., 2008; Li et Zang, 2010). Des échantillons de sol ont été séchés sous différentes températures. Les résultats montrent que la longueur moyenne, la largeur des fissures et la superficie moyenne des agrégats augmentent avec la température. En fait, lorsque les échantillons de sol sont séchés à une température élevée, une tension élevée à la traction sur la couche de la surface est obtenue.

1.5.4 Influence de la fissuration sur les propriétés hydrauliques du sol

L'initiation et la propagation des fissures ont une influence conséquente sur les propriétés hydrauliques et mécaniques des sols.

Rayhani et al. (2007) et Péron et al. (2006) ont montré que les fissures de dessiccation peuvent augmenter la conductivité hydraulique des matériaux fins argileux. Ce résultat est confirmé par d'autres auteurs (Zeh et Witt, 2006; Lakshmikantha et al., 2006; Liu et al., 2004; Yessiler et al., 2000).

Albrecht et Benson (2001) ont constaté que la conductivité hydraulique de l'argile a augmenté de 1×10^{-9} m/s pour le sol intact jusqu'à 1×10^{-10} m/s pour le sol après fissuration.

Zhang et Fredlund (2003) ont investigué l'effet des fissures sur la conductivité hydraulique du sol. Les résultats affirment que la perméabilité du sol peut être dominée par le réseau des fissures dans la gamme des faibles succions (jusqu'à atteindre AEV des fissures qui est généralement faible). Mais, pour les larges succions, la perméabilité est contrôlée par la matrice du sol et le comportement du sol n'est plus influencé par les fissures. Ces résultats ont été confirmés par les essais menés par Azam et Ito (2011), Abbaszadeh et al. (2011), Zhang et al. (2011). La perméabilité des fissures est supérieure à celle de la matrice. Les courbes de rétention du sol intact et du sol fissuré sont très proches après la désaturation des fissures. Lorsque les fissures ferment sous conditions saturées et s'ouvrent sous une forte succion, la perméabilité du sol fissuré est similaire à celle de la matrice du sol.

Une étude a été menée par Jacquemin (2011) sur des échantillons intacts et fissurés d'un sol sableux - argileux afin d'obtenir les profils de perméabilité pour un champ de succion allant de 200 à 8000 kPa. Les résultats ont montré qu'il n'y a pas une différence notable entre la conductivité hydraulique pour les sols intacts et fissurés. Les courbes de rétention pour les grandes valeurs de succion sont très proches sous conditions intacts et fissurés; ce qui permet de considérer le sol fissuré comme un milieu continu dans les études de l'écoulement. Cette étude a affirmé que la présence des fissures n'a pas d'influence significative sur le comportement hydraulique du sol sous grandes valeurs de la succion.

1.5.5 Profondeur du front de dessiccation

Pour un sol argileux, le manque d'eau en été peut provoquer une perte de volume par dessiccation sur une profondeur pouvant atteindre 3 mètres. Une perte de teneur en eau de 5% sur un sol argileux saturé peut conduire à un tassement de 3cm par mètre d'épaisseur d'argile (www.clingenierie.fr) (Figure 1.12).

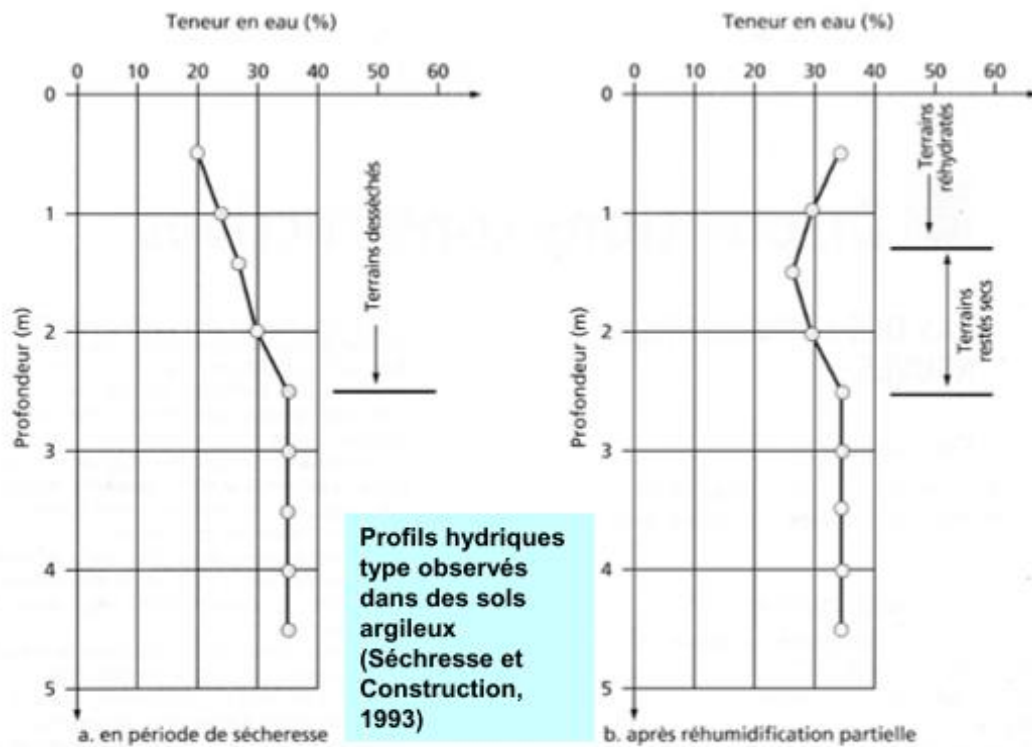


Figure 1.12: Profil de la teneur en eau en période de la sécheresse (source: BRGM)

Un site instrumenté, situé sur la commune de Pessac, à proximité de la ville de Bordeaux, a été mis en place fin mars 2008. Le suivi hydrique continu montre une chute de la conductivité de la couche argileuse jusqu'à 3 m de profondeur au début de la période estivale sèche en juin et sur toute la longueur du profil (Chretien et al., 2010).

Un réseau de fissures espacées de 10 cm a été observé dans la tranche supérieure altérée de l'argile (< 1 m de profondeur) mettant ainsi en évidence un comportement non imperméable des argiles. Les fissures peuvent atteindre 2 m de profondeur lors du retrait maximum fin septembre 2009, avec une ouverture d'environ 2cm en surface décroissant avec la profondeur (quelques

mm). D'importantes variations mensuelles des teneurs en eau sont marquées entre août 2008 et décembre 2009, entre 1 et 2m de profondeur dans les argiles fissurées. À partir de 2m de profondeur, les variations sont moins significatives.

Des essais de séchage réalisés dans une chambre environnementale par Ta et al. (2009) ont montré que les 20 - 50 premiers centimètres du sol connaissent des variations de température et de succion importantes. Blight (1997) affirme que dans des cas extrêmes de sécheresse, on observe des variations significatives jusqu'à plus d'un mètre.

La propagation et la profondeur des fissures sont contrôlées par les propriétés intrinsèques du sol. Konrad et Ayad (1997) ont observé la formation des fissures primaires allant jusqu'à une profondeur de 5 cm suite à la première dessiccation.

1.5.6 Impact des fissures sur l'évaporation

L'apparition des fissures à la surface des sols affecte le phénomène de l'évaporation. Des nouvelles surfaces d'évaporation sont créées par les fissures, augmentant ainsi la surface d'évaporation. L'eau peut s'évaporer, non seulement de la surface du sol mais aussi à partir des surfaces de fissures. Cette augmentation peut être notable selon la géométrie de fissures. L'évaporation à partir du réseau des fissures peut être parfois plus importante qu'à partir de la surface du sol.

Selim et Kirkham (1970) ont réalisé des essais en laboratoire sur des échantillons limoneux ayant deux fissures artificielles le long de l'échantillon. Les résultats montrent que l'évaporation pour une surface avec des fissures de 6,4 mm de largeur augmente de 12% à 16% par rapport à une surface sans fissures. Avec des fissures de 19,1 mm de largeur, l'évaporation augmente de 30%.

Ritchie et Adams (1974) ont confirmé le rôle important des fissures sur l'évaporation. Une expérience d'évaporation a été menée in - situ. D'abord, ils observent une diminution du taux d'évaporation de 0,90 mm/jour à 0,65mm/jour pendant les 5 premiers jours. Puis ils ont utilisé un plastique pour couvrir la zone non fissurée; ils ont observé une diminution du taux d'évaporation mesuré de 0,65 mm/jour à 0,35 mm/jour donc de 46%. Cette évaporation provient notamment des fissures. On note ainsi une contribution importante des fissures, de 40 à 100% à

l'évaporation totale. La contribution des fissures est très importante à la fin du processus d'évaporation; quand la surface du sol devient sec.

La figure 1.13 montre le profil de la teneur en eau dans le sol près d'une fissure. On remarque des valeurs plus importantes dans la fissure par rapport à celles à la surface du sol. La figure montre que la taille importante de la fissure implique un taux d'évaporation considérable à travers le réseau de fissures.

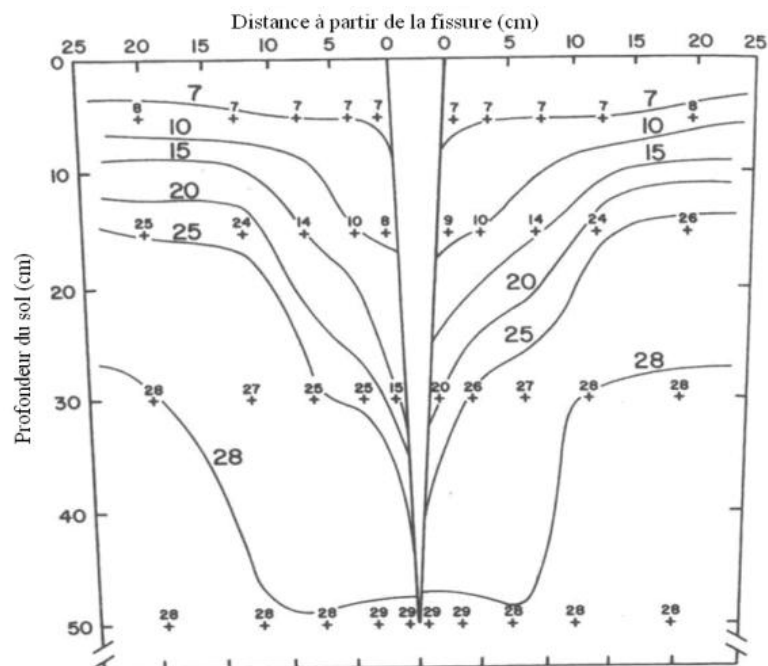


Figure 1.13: Distribution de la teneur en eau dans une fissure de 100mm de largeur et 550mm de profondeur, (Ritchie et Adams, 1974)

L'expérimentation de Kuhn et Zornberg (2006)) menée en laboratoire sur deux colonnes de séchage d'un sol argileux montre que le taux d'évaporation peut doubler avec la fissuration. La différence entre les deux colonnes réside dans l'introduction des vises à la surface dans la première colonne pour restreindre la fissuration. Des fissures plus profondes sont développées dans la deuxième colonne du sol. Un changement dans la coloration du deuxième colonne du sol, le long de son profil, a été observé après 48 heures de séchage mettant en évidence la formation de deux fronts de séchage. Le premier front (vers le bas de la colonne) est caractérisée par une frange sombre. Le deuxième front (en haut) correspond à la limite supérieure de la frange sombre (Figure 1.14). La formation de ces deux fronts est attribuée à une rupture capillaire. La

conductivité hydraulique dans la zone sèche insaturée est inférieure à celle dans la frange sombre. Cette différence de perméabilité forme un arrêt capillaire à l'interface avec la zone sèche; provoquant ainsi une accumulation de l'eau à l'interface entre les régions supérieure et inférieure.

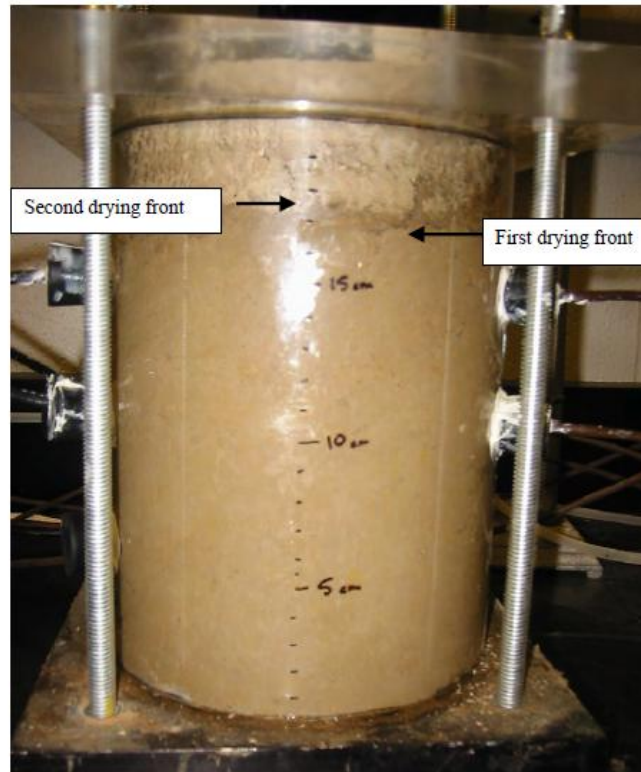


Figure 1.14: Formation de deux fronts de séchage dans le sol après 48 heures de séchage

1.5.7 Modélisation du processus de fissuration

Graham (2004) a construit un modèle pour représenter un sol fissuré. Le modèle simule l'évaporation du sol nu et fissuré pendant une période de 100 jours à l'aide du logiciel TOUGH2 (Pruess et al., 1999) un simulateur de milieux poreux numérique. Les principaux résultats montrent que la présence de fissures augmente l'évaporation de 21% à la fin de la période de calcul.

Abu-Hejleh et Znidarcic (1995) ont utilisé un modèle éléments finis pour étudier le processus de dessiccation. Ils ont supposé qu'une fois la rétraction du sol atteint un taux de vide important, les fissures se produisent et le modèle devient bidimensionnel.

Zhang et Fredlund (2003) ont suggéré l'utilisation des concepts utilisés en mécanique des roches pour définir la courbe de rétention de l'eau d'un sol fissuré. Ils supposent que la présence des fissures va engendrer un comportement bi-modal du sol, et le sol fissuré se comporte comme s'il est la combinaison de ces deux matériaux: la matrice du sol et les fissures. La courbe de rétention sera alors la somme des effets de ces deux phases en fonction de leurs porosités respectives.

Récemment, des essais ont été menés par Abbaszadeh et al. (2011) et Azam et Ito. (2011) pour valider le model proposé par Fredlund et al. (2003). Le comportement bi-modal du sol fissuré a été observé. Les résultats montrent la présence d'une SWCC bimodale comprenant deux 'AEV': la première correspondant à la désaturation des fissures et la deuxième à celle de la matrice du sol. Sur la base du caractère bimodal, Fredlund et al. (2010) ont développé un modèle empirique bimodal, pour la formulation des fonctions de propriétés non saturées pour les sols argileux fissurés. D'abord, les fonctions de la conductivité hydraulique et de la courbe rétention sont obtenues pour les deux matériaux indépendants. Puis, la superposition des deux phases est utilisée pour obtenir les propriétés non saturées du sol fissuré. Le modèle simule le développement de la succion dans un sol composé de deux tranches: une tranche superficielle fissurée et une tranche plus profonde intacte. Une dalle imperméable recouvre une partie de la surface du sol. Des cas d'infiltration et d'évaporation à la surface du sol ont été considérés pour le sol intact puis ensuite comparés aux résultats du sol fissuré. Les résultats montrent que la présence des fissures rend la distribution de la succion uniforme le long de la surface du sol, indépendamment de la dalle imperméable à la surface du sol. Cela est dû à l'augmentation de la conductivité hydraulique du sol fissuré par rapport à celle de l'argile intacte.

Un profil vertical (constant avec la profondeur) a été observé pour la succion dans la partie fissurée en raison de l'évaporation à la surface du sol, alors que la succion dans la partie intacte inférieure varie de manière significative avec la profondeur. Ce comportement est dû à une conductivité hydraulique plus importante et un gradient plus faible dans le sol fissuré par rapport à la faible conductivité et le gradient hydraulique élevé dans le sol intact. À des degrés de saturation élevés (donc pour faibles valeurs de la succion), le réseau des fissures domine le comportement du sol fissuré.

1.6. Conclusion

Dans ce chapitre, on a d'abord présenté le phénomène de sécheresse, son ampleur et ses effets néfastes sur le sol et sur les constructions. Puis, on a présenté les paramètres du sol qui jouent un rôle important dans la prévision du comportement du sol non saturé. Comme il a été indiqué, ce comportement est influencé par de nombreux éléments. La succion présente le paramètre le plus important du comportement hydraulique et mécanique des sols non saturés. Cette étude nous a permis de mettre en évidence le comportement couplé thermo-hydro-mécanique des sols non saturés. Ainsi, dans la modélisation de la sécheresse, il est important de considérer ce couplage.

Nous avons présenté également une synthèse des travaux réalisés sur la modélisation du phénomène d'échange sol-atmosphère, basé principalement sur le bilan d'eau et sur le bilan d'énergie. Ce phénomène fait intervenir trois grandeurs à savoir: la pression d'eau, la pression de vapeur et la température.

En période de dessiccation, l'évaporation, étant source principale de la perte en eau, conditionne les échanges à la surface du sol. De nombreuses formulations ont été proposées dans la littérature pour estimer l'évaporation de la surface du sol. Parmi les formules les plus utilisées, on va retenir dans notre calcul la formule de Penman -Wilson (1990). Cette formule lie la simplicité et la pertinence dans l'estimation du taux d'évaporation réelle.

En fin de 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. Ce travail de thèse vise à apporter une contribution dans l'étude numérique de l'interaction entre la fissuration et la sécheresse et la prise en compte de ce phénomène dans l'étude de l'interaction sol-atmosphère et de l'interaction sol-structure sous l'effet de la sécheresse.

Chapitre 2:

ETUDE EN LABORATOIRE DE L'INFLUENCE DES

FISSURES SUR LE PHENOMENE DE SECHAGE

2.1. Introduction

Ce chapitre présente une étude en laboratoire de l'influence des fissures sur le séchage des sols fins. Le travail a été effectué dans le cadre d'une collaboration avec l'Institut de Technologie d'Ashikaga au Japon. J'ai effectué dans le cadre de cette collaboration un séjour d'un mois dans cet Institut pour réaliser les essais présentés dans ce chapitre.

Le chapitre est organisé en 3 parties. La première est consacrée à la présentation des caractéristiques de l'argile utilisée dans cette étude. La seconde présente les techniques de contrôle de succion utilisées dans les essais ainsi que la procédure expérimentale. La dernière partie présente une analyse des résultats de séchage réalisés sur des échantillons intacts et fissurés à différents niveaux de succion. L'analyse de ces essais montre le rôle important des fissures sur le mécanisme de séchage des argiles.

2.2. Caractéristiques de l'argile utilisée (la Kaolinite)

L'étude en laboratoire a été réalisée sur la Kaolinite. Le choix de ce matériau est justifié par son utilisation dans le laboratoire et sa sensibilité au phénomène de séchage. On présentera dans cette partie les principales caractéristiques de cette argile, à savoir :

- La granulométrie
- Les limites d'Atterberg
- La masse volumique des particules « ρ_s »
- La conductivité hydraulique

▪ Courbe granulométrique

L'analyse granulométrique a été réalisée par sédimentation (ou le test à l'hydromètre) suivant la procédure décrite par la norme standard (NF P94-057). La figure 2.1 présente la courbe granulométrique obtenue. Le pourcentage inférieur à 80 μm est de 72%. En se basant sur les critères granulométriques, la Kaolinite est classée comme sol fin.

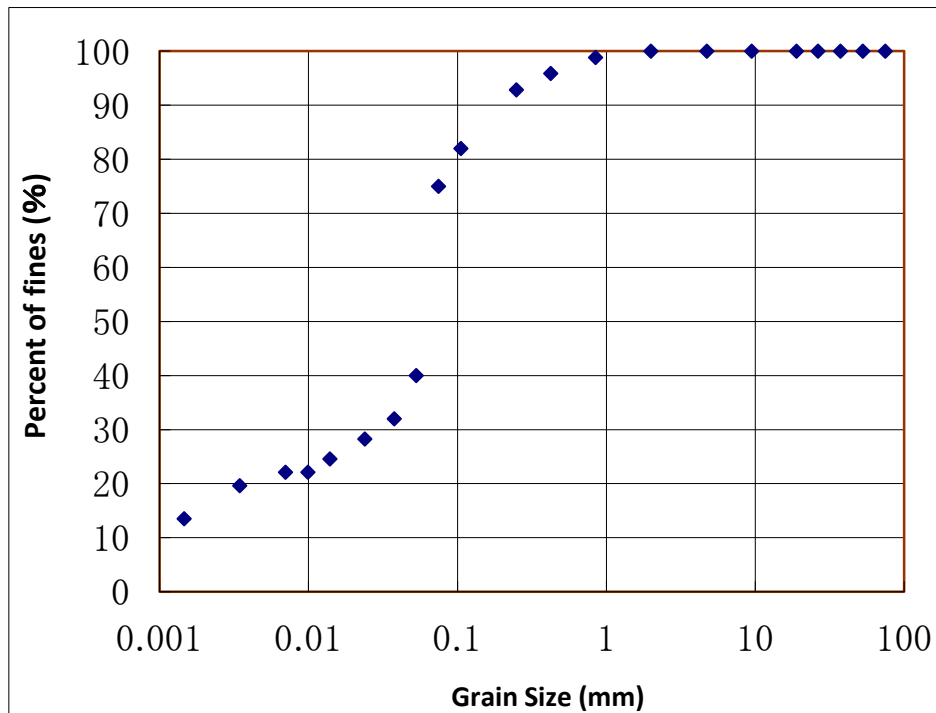


Figure 2.1: Courbe granulométrique de la kaolinite

- **Limites d'Atterberg**

La limite de liquidité a été déterminée à l'aide de l'appareil de Casagrande. On a obtenu $W_L = 72\%$.

La limite de plasticité a été déterminée à l'aide de l'appareil de la technique classique des rouleaux. On a obtenu $W_P = 43\%$.

On obtient ainsi un indice de plasticité $IP = W_L - W_P = 29\%$.

- **Masse volumique des particules ρ_s**

La détermination de la masse volumique des particules « ρ_s » se fait dans un appareil appelé pycnomètre (NF P 94-054). Une masse connue de sol séché à l'étuve ' m_s ' est introduite dans un petit ballon appelé pycnomètre contenant de l'eau distillée. On mesure le volume d'eau déplacé par les grains ' v_s ' après avoir supprimé toutes les bulles d'air. On a effectué trois essais afin d'obtenir une moyenne des résultats (Figure 2.2). On a obtenu $\rho_s = 2410 \text{ Kg/m}^3$.



Figure 2.2: Détermination du poids spécifique des grains (Essais de pycnomètre)

▪ Conductivité hydraulique

L'essai de perméabilité a été réalisé dans une cellule triaxiale au laboratoire. La perméabilité saturée k_{sat} a été obtenue en effectuant un essai triaxial basé sur la technique de «translations d'axes » (axis translation technique) sur un échantillon saturé de Kaolinite. Basée sur la loi de Darcy, nous avons obtenu $K_{sat} = 7.18 * 10^{-6}$ cm/sec.

2.3. Techniques de contrôle de la succion

2.3.1 Présentation des techniques

La capacité des sols non saturés à attirer et retenir l'eau est quantifiée par la détermination des courbes de rétention d'eau, qui en constituent une caractéristique essentielle. En effet, la succion conditionne les mouvements et l'équilibre de l'eau dans la zone non saturée. L'étude en laboratoire du comportement des sols non saturés a été permise avec le développement des appareils à succion contrôlée depuis les années 1960. Les techniques de contrôle sont conçues de telle manière qu'on puisse imposer une succion au sol et mesurer la teneur en eau correspondant à l'équilibre hydrique.

Il existe différentes techniques de contrôle de la succion. Chaque technique est adaptée à une certaine gamme de succion et peut donc permettre la détermination de la courbe de rétention, en

imposant une augmentation de la succion (chemin de séchage). Le système de contrôle de succion le plus utilisé est basé sur la technique dite « translation d'axes », mais certains appareils utilisent aussi la technique osmotique, ou la technique de contrôle par phase vapeur.

Dans notre travail, nous avons utilisé deux techniques: La technique de « translation d'axes » qui couvre la plage de faibles succions et la technique de contrôle par phase vapeur ou bien technique des solutions salines saturées, qui permet d'imposer des succions fortes.

2.3.2 Méthode de translation d'axes

2.3.2.1 Description

La technique de translation d'axes a été proposée par Hilf (1956). Cette approche est décrite dans la littérature par plusieurs auteurs (Fredlund and Rahardjo, 1993; Leong and Rahardjo, 1997; Delage and Cui, 2000; Péron et al., 2007).

La succion matricielle dans un échantillon de sol non saturé représente la différence entre la pression d'air des pores u_a et la pression d'eau des pores ou pression d'eau interstitielle u_w ($\Psi = u_a - u_w$). Typiquement, dans les sols non saturés, on considère que la pression d'air des pores est atmosphérique ($u_a = 0$) et la pression d'eau interstitielle est négative par rapport à la pression atmosphérique. La technique de translation d'axes consiste à faire une translation de l'origine de référence pour la pression d'eau interstitielle, des conditions atmosphériques normales à la pression d'air appliquée dans la chambre (Fredlund and Rahardjo, 1993).

L'expérimentation consiste à imposer au sol une pression d'air plus haute que la pression atmosphérique, tout en maintenant la pression de l'eau nulle. Cette pression étant fixée à une valeur positive supérieure à la pression d'eau, il en résulte une succion:

$$S = u_a - u_w = u_a - 0 = u_a > 0$$

La pression de l'eau dans l'échantillon du sol non saturé est contrôlée par la mise en place d'un disque céramique fine saturé fixé au piédestal de la cellule. La succion matricielle dans l'échantillon $u_a - u_w$ ne doit pas dépasser la valeur de l'entrée d'air du disque céramique.

Le schéma de cette méthode est montré dans la figure 2.3.

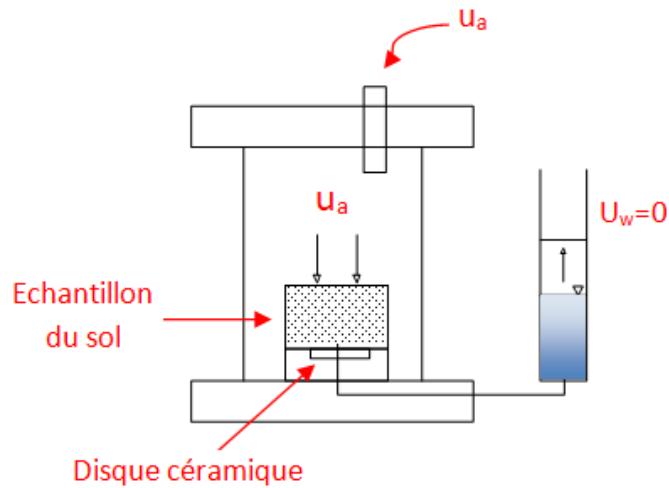


Figure 2.3: Schéma représentatif de la méthode de translations d'axes

2.3.2.2 Appareil triaxial à translation d'axes

La méthode de translation d'axes, a été adaptée aux appareils triaxiaux en mécanique du sol (Figure 2.6). Le système de contrôle de la succion par translation d'axes dans l'appareil triaxial comporte une pierre poreuse céramique saturée, un réservoir d'eau, une burette et l'échantillon de sol en contact avec la pierre poreuse céramique.

Dans l'appareil triaxial, il s'agit d'une cellule étanche à l'air dont la base, sur laquelle repose l'échantillon, est constituée d'un disque céramique déjà saturé à haute pression d'entrée d'air, fixé au piédestal de la cellule (Figure 2.4). Ce type de disque permet le passage de l'eau mais pas de l'air. Son choix dépend généralement de la succion du sol à imposer ou à mesurer, de sa rigidité ainsi que de sa perméabilité. Il est nécessaire que le contact entre l'échantillon de sol à tester et le disque céramique soit de très bonne qualité afin de faciliter la continuité de la phase liquide entre l'échantillon et la pierre poreuse fine et donc maintenir la pression d'eau nulle au sein de l'échantillon ($u_w = 0$).

Des membranes perméables posées sur une pierre poreuse sont parfois utilisées à la place du disque en céramique selon la valeur de la succion imposée.

La succion est imposée en appliquant en haut de l'échantillon une pression d'air u_a (Figure 2.5a). u_a est appliquée par le biais d'une tige de chargement en contact avec la partie supérieure de la cellule et qui peut empêcher l'eau de s'infiltrer dans la pierre poreuse supérieure. Par conséquent,

le changement d'eau dans la burette est le même que dans l'échantillon et donc la teneur en eau peut être calculée pour chaque succion imposée.

La méthode de surpression d'air est limitée à une gamme de succion inférieure à 1,5 MPa (Delage and Cui, 2000).

2.3.2.3 Procédure expérimentale

La méthode de translations d'axes a été employée pour imposer des paliers de succion jusqu'à 500 kPa (Figure 2.6).

Le sol est d'abord malaxé avec une quantité d'eau suffisante pour plusieurs minutes afin d'assurer que le matériau est initialement dans un état de saturation complète ($S_r = 100\%$).

La cellule du sol est constituée d'un moule cylindrique ayant un diamètre de 60 mm et une hauteur de 66mm lui-même fixé sur l'embase de l'appareil (Figure 2.5a). Une fois l'échantillon préparé, il est introduit dans le moule huilé sur sa surface intérieure. Une partie du moule est remplie du matériau. Un vernier ayant une précision de 1/10mm a été utilisé pour la mesure des dimensions de l'échantillon au début et à la fin de l'expérimentation. La hauteur de l'échantillon introduit dans le moule est de 34 mm et le diamètre est de 60mm. Un papier filtre est placé de chaque côté de l'échantillon, permettant un meilleur contact entre la pierre poreuse et le sol.

Quatre petites quantités du sol préparé sont prélevées juste avant l'introduction de l'échantillon dans le moule. Ces quantités, placées dans des petits récipients, sont pesées et séchées au four pendant 24 heures. Leurs masses humides prélevées et leurs masses sèches solides obtenues après séchage au four (110°C) permettent de déterminer la valeur de la teneur en eau. On a obtenu $w = 110\%$.

Une fois l'échantillon placé dans l'appareil triaxial, on commence l'application de la succion par la technique de translations d'axes décrites dans la section précédente (Figure 2.5b).

Deux types d'interfaces saturées ont été employés:

- Des membranes perméables permettant un passage de l'état saturé à l'état non saturé; cette technique a été utilisée dans la gamme des succions faibles comprise entre 0 et 18 kPa.
- Un disque céramique, qui permet d'atteindre une succion de 500 kPa.

En partant de l'état naturel saturé ($w = 110\%$, $S = 0$ kPa), on a commencé les premières mesures à une faible charge de 1 kPa et on a augmenté progressivement la succion appliquée. Le chemin du séchage suivi est le suivant (succion en kPa) :

0 → 1 → 2 → 4 → 8 → 12 → 18 kPa

L'échantillon est placé sous pression jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. L'expérience est arrêtée lorsque le niveau de l'eau dans la burette se stabilise, indiquant ainsi que le processus de perte en eau est terminé. Cela se déduit lorsque la différence entre les dernières valeurs enregistrées aux intervalles de temps fixés devient inférieure à 0.15 ml.

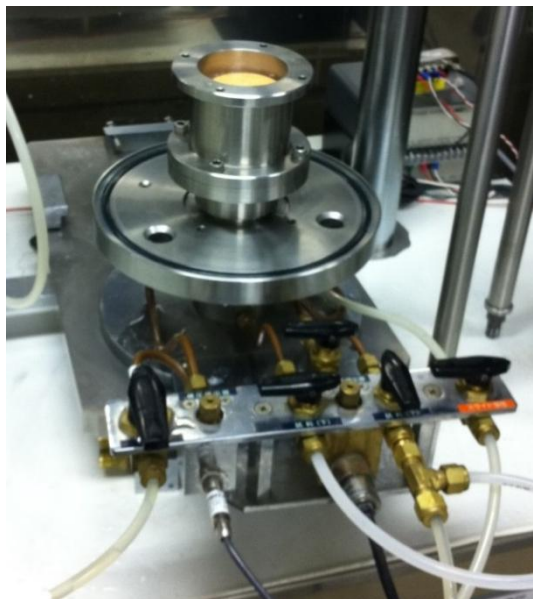
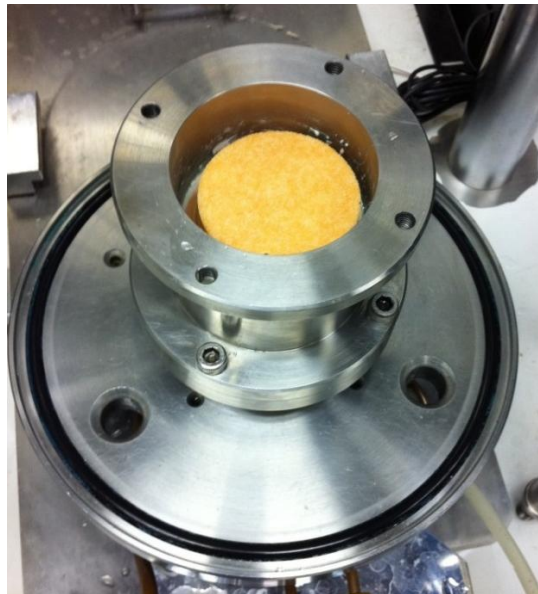


Figure 2.4: Mise en place de l'échantillon et de la pierre poreuse dans la cellule de pression

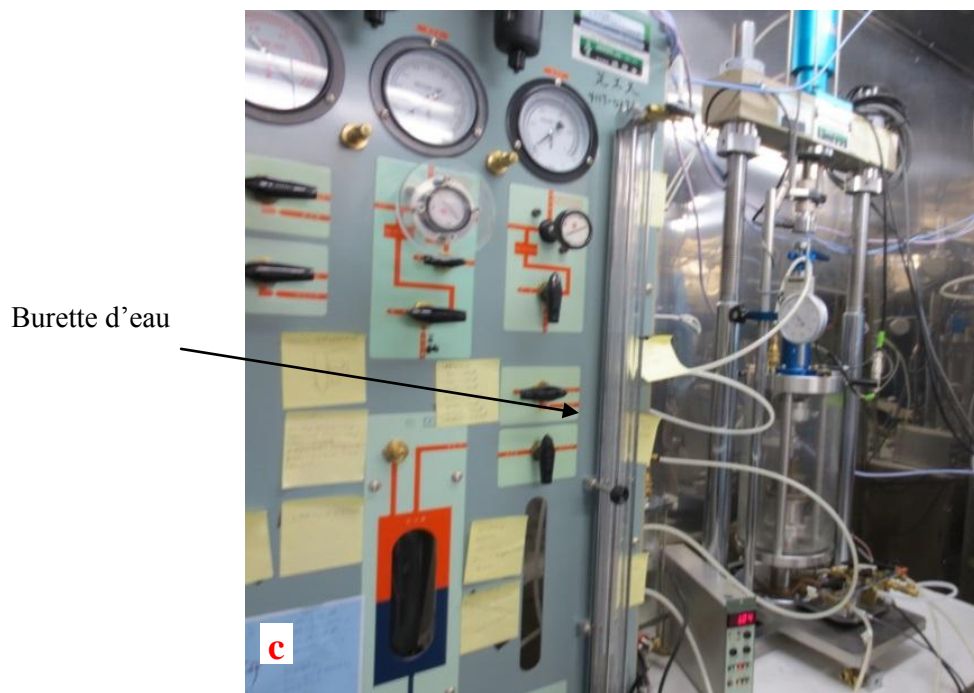
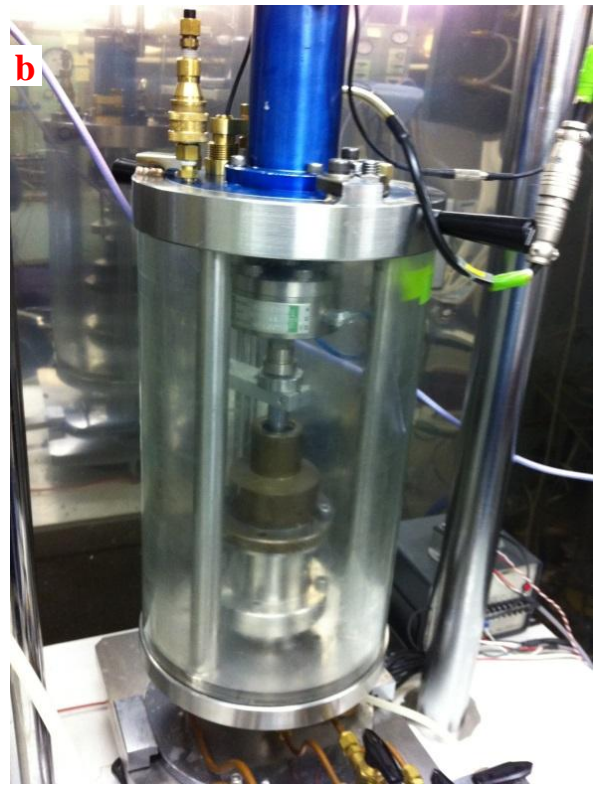
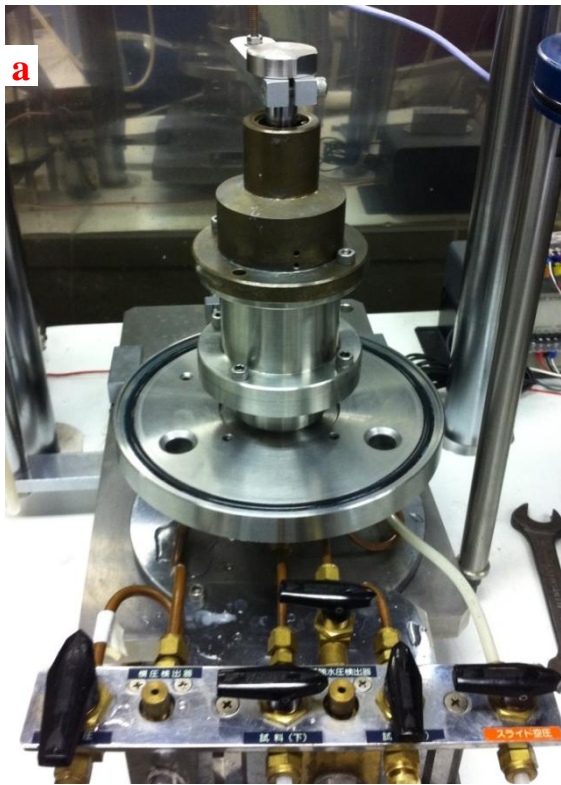


Figure 2.5: (a) Application de la succion dans la cellule de pression, (b) Cellule triaxiale dans laquelle l'échantillon est placé, (c) Equipement utilisé pour l'obtention dans l'essai triaxial

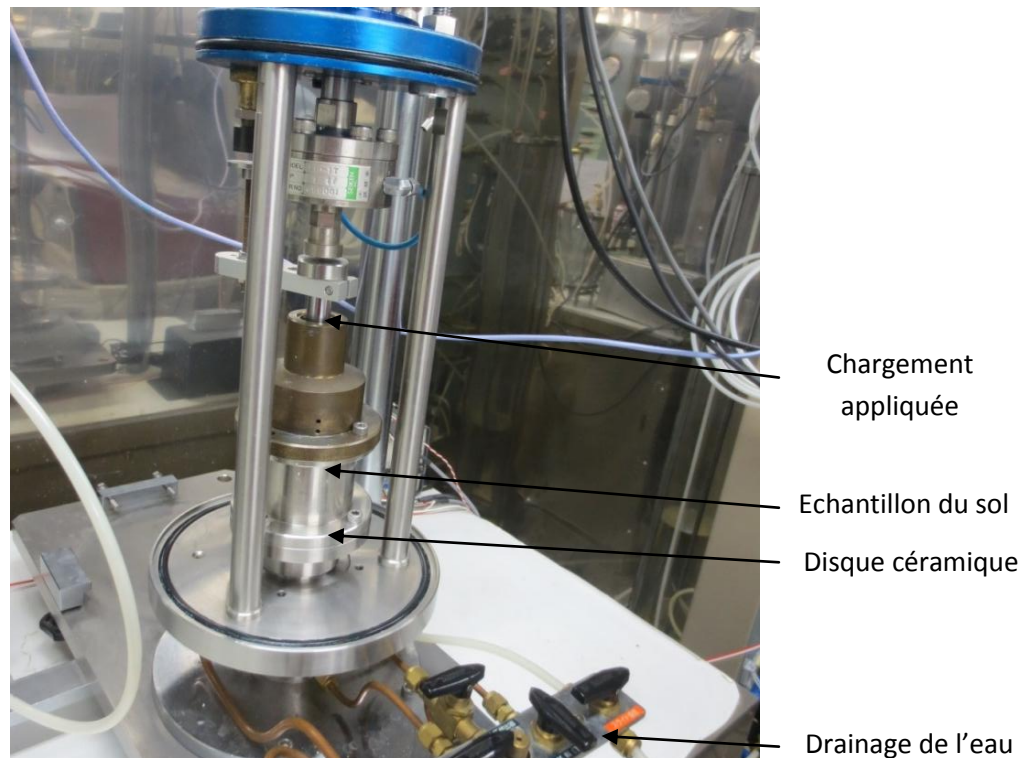


Figure 2.6: Appareil triaxial utilisé

Partant de l'état final obtenu avec l'utilisation de la membrane perméable, on a commencé l'essai à la cellule de pression avec une succion imposée égale à 50 kPa. Puis, l'échantillon a subi un chemin de séchage progressif en appliquant des paliers de succion croissants selon le chemin suivant :

$$50 \rightarrow 100 \rightarrow 200 \rightarrow 400 \text{ kPa}$$

Le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre dépend de la taille de l'échantillon et de la succion imposée. Dans notre cas, trois heures étaient nécessaires pour atteindre l'équilibre pour les valeurs de succion allant de 1 jusqu'à 12 kPa; Par contre, pour les valeurs de la succion plus élevées, le temps nécessaire pour atteindre l'état d'équilibre était de 24 heures. En fin d'essai, l'échantillon a été extrait pour déterminer sa teneur en eau.

La figure 2.7 montre la courbe de rétention obtenue pour la gamme 1 – 500 kPa.

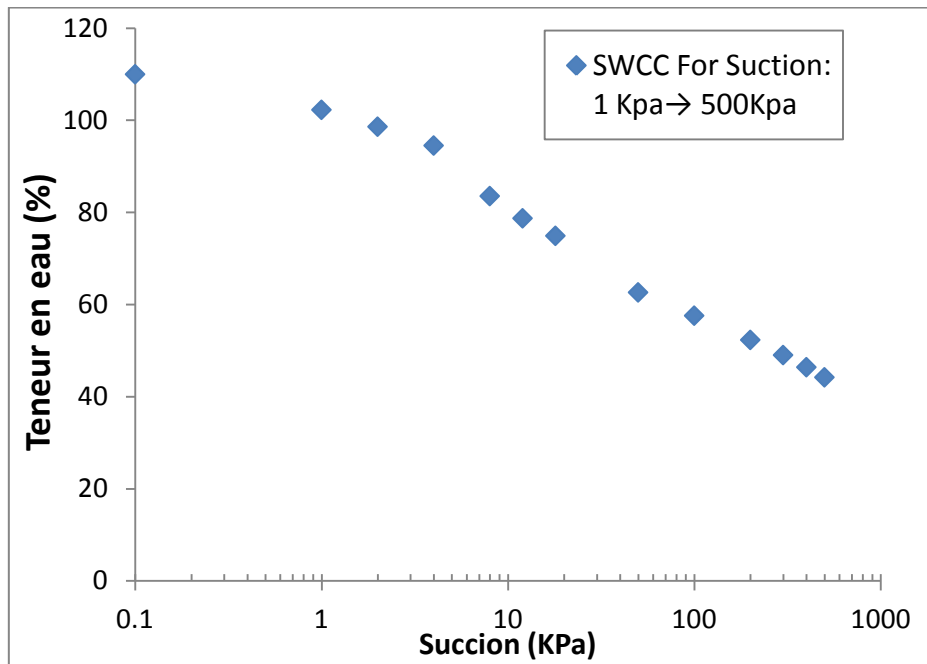


Figure 2.7: Courbe de rétention obtenue avec la méthode de translations d'axes

2.3.3 Technique de contrôle par phase vapeur

2.3.3.1 Présentation

La technique de contrôle de succion par phase vapeur, ou bien, technique de dessiccateur à vide, permet d'imposer des succions totales allant de quelques mégapascals jusqu'à des centaines de MPa. Cette technique est basée sur la loi de Kelvin qui relie l'humidité relative à la succion:

$$s = u_a - u_w = \frac{RT}{gM_w} \ln h_r \quad [2.1]$$

- u_a : pression d'air
- u_w : pression de l'eau
- h_r : humidité relative
- M_w : masse molaire de l'eau ($M=18.016\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)
- g : accélération due à la pesanteur
- R : constante molaire des gaz ($R=8.3143\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
- T : température ($^{\circ}\text{K}$)

Cette technique a été utilisée dans plusieurs études, dont celles de Tessier (1984), Delage et al. (1998); Romero (1999); Delage & Cui (2000); Villar (1999) et Blatz et al. (2008).

Elle consiste à placer un échantillon dans une enceinte dont l'humidité relative est maintenue constante grâce à une solution saline saturée, et à laisser les transferts d'eau s'effectuer sous phase vapeur jusqu'à l'équilibre (Figure 2.8). Ce processus peut être assez long et peut durer une dizaine ou une vingtaine de jours selon la taille de l'échantillon et la valeur de la succion imposée. L'humidité relative peut être imposée en plaçant dans le dessiccateur de solutions salines saturées dont les concentrations sont connues.

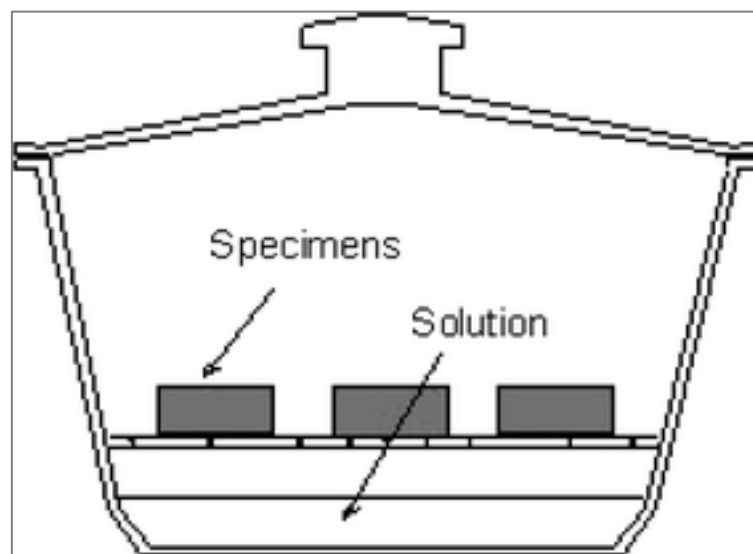


Figure 2.8: Boîte hermétique utilisée dans la technique de contrôle par phase vapeur(Tang et al. 1998)

Les solutions salines saturées ont l'avantage de garder leur potentiel osmotique malgré les échanges sol/humidité, ce qui permet de garder une succion constante durant l'essai. A noter que cette méthode est fortement influencée par les fluctuations de température, c'est pour cela qu'elle doit être menée en conditions isothermes. Cette méthode, contrairement à la méthode de translation d'axes, se rapproche davantage des conditions réelles dans lesquelles se déroulent les écoulements non saturés, et permet d'atteindre des succions de centaines de MPa.

Dans le cadre de notre travail, la méthode des solutions salines saturées a été employée pour imposer des succions allant jusqu'à 296 MPa.

2.3.3.2 Procédure expérimentale

Différentes solutions salines saturées ont été utilisées. Chaque type de solution saline correspond à une humidité relative connue en fonction de ses propriétés physicochimiques et donc à une succion (Figure 2.9). Le tableau 2.1 donne la liste des solutions utilisées et les succions correspondantes. On peut constater qu'on peut couvrir une gamme de succion entre 2,8 et 296 MPa.

Il est recommandé d'utiliser cette technique à 20°C (Delage et Cui., (2000a)). Pour cette raison, les enceintes ont été placées dans une chambre dont la température ambiante est de 20°C.

Tableau 2.1: Solutions utilisées dans ce travail

	Solution saline	Humidité relative (%)	Succion (kPa)	Succion (MPa)
Potassium Sulfate	K_2SO_4	98	2830	2.83
Potassium Nitrate	KNO_3	95	6940	6.94
Ammonium Dihydrogenphosphate	$NH_4H_2PO_4$	93.1	9800	9.8
Sodium Chloride	$NaCl$	75	39000	39
Magnesium Nitrate	$Mg(NO_3)_2 \cdot 6 H_2O$	54	83400	83.4
Magnesium Chloride	$MgCl_2 \cdot 6 H_2O$	33	148000	148
Lithium Chloride	$LiCl$	11	296000	296

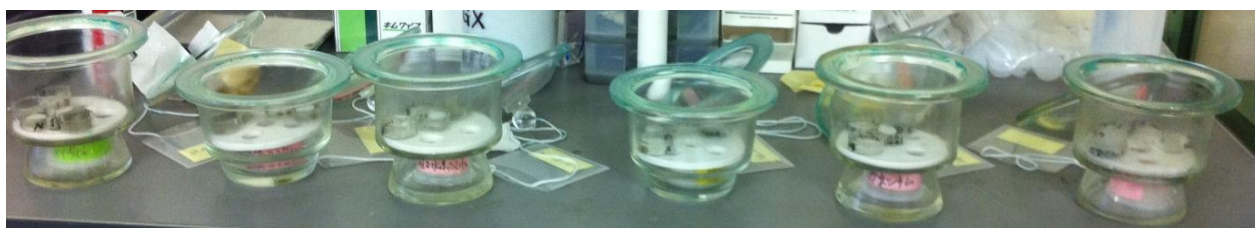
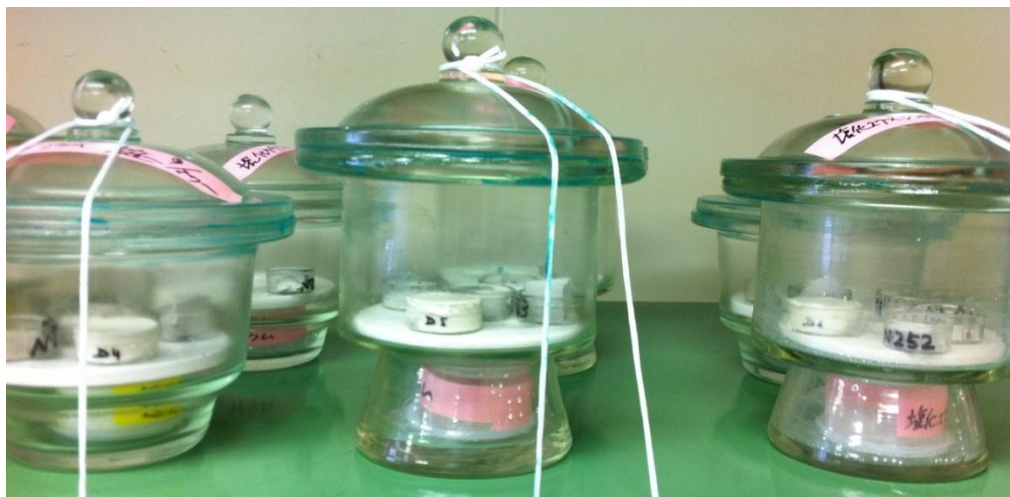


Figure 2.9: Mis en place des boîtes hermétiques à différentes valeurs d'humidité relative contrôlée

2.4. Essais de séchage

2.4.1 Mode opératoire

Les essais de dessiccation sont menés dans des moules cylindriques en plexiglas de diamètre 35 mm et de hauteur 20mm. Plusieurs auteurs qui ont réalisé des essais de retrait et de rétention d'eau sur des matériaux argileux et silteux ont amené leurs matériaux à des teneurs en eau initiales presque 1,5 fois la limite de liquidité w_l pour s'assurer de l'état de saturation initiale (Souli, 2009; Yigzaw, 2009). Pour tous les essais qu'on a réalisés, les échantillons ont été préparés sous forme de pâte en mélangeant de la poudre d'argile sèche et de l'eau, à une teneur en eau égale à une fois et demi la limite de liquidité. Ainsi, les échantillons sont préparés avec une teneur en eau initiale égale à 110%. Le matériau est bien malaxé durant plusieurs minutes pour assurer l'homogénéité.

A la fin de la phase de préparation, on a fait passer une barre d'acier à la surface des échantillons pour enlever le matériau en excès, permettant ainsi d'obtenir une surface lisse du matériau. Ainsi le volume initial de l'échantillon mis en place peut facilement être déduit du volume du moule dont on connaît la hauteur $H = 35$ cm et le diamètre $\varnothing = 20$ cm celles du moule. Les parois des moules sont recouvertes d'un produit adhérent pour empêcher le retrait libre des parois durant le séchage et pour s'assurer que le flux d'évaporation induit se produit uniquement à partir de la surface supérieure des échantillons et de la surface des fissures (pour le cas des échantillons fissurés).

La préparation des échantillons a été réalisée en respectant toujours la même procédure de manière à obtenir le même état initial du départ. Chaque enceinte contenait deux échantillons du sol de même taille et de même teneur en eau initiale. On a utilisé donc deux échantillons pour chaque valeur de succion: un échantillon intact et un échantillon fissuré.

Dans le second échantillon, une fissure de 1mm de largeur jusqu'à la profondeur de l'échantillon a été introduite manuellement avec une lame afin d'investiguer son impact sur la variation de la teneur en eau et sur la courbe de rétention.

Comme le sol préparé était encore mou après sa préparation, on était incapable de créer une fissure avec cette teneur en eau initiale (110%). On était obligé alors d'attendre deux jours pour que le sol devient un peu consistant. Pour connaître la nouvelle teneur en eau correspondante après ces 2 jours, quatre petites quantités du matériau préparé ont été prélevées pour déterminer la teneur en eau. On a obtenu $w = 80\%$.

La figure 2.10-a présente la boîte hermétique dans laquelle les deux échantillons sont placés. Dans la figure 2.10-b, on montre l'échantillon intact (à droite) et l'échantillon fissuré (à gauche) soumis à la succion imposée (vue en dessus).

Pendant l'essai, on a suivi la variation du poids des échantillons. Une balance pour les petites masses a été utilisée pour les mesures de la masse des échantillons afin de calculer la teneur en eau. La balance utilisée a une précision de 0,0001 g.

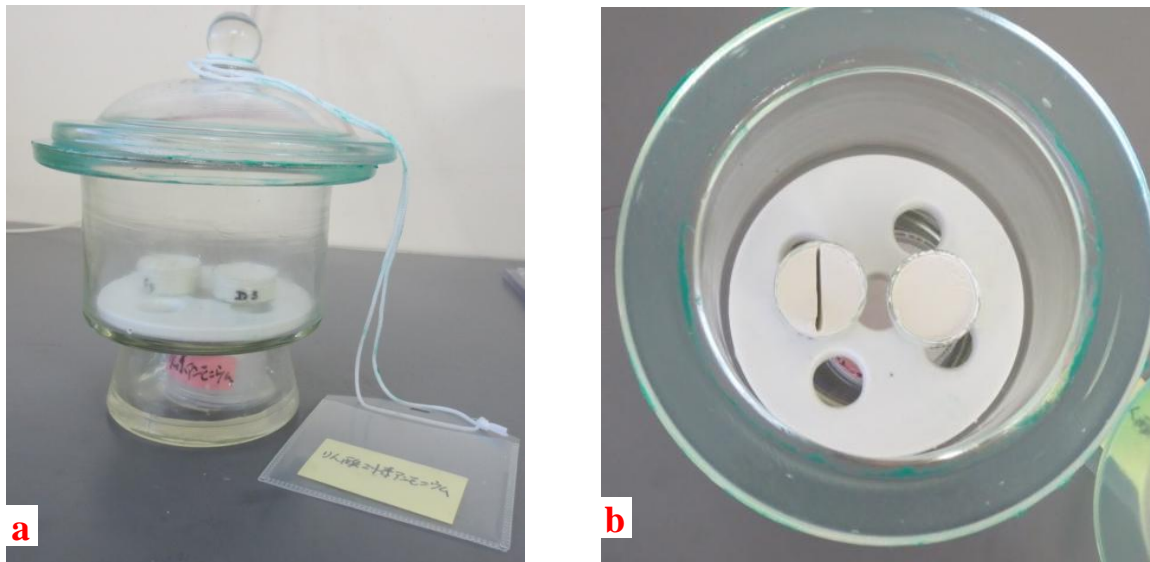


Figure 2.10: (a) Vue en dessus des 2 échantillons intact et fissuré placés dans la boîte à succion imposée, (b) La boîte hermétique utilisée dans la technique à pression de vapeur

Les teneurs en eau des échantillons de sol ont été mesurés avant et après l'imposition de la succion. Après 21 jours (le temps nécessaire pour la stabilisation de la masse des échantillons soumis à de fortes succions), les échantillons ont été sortis pour la détermination de leurs teneurs en eau finales.

2.4.2 Résultats obtenus

La figure 2.11 montre les échantillons du sol à l'état initial, donc juste avant l'application de la succion.

Les figures 2.12 (a, b, c, d, e, f, g et h) présentent l'évolution des échantillons intacts et fissurés au cours de la dessiccation. La partie supérieure des photos, donne les échantillons fissurés; la partie inférieure donne l'évolution des échantillons intacts.

Le retrait latéral ainsi que l'évolution de la fissuration du sol au cours de séchage sont suivis et décrits à partir de photographies des échantillons prises à intervalle régulier avec un appareil numérique. Tout au long du séchage, on suit l'humidité du sol par pesée du sol.

2.4.2.1 Retrait des échantillons intacts

Les résultats obtenus sur les échantillons intacts mettent en évidence des variations importantes de volume et l'absence de fissuration pour la plupart des échantillons. Les photos prises montrent que le séchage des échantillons conduit à la rétraction volumique du sol dont l'intensité dépend de la succion appliquée. En fait, le séchage d'un sol riche en argile provoque une réorganisation de ses constituants. Il en résulte un retrait, qui se manifeste par une modification de la porosité du sol et notamment par l'apparition de fissures et microfissures selon si le retrait est empêché ou non.

Les résultats confirment que, le sol est plus susceptible à la déformation lorsque la pression appliquée augmente. En effet, l'échantillon (7) avec la plus grande succion imposée (296 MPa) subit la rétraction volumique en premier (après 2 jours) (Figure 2.12.b). Le retrait de l'échantillon (6) soumis à une succion de 148 MPa débute après 4 jours (Figure 2.12.d) alors que celui de l'échantillon (5) avec $\Psi=83,4$ MPa après 7 jours (Figure 2.12.e). Le séchage conduit à la détérioration de l'adhésion entre le support et le sol et elle est plus prononcée pour le cas des grandes succions.

Dans les échantillons (3) et (4), des fissures sont créées sur toute la surface en formant des polyèdres irréguliers (Figure 2.12.h). On a observé des fissures se formant successivement au cours du séchage. Cette différence de comportement peut résulter de la forte adhésion du sol avec les parois du moule. En effet, l'augmentation de la succion appliquée engendre une augmentation de la cohésion du sol. Il en résulte alors une rétraction de tout le volume du sol. Pour des valeurs de succions plus faibles (échantillons 3 et 4), la cohésion entre les particules du sol est alors plus faible et des fissures tendent à se former près du centre de l'échantillon. Une fois la fissure principale apparaît, le processus initié induit d'autres fissures qui vont se développer entre les premières, tout en s'élargissant au cours du temps. L'angle d'intersection tend généralement vers 90° et vers 120° (points encerclés en bleu dans la figure 2.12.h).

2.4.2.2 Retrait des échantillons fissurés

Le comportement des argiles fissurées est différent. Contrairement aux échantillons d'argile intacts, un faible retrait a été observé suivi d'un développement de fissures. Durant les deux premiers jours de séchage, aucune fissure n'a été observée. Le départ de l'eau se produit alors sans provoquer de retrait équivalent.

Les résultats mettent en évidence deux phases de fissuration:

- La première phase comporte un élargissement de la fissure principale.
- La seconde phase consiste dans la poursuite du développement de la fissure existante et la formation de nouvelles fissures secondaires perpendiculaires à la fissure initiale. Il en résulte alors un réseau dense de fissures fines (Figure 2.12.h).

Avec l'avancement du séchage, le retrait des sols fissurés provoque la création d'une porosité qui apparaît sous forme de fines fissures, d'épaisseurs faibles (inférieure à 1mm). Cette fissuration d'abord fine se diffuse et évolue progressivement au cours du séchage. La largeur, la longueur et le nombre de ces fissures augmentent régulièrement lorsque le séchage progresse (Figure 2.12.c jusqu'à 2.12.h).

En fait, le critère principal d'initiation des fissures est la résistance à la traction des sols qui est liée à la teneur en eau ou à la succion développée. Des contraintes se développent dans le sol jusqu'à un niveau critique pour lequel la résistance en traction est atteinte. Cette résistance en traction dépend de la teneur en eau affectant la cohésion du sol. Lorsque les contraintes de traction induites par le retrait dépassent la résistance en traction, les fissures se forment et se propagent.

Seul le premier échantillon demeure intact durant tous les jours de l'essai et ne présente qu'un faible retrait par rapport aux autres. Le retrait se manifeste par un élargissement de la fissure sans l'apparition des fissures secondaires. Dans ce cas, on peut déduire que la contrainte en traction n'a pas dépassé la résistance à la traction de l'échantillon, ce qui fait que le matériau n'a pas fissuré.

La fissuration secondaire commence d'abord dans les échantillons à succions élevées : après 3 jours pour l'échantillon (7) où $\Psi = 296$ MPa (point encerclé en rouge dans la figure 2.12), après 7 jours pour l'échantillon (6) où Ψ imposée = 148000 kPa (points encerclés en rouge dans la figure 2.12) et après 9 jours pour l'échantillon (5) où Ψ imposée = 83,4 MPa (Figure 2.12). La largeur de ces fissures augmente progressivement de l'ordre d'un millimètre de largeur pour les faibles valeurs de la succion (2,83 MPa) arrivant à quelques millimètres pour les succions à forts potentiels (296 MPa). D'autre part, en profondeur, ces fissures atteignent toute la profondeur de l'échantillon.

En plus, on note que les fissures secondaires sont formées à partir de la fissure principale selon un angle de 90° .

En fait, cette interaction se fait via le champ des contraintes mécaniques (Lachenbruch, 1962; Morris et al., 1992). En l'absence de fissures, le champ de contraintes est homogène. Les fissures existantes permettent le relâchement des composantes des contraintes qui leur sont perpendiculaires, la composante parallèle n'étant que peu affectée. Quand une nouvelle fissure entre dans le voisinage d'une ancienne, elle commence à être influencée par cette dernière. La nouvelle fissure se propage dans la direction qui lui permet le plus important relâchement de contraintes et donc elle change d'orientation et rejoint l'ancienne à angle droit. Ceci est conforme aux résultats obtenus par Vogel et al. (2005a), Péron et al. (2009b), Yesiller et al. (2000) et Tang et al. (2008) sur des matériaux argileux en cours de retrait.

Quant à la fissure principale, on note l'élargissement important pour la succion la plus élevée; ce qui est logique car une succion importante désigne une dessiccation prononcée et les contraintes de traction s'accroissent avec la progression de la dessiccation. Ce qui favorise la perte de cohésion entre les particules du sol et l'élargissement des fissures.

Influence des fissures

Une comparaison entre le comportement des échantillons intacts et fissurés montre :

- Les échantillons dont la surface est intacte montre un taux de retrait supérieur à celui observé pour les échantillons dont la surface est fissurée. Le phénomène de retrait volumique qui n'a pas tellement été observé pour les argiles fissurées dénote une différence de comportement entre les deux matériaux. Ce comportement est la conséquence de la présence de la surface verticale fissurée qui constitue un plan de faiblesse et qui engendre un gradient d'humidité plus important dans cette zone. Ce gradient d'humidité peut s'opposer à la diminution de volume du sol lors de séchage et ainsi favoriser la création de fissures (Hueckel, 1992).

- Pour tous les échantillons, le séchage de la surface n'a pas été uniforme. Avec le temps, on distinguait des zones déjà sèches et des zones encore humides. Dans le cas des échantillons intacts, la progression du séchage surfacique a commencé sur les bords puis s'est propagée vers le centre. Alors que pour les échantillons fissurés, la progression du séchage surfacique a commencé au centre à partir de la zone fissurée puis s'est propagée vers le centre. Ainsi dans tous les cas, il existe des gradients de teneur en eau au sein de l'échantillon.

- Les fissures créées peuvent altérer les caractéristiques géotechniques du sol. Les fissures forment des chemins favorisant l'écoulement de l'eau au travers du sol.

De nouvelles surfaces d'évaporation sont créées; Ainsi l'eau peut s'évaporer, non plus de la surface du sol seulement, mais encore à partir des nouvelles fissures. Ceci entraîne une contribution importante et non négligeable des fissures secondaires (cas des échantillons fissurés), et de la surface rétractée aux bords (cas des échantillons initialement intacts) au phénomène d'évaporation et accélère la vitesse du séchage.

C'est ainsi qu'on ne pourra plus utiliser la nomenclature d'« échantillons intacts » pour ces sols comme ils ont subi des fissurations au cours de l'essai. Ainsi, pour la suite de notre analyse, ces échantillons seront désignés par « échantillons initialement intacts ».

Avant l'imposition de la succion

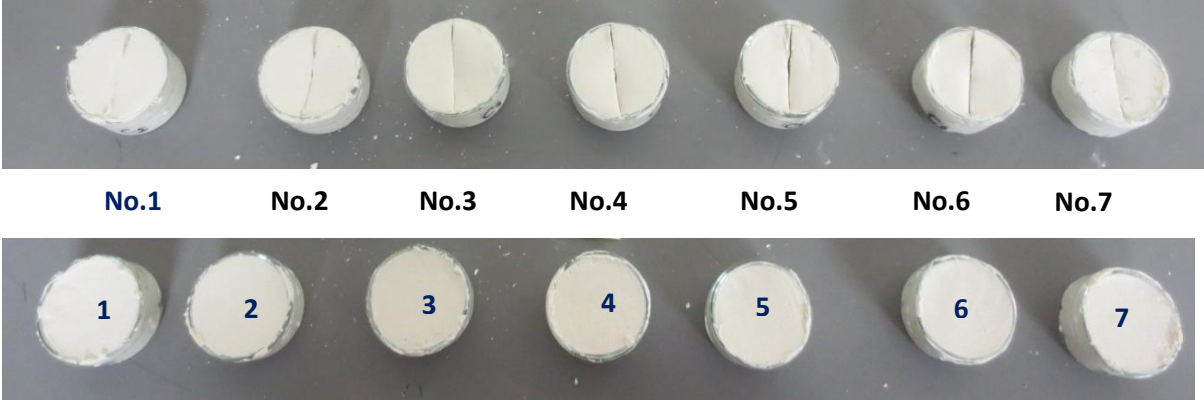
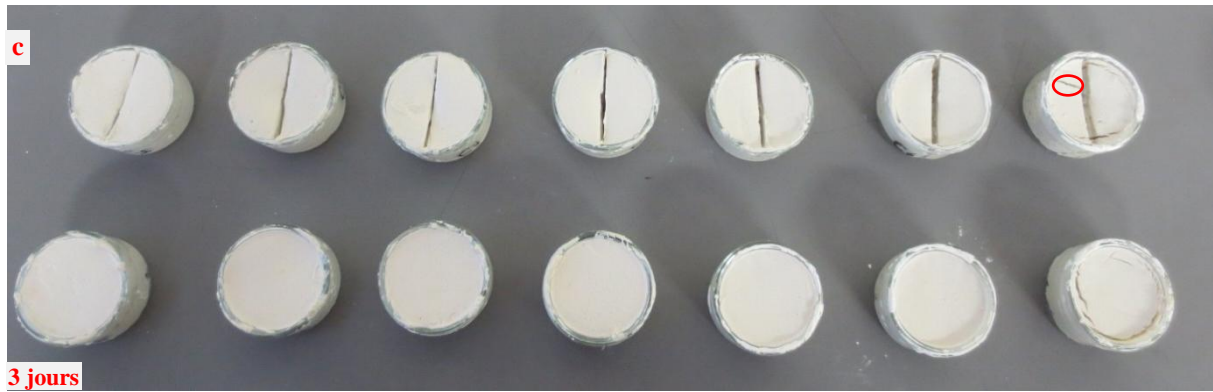


Figure 2.11: Echantillons du sol avant l'imposition de la succion

Ψ : 2830	6940	9800	39000	83400	148000	296000
---------------	------	------	-------	-------	--------	--------



Ψ : 2830 6940 9800 39000 83400 148000 296000



Ψ : 2830	6940	9800	39000	83400	148000	296000
---------------	------	------	-------	-------	--------	--------

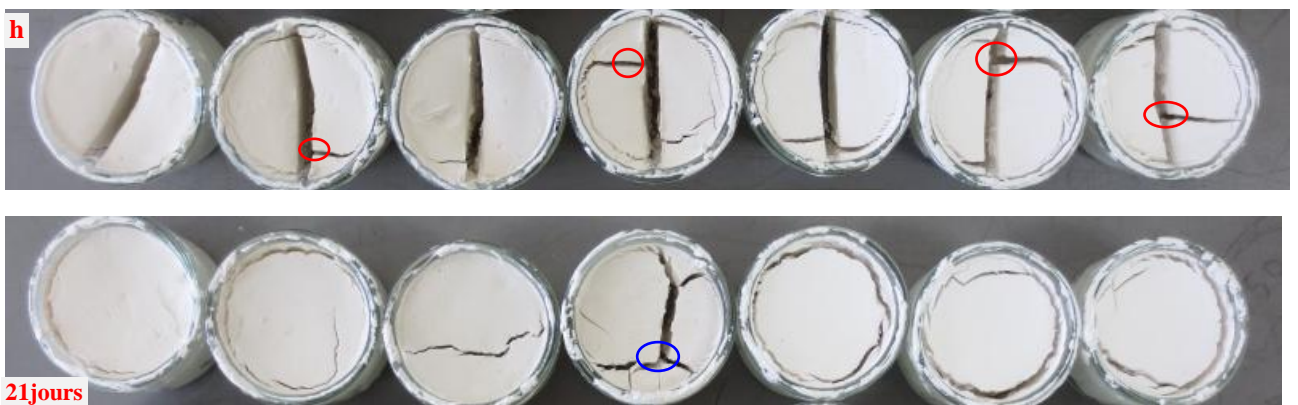
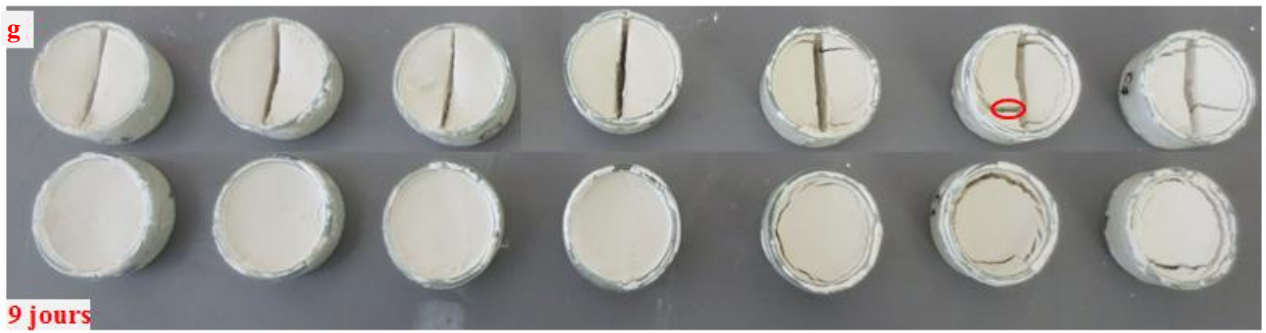
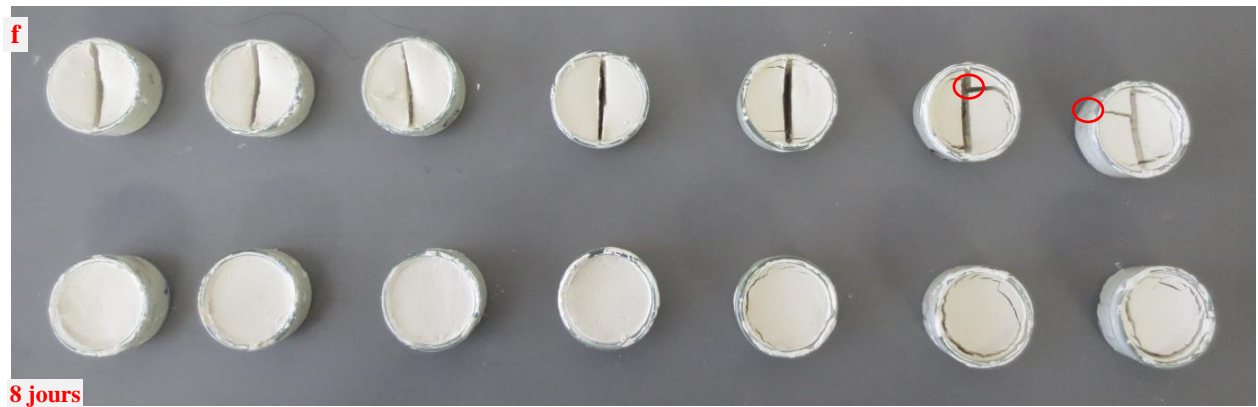


Figure 2.12: Evolution de la déformation dans les échantillons du sol au cours de la dessiccation: (a) après 1 jour, (b) après 2 jours, (c) après 3 jours, (d) après 4 jours, (e) après 7 jours, (f) après 8 jours, (g) après 9 jours, (h) après 21 jours

Evolution de la teneur en eau

L'évolution de la teneur en eau des échantillons intacts soumis aux différentes valeurs de la succion (succion en kPa) est présentée sur la figure 2.13.

On note que la désaturation des échantillons soumis à hautes pressions s'amorce dès le premier jour d'une façon considérable. Une variation importante de la teneur en eau est observée pour les succions supérieures à 39MPa (partie droite encerclée dans la figure 2.13). Contrairement aux cas des fortes succions, cette variation est beaucoup moins prononcée dans le cas où la succion appliquée est faible (partie gauche encerclée). Autrement dit qu'une augmentation de la succion appliquée entraîne une perte en eau est plus importante augmentant ainsi la cinétique de séchage et l'écoulement d'eau.

La figure 2.14 montre la variation de la teneur en eau (ou la cinétique de séchage) pour les sept échantillons. Ces résultats mettent en évidence le rôle joué par la succion dans le transfert hydrique dans le massif de sol. L'allure graduelle décroissante des courbes montre que la teneur en eau dans chaque échantillon décroît avec le temps, avec un temps de stabilisation plus long pour les faibles succions. On note qu'après 10 jours, la teneur en eau passe de l'état initial 80% à 68% pour sous une succion 2.83 MPa. Sous une succion de à 148 MPa, la teneur en eau atteint 32% (une diminution donc de 60%).

La diminution de la teneur en eau se poursuit de façon progressive jusqu'à atteindre la valeur résiduelle et tend à se stabiliser lorsque la teneur en eau atteint cette limite. C'est ainsi qu'on observe que les courbes se rapprochent et tendent à converger pour des succions supérieures à 148 MPa.

Ces résultats montrent que le temps de stabilisation diminue lorsque la succion augmente. La stabilisation de la teneur en eau est atteinte après environ 10 jours pour une succion 296 MPa, après 13 jours pour une succion 148 MPa. Cela explique le palier quasi-horizontal observé dans la figure 2.14. Dans le domaine des faibles succions, la diminution de la teneur en eau est plus lente. Pour les plus faibles succions, on note une diminution continue de la teneur en eau jusqu'à la fin de l'essai.

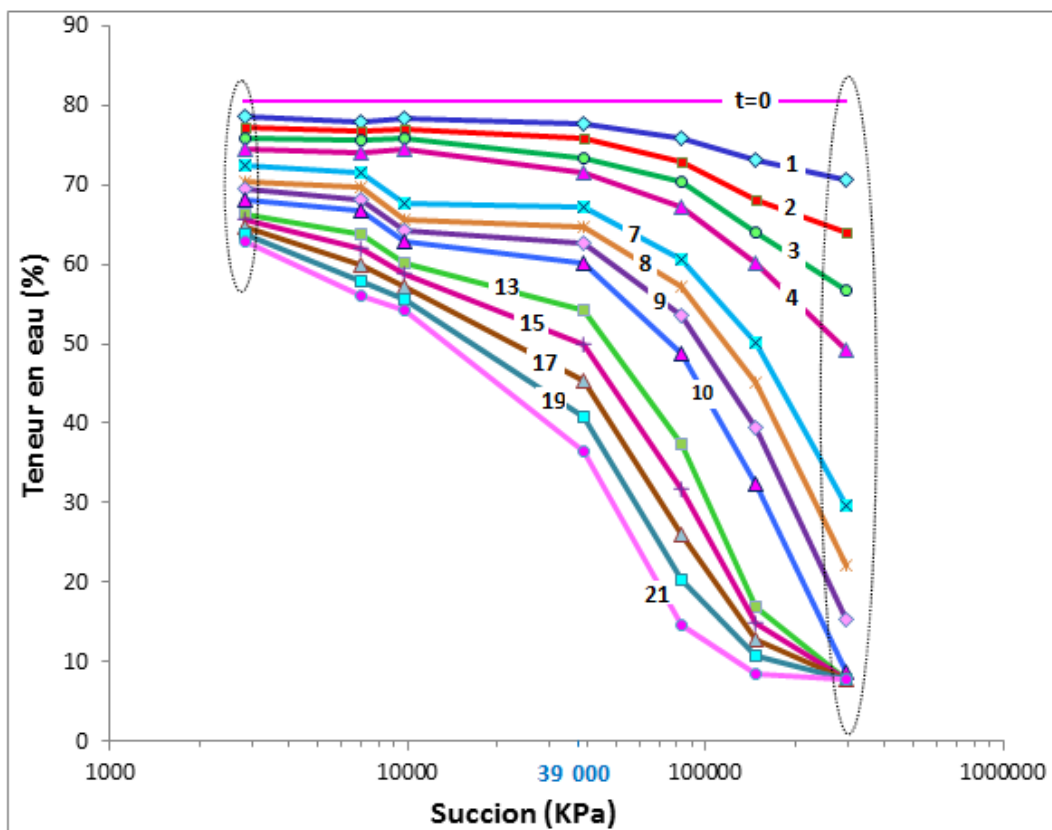


Figure 2.13: Variation de la teneur avec la succion (échantillons intacts)

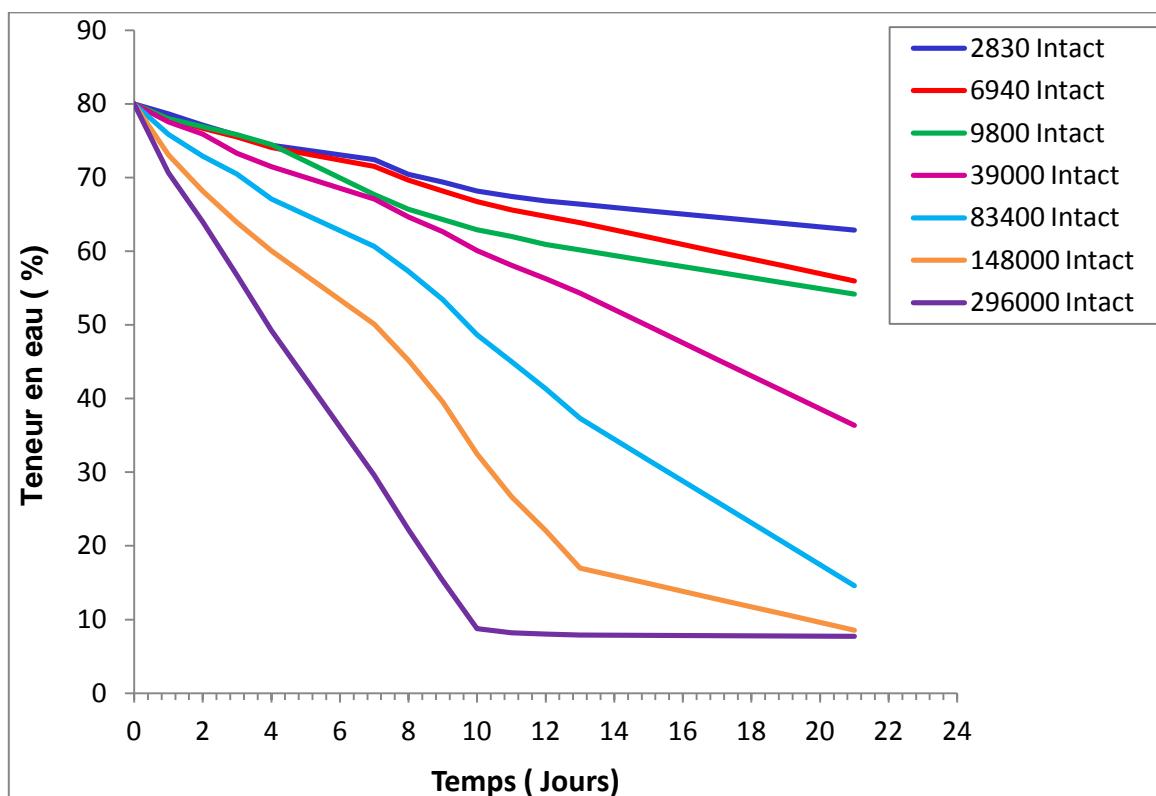


Figure 2.14: Variation de la teneur en eau au cours du séchage (échantillons intacts)

Influence des fissures sur les propriétés de l'argile

La figure 2.15 présente les courbes de séchages des échantillons intacts et fissurés. Pour les échantillons fissurés, on retrouve le même comportement que celui des échantillons intacts mais avec une cinétique de séchage plus rapide dans le cas du sol fissuré. La teneur en eau dans les échantillons fissurés diminue linéairement au cours de séchage dans la première partie, puis tend à se stabiliser une fois la teneur en eau atteint sa valeur résiduelle. En examinant les résultats, on constate que la fissuration a augmenté fortement les pentes des courbes de séchage par rapport aux courbes données dans la figure 2.15 et ceci pour toutes les succions imposées indiquant une vitesse de séchage plus importante en présence des fissures. La présence des fissures accélère le mécanisme de déshydratation et par conséquent le phénomène du retrait dans le sol argileux. Il en résulte une réduction plus importante de la teneur en eau pour une même valeur de la succion.

Une comparaison entre les courbes de séchage des échantillons intacts et fissurés sous faibles succions montre des variations significatives de la teneur en eau dans ce domaine. Ces variations augmentent avec le temps et restent significatives jusqu'à la fin de l'essai (après 21 jours) montrant ainsi qu'un transfert hydrique plus important s'est produit suite à la présence de la fissure. En effet, ce comportement est fortement lié à l'équilibrage du sol. Comme ces échantillons n'ont pas encore atteint l'état d'équilibre, la teneur en eau continue à décroître avec le temps. Une perte en eau plus élevée pour les échantillons fissurés est enregistrée montrant ainsi l'influence de la fissuration sur le comportement du sol lors de séchage. En fait, l'argile retient moins l'eau en présence des fissures. Ces résultats montrent par la suite un taux d'évaporation plus fort et plus accentué dans le cas des sols fissurés tant que la stabilisation n'est pas encore atteinte.

Fait remarquable peut être observé aussi à partir de ces résultats, la différence des teneurs en eau pour les derniers jours de succion est plus marquée pour les échantillons soumis aux faibles succions. Cela s'explique par le fait que sous fortes succions, on a observé l'apparition des fissures dans les échantillons initialement intacts. Comme déjà mentionné dans le paragraphe

précédent, ces déformations dans le sol augmentent considérablement la surface d'évaporation dans ces échantillons. L'évaporation se produit ainsi de toute la surface supérieure des échantillons et en plus de la surface des fissures développées; entraînant donc une perte d'eau encore plus importante. C'est ainsi que l'écart diminue lorsque la valeur de la succion imposée augmente.

L'observation des résultats sur la figure 2.15 montre une certaine différence de la teneur en eau résiduelle sous conditions intactes et fissurées. Mais, l'examen de ces résultats indique que cette différence n'est pas significative. Elle est de l'ordre de 2%. La teneur en eau obtenue à l'équilibrage est sensiblement plus faible pour le cas des échantillons fissurés. A la fin du séchage, pour les succions imposées de 296 MPa et 148MPa, la teneur en eau finale est de 5% pour les échantillons fissurés et de 7 % pour les échantillons intacts. Cette observation montre que la teneur en eau résiduelle, au-delà de laquelle il n'y aura plus une perte en eau supplémentaire n'est plus affectée par la présence des fissures une fois l'équilibre est atteint.

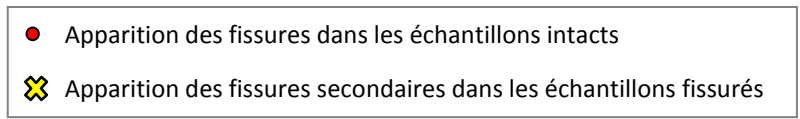
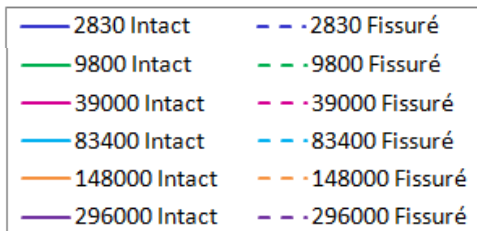
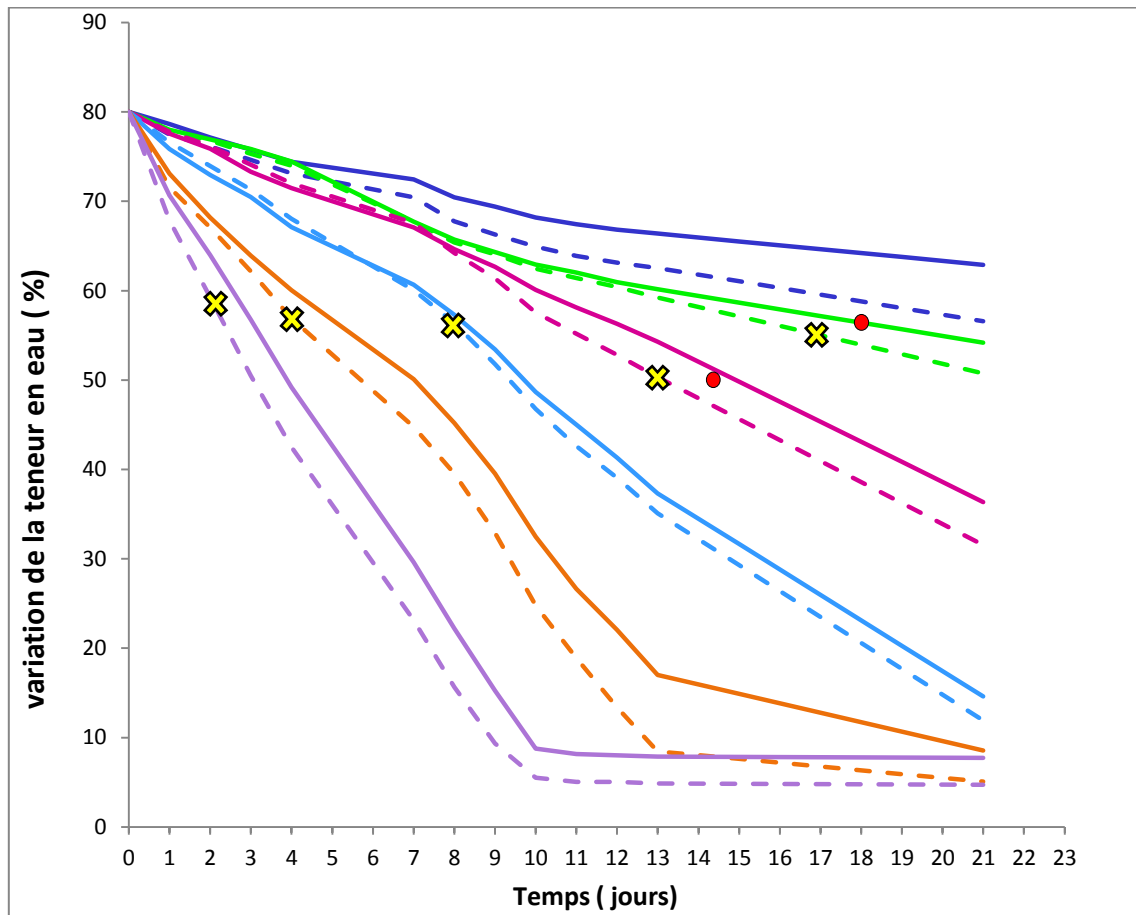


Figure 2.15: Variation de la teneur en eau des échantillons intacts et fissurés durant les 21 jours d'essais

Influence des fissures sur les courbes de rétention

La figure 2.16 montre l'influence des fissures sur la courbe de rétention déterminée à la fin des essais. On note que la courbe de rétention du sol fissuré est très proche de celle du sol intact. L'écart entre les deux courbes est très faible montrant ainsi la même capacité de rétention pour les sols fissurés et intacts. En fait, la fissuration influence la cinétique de séchage mais n'affecte pas le massif du sol. La présence des fissures accélère la vitesse de séchage et le sol atteint la teneur en eau finale en premier; ce qui fait que le sol atteint la phase de stabilisation hydrique plus rapidement. La teneur en eau à l'équilibre n'est pas affectée par la présence des fissures. Ces résultats sont en accord avec les résultats trouvés dans la littérature (Fredlund et al., 2010; Jacquemin, 2011).

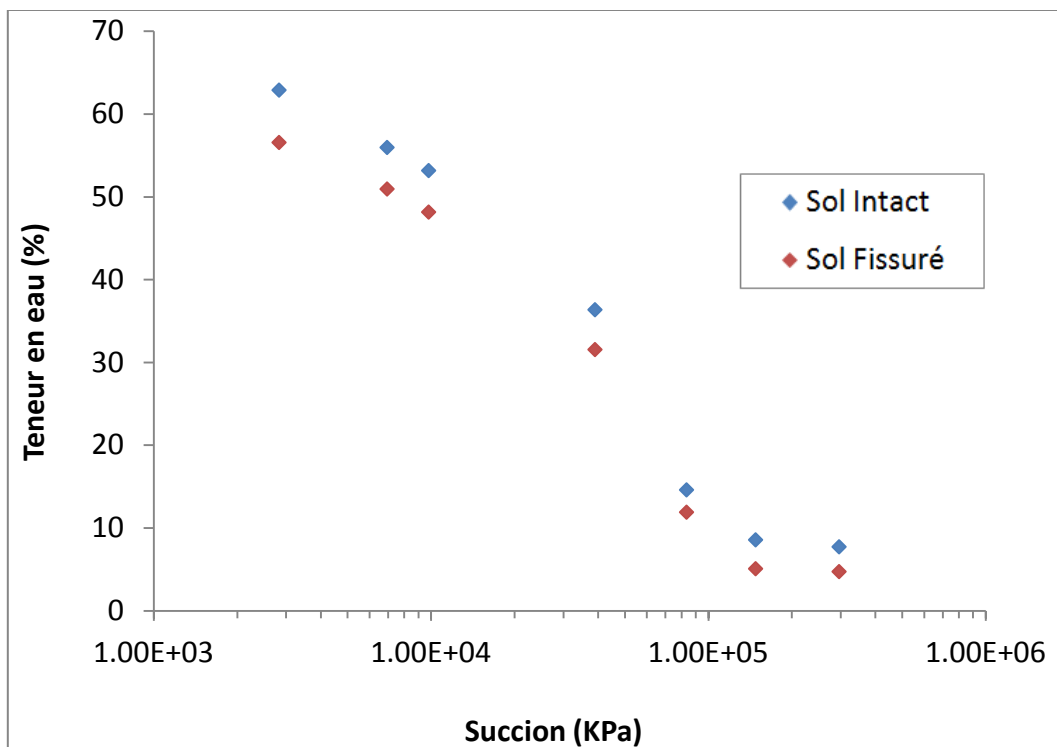


Figure 2.16: Influence des fissures sur la courbe de rétention de l'eau

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les résultats d'une étude en laboratoire sur l'influence des fissures sur le séchage des sols argileux. Les essais ont été réalisés sur la Kaolinite au laboratoire de l'université 'Ashikaga Institute of Technology' au Japon. Le comportement du sol a été étudié dans une gamme de succion très étendue, allant de la saturation jusqu'à plusieurs centaines de MPa. A cette fin, deux techniques de contrôle de succion ont été employées: technique de translation d'axes pour les faibles succions et la technique des solutions salines pour les fortes succions.

Les résultats des essais de séchage réalisés montrent que:

- Les échantillons du sol fissurés subissent d'abord un retrait faible suivi d'un développement de fissures secondaires à partir de la fissure initiale. La phase de retrait est très courte et le développement des fissures domine le comportement du sol.
- La présence des fissures induit une augmentation importante de la vitesse de perte d'eau. Les pentes des courbes de perte d'eau augmentent avec la fissuration indiquant un taux d'évaporation plus important.
- La courbe de rétention n'est pas affectée par la présence des fissures.

Chapitre 3: MODELISATION NUMERIQUE

3.1. Introduction

Ce chapitre comporte quatre parties. La première est consacrée à la présentation du modèle d'interaction sol-atmosphère et son implantation dans le code de calcul aux éléments finis 'ESNA' développé dans notre laboratoire par Al-Qadad (2009). Ce code est basé sur les travaux de Wilson et al. (1990). Il prend en compte les transferts couplés d'humidité (eau liquide et vapeur) et de chaleur. On passe ensuite aux simulations numériques correspondant à un épisode de sécheresse. Un modèle d'interaction sol-atmosphère est utilisé pour étudier l'évolution du profil hydrique dans un sol argileux soumis aux conditions climatiques. Ce phénomène est d'abord étudié pour un sol intact. Puis, l'étude est élargie à un sol fissuré. Une comparaison entre les résultats du sol intact et fissuré est effectuée afin de montrer l'effet de la présence des fissures sur le comportement hydrique et thermique des sols fins.

Dans la deuxième partie, on propose une nouvelle approche permettant de prendre en compte la présence des fissures dans la modélisation de l'échange sol-atmosphère d'une façon simplifiée. La validation de cette approche est également présentée.

La troisième partie concerne l'étude de l'interaction sol-structure sous l'effet de la succion induite par l'échange atmosphérique. L'étude est réalisée pour des sols intacts et fissurés ce qui permet de cerner l'effet de fissuration.

La dernière partie de ce chapitre montre une application sur un modèle mécanique sur le logiciel en différences finies Flac3D tout en intégrant le couplage hydro-thermique. Ce modèle permet d'étudier le tassement de la couche de sol sous l'effet induit par la succion. L'impact de la fissuration est également étudié.

3.2. Modèle numérique

Le modèle numérique a été implanté dans le programme de code de calcul aux éléments finis (ENSA), qui a été développé dans notre laboratoire pour l'analyse des transferts thermo-hydriques dans les sols non saturés (Al-Qadad, 2009). Ce programme permet d'estimer les variations de la teneur en eau, de la succion et de la température induites par des changements climatiques. Le modèle numérique traite les transferts d'eau et de chaleur couplés avec l'évaporation. Les deux transferts sont couplés à travers la pression de vapeur d'eau P_v . Le mouvement de l'eau et le transfert de chaleur dans le sol sont décrits de façon couplée à l'aide d'un schéma implicite.

3.2.1 Transferts thermo-hydriques

L'évaporation induit un flux d'eau entre le sol et la surface. Le flux d'eau est accompagné d'un flux de chaleur; le sol peut présenter des changements de volume sous les effets combinés de la succion et de la température. Afin de simplifier ce problème complexe, le sol est généralement considéré comme non déformable (Wilson et al., 1994). La relation entre les variations de la teneur en eau et de la succion est supposée gouvernée par l'expression suivante (Wilson et al. 1994)

$$\frac{\Delta V_m}{V} = m_2^w d(u_a - u_w) \quad [3.1]$$

m_2^w désigne la pente de la courbe de rétention qui exprime la relation entre la teneur en eau volumique et la succion.

3.2.1.1 Transfert hydrique

Conservation de la masse

Le flux d'eau comprend deux parties: le flux d'eau liquide q_l et le flux en phase vapeur q_v .

- Le transfert d'eau en phase liquide est décrit par la loi de Darcy généralisée:

$$q_l = - \left[K \frac{\partial h_w}{\partial y} \right] \quad [3.2]$$

La charge hydraulique est définie par :

$$h_w = \left(y + \frac{-S}{\gamma_w} \right) \quad [3.3]$$

- q_l : flux d'eau liquide (m/s)
- h_w : charge hydraulique (m)
- K : coefficient de perméabilité (m/s) qui est fonction de la succion
- S : succion (kPa)
- γ_w : poids volumique de l'eau (kN/m³)
- y : cote altimétrique (m)

- Le transfert de vapeur dans un sol non saturé est décrit par la formule de Philipe et de Vries (1957) :

$$q_v = \frac{-1}{g\rho_w} \left[D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right] \quad [3.4]$$

- q_v : flux de vapeur d'eau (m/s)
 - D_v : diffusivité de la vapeur d'eau dans le sol
- $$D_v = \alpha(1 - S_r)nD_{vap} \frac{W}{RT} \quad (\text{Kg.m/N.s}) \quad (\text{Wilson, 1990}) \quad [3.5]$$
- α : coefficient de tortuosité du sol
 - S_r : degré de saturation
 - n : porosité du sol
 - $(1 - s_r)n$: porosité occupée par l'air
 - D_{vap} : diffusivité moléculaire de la vapeur d'eau dans l'air
 - W : poids molaire de l'eau (0,018 KN/mol)
 - R : constante des gaz parfaits (8,314 J/mol.°K)
 - T : température absolue (°K)
 - P_v : pression partielle de vapeur d'eau (KPa)

Lai et al. (1976) et Wilson et al. (1994) ont suggéré de prendre le coefficient de tortuosité du sol égal à $[(1 - S_r)n]^{2/3}$. Ils ont adopté l'expression suivante pour D_{vap} (Kimball et al. 1976) :

$$D_{vap} = 0.229 * 10^{-4} \left[1 + \frac{T}{273} \right]^{1.75} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad [3.6]$$

- Le flux total est la somme des flux liquide (q_l) et de vapeur (q_v) :

$$q = q_l + q_v \quad [3.7]$$

En égalisant la divergence du flux total de l'eau avec le différentiel du temps de la teneur en eau volumique $\Delta V_w / V$ (Eq. 2.1) et en négligeant le changement de la contrainte verticale et de la pression d'air (σ_y et u_a constantes), Wilson et al. (1994) ont obtenu l'équation uni-dimensionnelle suivante pour le transfert d'eau liquide dans un sol non saturé:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial (\frac{S}{\rho g} + y)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) = \rho g m_2^w \frac{\partial S}{\partial t} \quad [3.8]$$

La généralisation de cette équation donne :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \left(\frac{S}{\rho g} + y \right)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \left(\frac{S}{\rho g} + y \right)}{\partial y} \right) = \rho g m_2^w \frac{\partial S}{\partial t} \quad [3.9]$$

- P_v : pression partielle de la vapeur d'eau (KPa)
- K_x, K_y : coefficient de perméabilité du sol dans les deux directions x et y
- m_2^w : pente de la courbe de rétention qui exprime la relation entre la teneur en eau volumique et la succion (1/kPa)

Courbe de rétention d'eau (CRE)

La relation proposée par Van Genuchten (1980) est retenue :

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + (a_s S)^{n_s}} \right]^{m_s} \quad [3.10]$$

La figure 3.1-a présente la courbe caractéristique de sol décrite par cette relation avec:

$\theta_r = 0.02$, $\theta_s = 0.45$, $a = 0.0001$, $n = 0.7$ et $m = 0.6$.

Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique est décrite par le modèle de Fredlund et al. (1994) et Leong and Rahardjo (1997) décrit dans le premier chapitre :

$$K = \frac{K_s}{\left\{ \ln \left(e + \left(\frac{S}{a} \right)^n \right) \right\}^{mp}} \quad (\text{m/s}) \quad [3.11]$$

La courbe de perméabilité est donnée dans la figure 3.1-b avec les paramètres suivants:

$K_s = 0.0003$ m/s, $a = 9.5$, $n = 25$, $m = 2.75$ et $p = 1.5$.

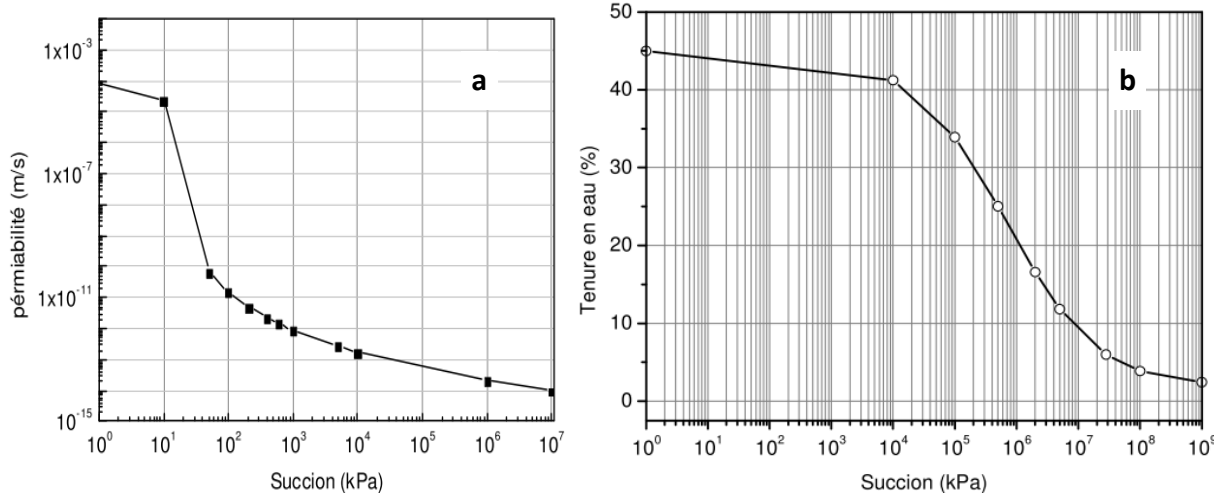


Figure 3.1: a) Courbe de la perméabilité ; b) Courbe caractéristique du sol

Pression de la vapeur du sol

La pression de vapeur peut être déterminée par le produit de la pression de vapeur saturante à la température de la surface et l'humidité relative à la surface.

$$P_v = P_{v\text{ sat}} * h_{r\text{ surf}} \quad (\text{KPa}) \quad [3.12]$$

La pression de vapeur saturante à la température de la surface peut être calculée par :

$$P_{v\text{ sat}} = 0.611 * \exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right) \quad (\text{KPa}) \quad [3.13]$$

L'humidité relative de la surface peut être calculée à partir de la succion du sol :

$$h_{r\text{ surf}} = \exp\left(\frac{\psi_w}{\rho RT}\right) \quad [3.14]$$

3.2.1.2 Transfert de chaleur

Conservation de l'énergie

Le calcul de la pression de vapeur P_v dépend de la pression de vapeur saturante et la température du sol. En couplant l'équation de flux total (éq. 3.7) et l'équation de transfert de chaleur de

Philip et de Vries, Wilson et al. (1990) ont obtenu l'équation suivante pour le transfert de chaleur dans le sol :

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(K_t \frac{\partial(T)}{\partial y} \right) + L_v \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) = \lambda_t \frac{\partial T}{\partial t} \quad [3.15]$$

La généralisation de cette équation donne :

$$L_v \frac{\partial}{\partial x} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial x} \right) + L_v \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_t \frac{\partial(T)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_t \frac{\partial(T)}{\partial y} \right) = \lambda_t \frac{\partial T}{\partial t} \quad [3.16]$$

- λ_h : capacité calorifique apparente du milieu poreux (J/m³°C)
- K_t : conductivité thermique du sol (W/m°C)
- L_v : chaleur latente de vaporisation de l'eau (J/kg)
- D_v : diffusivité de la vapeur d'eau dans le sol

Le coefficient de chaleur latente de vaporisation de l'eau est fonction de la température. La relation linéaire suivante est adoptée (Bertin et al., 1981) :

$$L_v = 4.186 \cdot 10^3 (607 - 0.7 \cdot T) \quad (\text{J/Kg}) \quad [3.17]$$

T est la température en °C.

Propriétés thermiques

Les figures 3.2-a et 3.2-b présentent les propriétés thermiques du sol. Le coefficient de chaleur spécifique est obtenu en utilisant la formule de De Vries (1963). La conductivité thermique est décrite par la formule de Van de Griend (1986) (cité par Demarty, 2001).

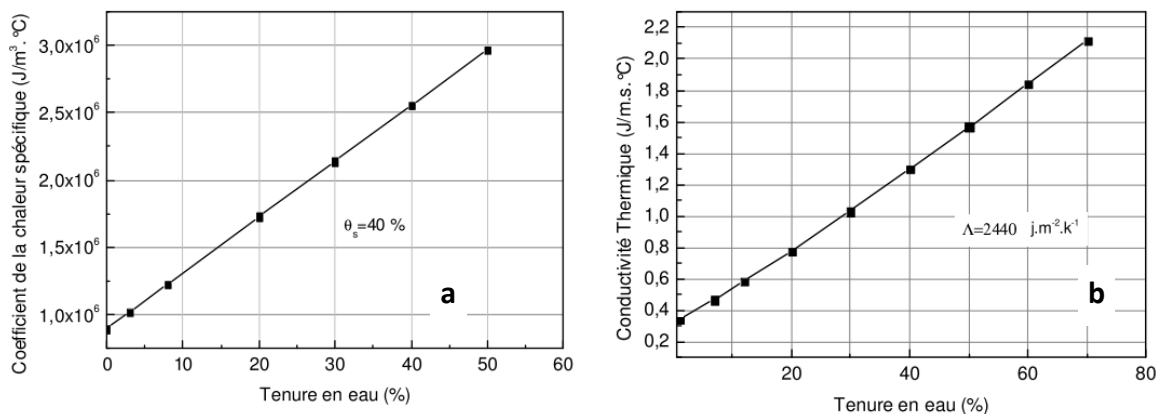


Figure 3.2: a) Coefficient de la chaleur spécifique; b) Conductivité thermique

3.2.1.3 Relation Humidité Relative - Succion

L'examen des équations de transfert de chaleur et de masse indique qu'il y a trois paramètres inconnus à savoir, la succion (S), la température (T) et la pression de vapeur (P_v). Afin de compléter le système d'équations, une troisième relation est nécessaire. Les équations (3.9) et (3.16) sont alors complétées par la relation humidité relative-succion d'Edlefsen et Anderson (1943) :

$$P_v = P_{vs} * e^{\frac{-SW}{\rho RT}} \quad [3.18]$$

En d'autre terme:

$$s = -\frac{\rho RT}{w} \ln \frac{P_v}{P_{vs}} \quad [3.19]$$

- P_{vs} : pression saturée de vapeur d'eau (kPa)
- $\frac{P_v}{P_{vs}}$: humidité relative h_r
- W: masse moléculaire d'air (kg/m³)
- R: constante de gaz
- T: température (k)
- h_{air} : humidité relative de l'air

Ces équations ont été introduites dans un code de calcul par éléments finis développé dans notre laboratoire par Al-Qadad (2009). La validation de ce programme sur des essais de colonne de sable (Wilson et al. 1990) a donné des bons résultats.

3.2.1.4 Echange sol-atmosphère

Flux d'évaporation

Le taux d'évaporation réelle (E) est déterminé par la formule de Penman-Wilson (1990) :

$$E = \frac{\Delta R_n / L_v + \eta E_a}{\Delta + \eta A} \quad (\text{mm/jour}) \quad [3.20]$$

- $E_a = f(u) P_{v \text{ air}} (B - A)$ (mm/jour)
- $f(u) = 0,35(1 + 0,146 u_2)$

- Δ désigne la pente de la courbe pression de vapeur - température:

$$\Delta = 4098 * P_{vs\ air} (T_{air} + 237.3)^2 \quad (\text{Pa}/^\circ\text{C}) \quad [3.21]$$
- R_n : radiation solaire nette entrante (W/m^2 ou $\text{J}/\text{m}^2\text{s}$)
- L_v : chaleur latente pour la vaporisation d'eau (J/kg)
- η : constante psychrométrique ($66 \text{ Pa}/^\circ\text{C}$)
- P_a : pression de vapeur d'air (KPa)
- u_2 : vitesse du vent à deux mètres du sol (km/jour)
- P_{vs} : pression de vapeur d'eau saturante (mbar)
- B : 1 / humidité relative de l'air
- A : 1 / humidité relative de la surface du sol

Pression de vapeur

La pression de vapeur dans l'air peut être calculée par :

$$P_{v\ air} = P_{vs\ air} \times h_{r\ air} \quad (\text{KPa}) \quad [3.22]$$

$h_{r\ air}$ est l'humidité relative dans l'air et $P_{vs\ air}$ est la pression de vapeur saturante qui est fonction de la température de l'air, T_{air} :

$$P_{vs\ air} = 0.611 * \exp\left(\frac{17.27 T_{air}}{T_{air} + 237.3}\right) \quad (\text{KPa}) \quad [3.23]$$

Température à la surface du sol

La température à la surface du sol est déterminée par l'équation de Wilson (1990):

$$T_s = T_a + \frac{1}{\eta f(u)} (R_n / L_v - E) \quad (^\circ\text{C}) \quad [3.24]$$

T_a : la température de l'air ($^\circ\text{C}$)

η : le coefficient psychrométrique

R_n : la radiation solaire nette entrante

L_v : chaleur latente pour la vaporisation d'eau (J/kg)

E : le taux d'évaporation réelle (mm/jour)

3.3. Analyses du phénomène de sécheresse

3.3.1 Massif de sol intact (non fissuré)

3.3.1.1 Présentation de l'exemple

Le modèle numérique a été utilisé pour étudier la réponse d'un massif sol argileux d'un mètre d'épaisseur soumis aux conditions illustrées dans la figure 3.3. Afin de simplifier l'exemple, nous avons retenu les conditions atmosphériques suivantes assumées constantes pendant 30 jours:

- un rayonnement solaire de 800W/m^2
- une température de l'air de 20°C
- une humidité relative de 60%
- une vitesse du vent (mesurée à 2m de haut) de 8 Km/h.

La figure 3.3 montre le maillage retenu. Il comporte 700 éléments triangulaires à 3 nœuds. Un raffinement du maillage est assuré à proximité de la surface du sol pour prendre en compte les fortes variations dans cette zone. Les simulations ont été réalisées en considérant plusieurs maillages afin de comparer les résultats: Les résultats obtenus dans les différents cas sont pratiquement identiques.

Conditions initiales

L'analyse a été effectuée avec les conditions initiales suivantes:

- Sol initialement saturé.
- Température uniforme de 20°C dans le massif.

Conditions aux limites

La base du massif est supposée imperméable. Les conditions à la surface du massif sont déterminées par les équations de couplage sol-atmosphère présentées dans la section 3.2.1.4.

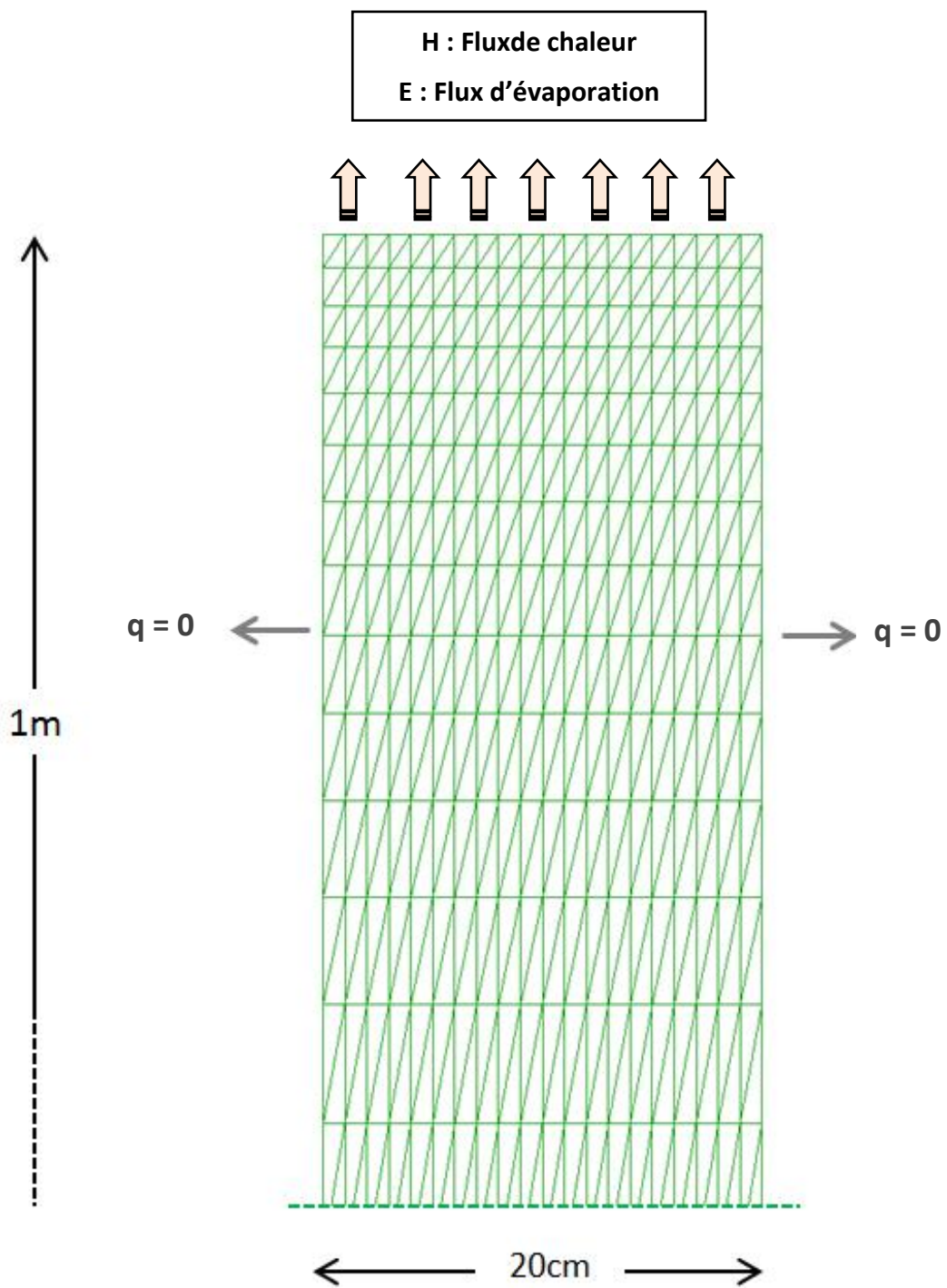


Figure 3.3: Géométrie et conditions aux limites du modèle utilisé (sol intact)

3.3.1.2 Résultats

Flux d'évaporation

La figure 3.4-a montre les variations du taux d'évaporation non cumulé. L'allure de cette courbe met en évidence les trois phases d'évaporation déjà citées dans le premier chapitre. Le flux d'évaporation cumulé est illustré dans la figure 3.4-b. On note une augmentation de ce taux pendant toute la période de dessiccation.

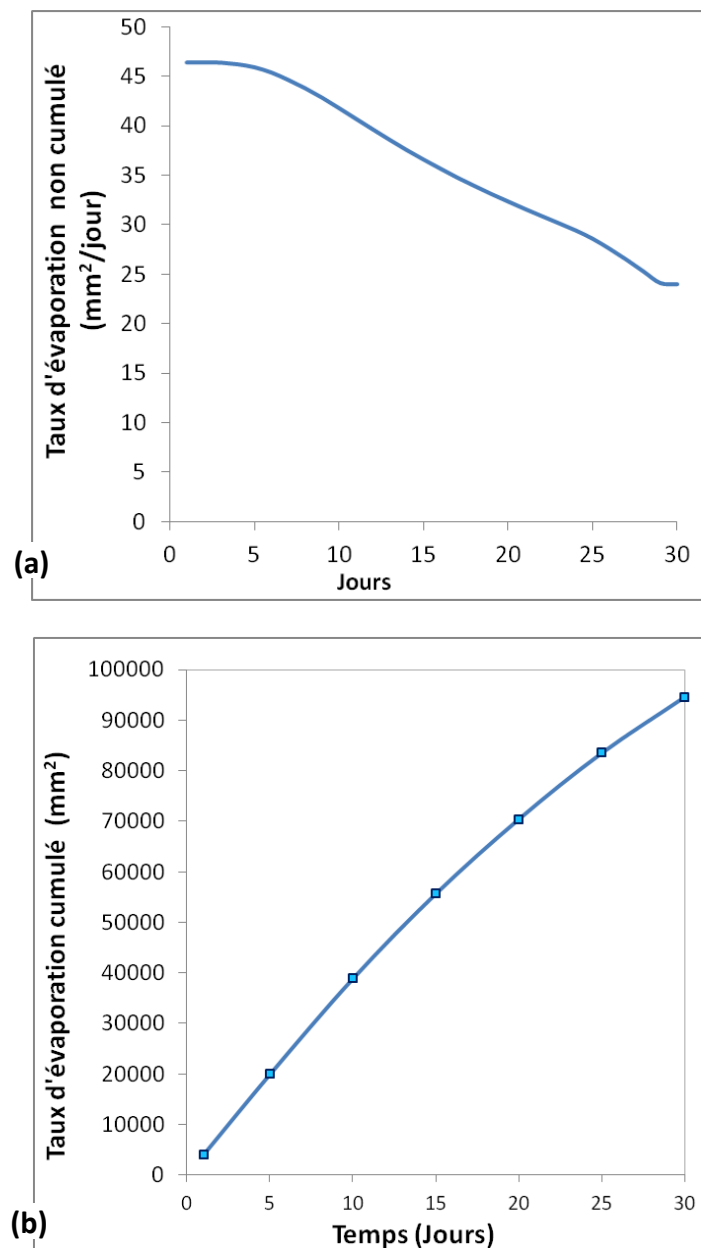


Figure 3.4: Evolution du taux d'évaporation non cumulé (a) et cumulé (b) au cours de la dessiccation

Teneur en eau

Les graphes 3.5 et 3.6 montrent les profils de succion et de teneur en eau dans le massif du sol. On note d'abord que la teneur en eau à la surface est inférieure à celle en profondeur. La teneur en eau montre une chute importante à la surface du sol: En 5 jours, elle passe de 43% à 12%.

Dix jours étaient nécessaires pour que la teneur en eau à la surface atteigne sa plus faible valeur (4%) dans les premiers 30cm de la couche du sol. Cette valeur correspond à la valeur résiduelle de la teneur en eau au-delà de laquelle, la poursuite de l'évaporation n'engendre plus de perte d'eau supplémentaire dans la couche concernée. A 10 cm de profondeur, la teneur en eau est égale à 6%. A la base du massif, elle est égale à 35%. Cette période correspond en fait à la deuxième phase du processus d'évaporation.

Puis ensuite, l'évaporation, et par conséquent la perte en eau, atteint les couches profondes. La couche présentant la teneur en eau résiduelle s'étend vers la base du modèle. Cette période correspond à la troisième phase dans le processus d'évaporation (Wilson et al., 1994).

Profil de succion

Comme le comportement du sol est gouverné par sa capacité de rétention, la variation de la succion est strictement liée à celle de la teneur en eau. La figure 3.6 montre que les zones des fortes variations de la succion correspondent à celles de fortes pertes en eau. On note également au début un gradient important de la succion dans le sol surtout dans la zone proche de la surface suite à la chute de la teneur en eau dans cette zone.

L'évaporation se poursuit, on observe ainsi un élargissement de la zone proche de la surface où la succion est très élevée. Cette couche reste de faible hauteur (20cm) pendant les 5 premiers jours. Après dix jours, son épaisseur atteint 35cm. Après 30 jours, tout le massif de sol est concerné par le phénomène de sécheresse et la succion augmente dans toute la couche du sol.

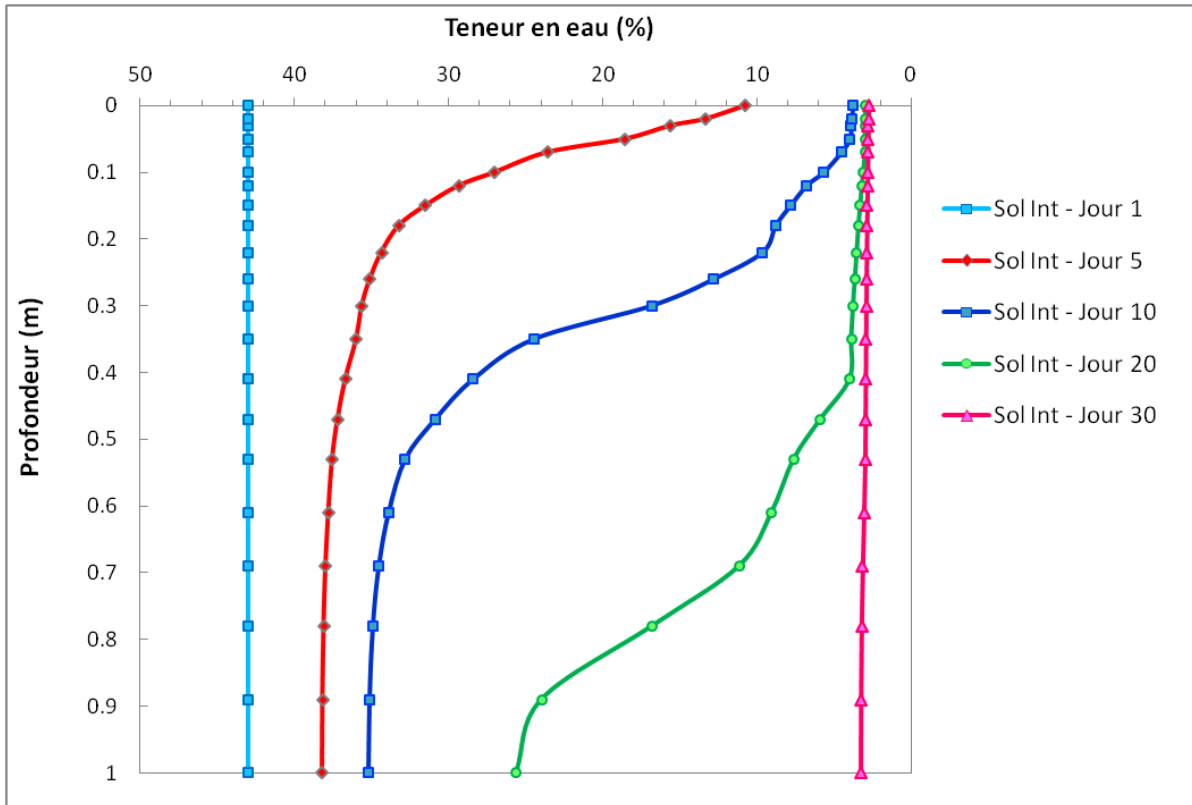


Figure 3.5: Variation de la teneur en eau d'un sol intact

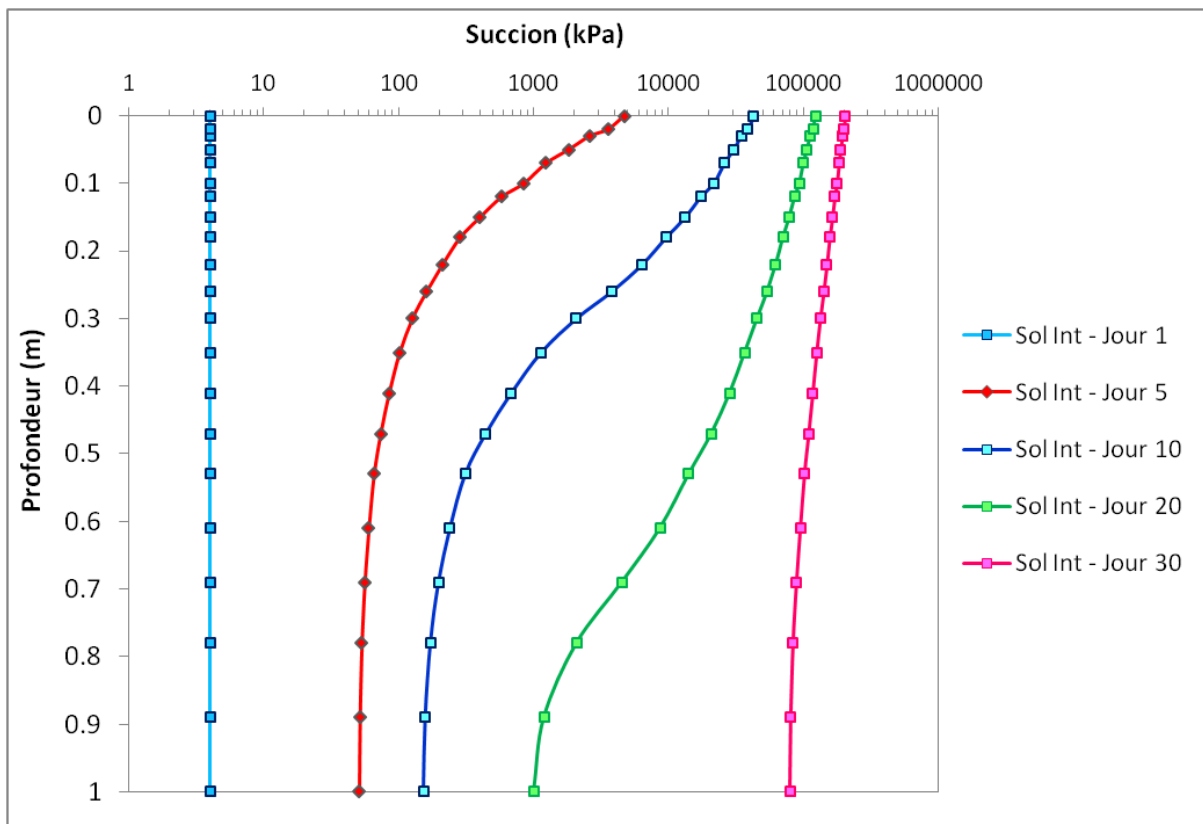


Figure 3.6: Variation de la succion dans un sol intact

La figure 3.7 présente la variation de la succion dans trois sections: à la surface, à 30cm et à 70cm de profondeur. On note une succion uniforme pendant les trois premiers jours. Ensuite, on note que la succion à la surface croit rapidement par rapport à la succion en profondeur. On note une variation importante de la succion à 30 cm de profondeur à partir du 10^{ème} jour et à partir du 20^{ème} jour à 70 cm de profondeur.

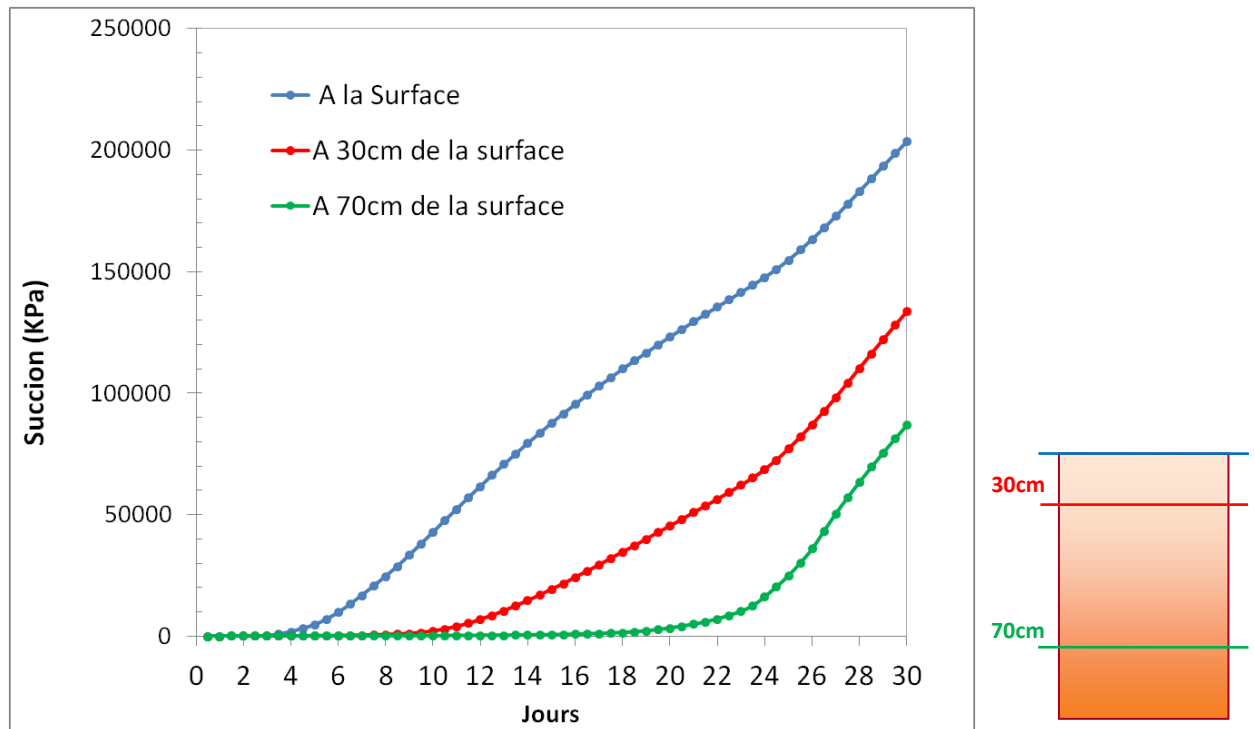


Figure 3.7 Variation de la succion pour 3 profondeurs différentes

Profil de la température

La variation de la température est illustrée dans la figure 3.8. On note que la température varie avec le temps et que cette variation est d'autant plus importante que la dessiccation est prononcée. La température est maximale dans la zone proche de la surface. En profondeur, la température ne présente pas d'importantes variations. Après 30 jours, la température tend à diminuer à la surface du sol, à cause des conditions couplées du rayonnement et de l'évaporation.

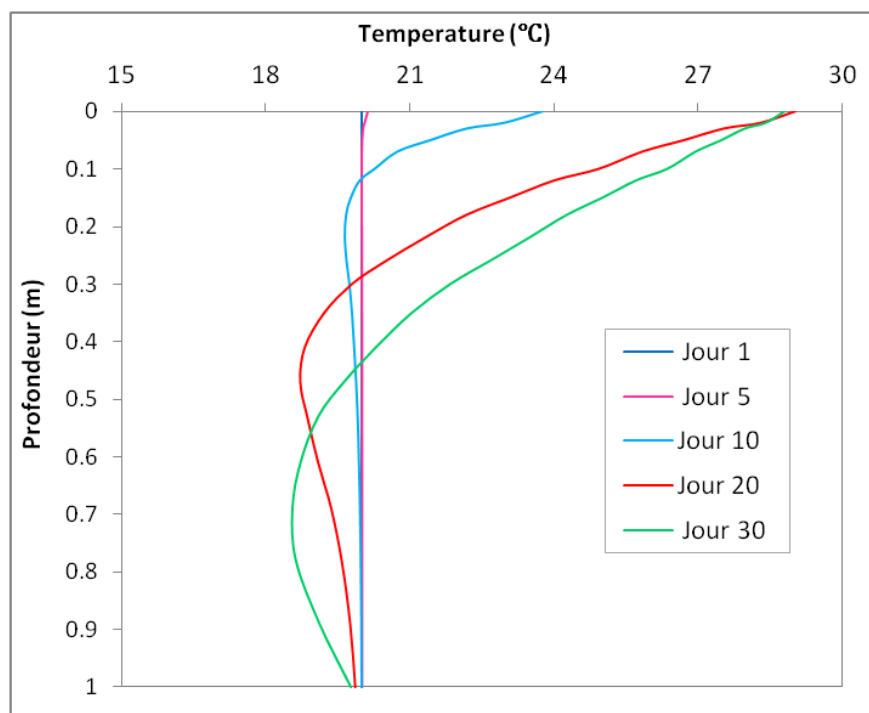


Figure 3.8 : Variation de la température dans le massif du sol soumis à la dessiccation

3.3.2 Application à un massif de sol fissuré

3.3.2.1 Présentation de l'exemple

La figure 3.9 montre l'exemple du sol fissuré traité. Le massif du sol comporte des fissures espacées de 40 cm ayant une profondeur de 5 cm et une largeur de 2 cm. Afin de prendre en compte la présence des fissures, les conditions atmosphériques sont imposées sur la surface du sol et sur la surface des fissures.

Dans un premier temps, une analyse paramétrique a été effectuée pour déterminer la profondeur du massif du sol. Des calculs ont été effectués avec trois profondeurs: 3m, 5m et 10m. Les figures 3.10 a-c illustrent les résultats obtenus. On note une influence des fissures dans le premier mètre du sol. Au-delà de cette profondeur, l'effet des fissures devient négligeable. Dans ce qui suit, les simulations seront effectuées avec un massif de sol ayant un mètre de profondeur.

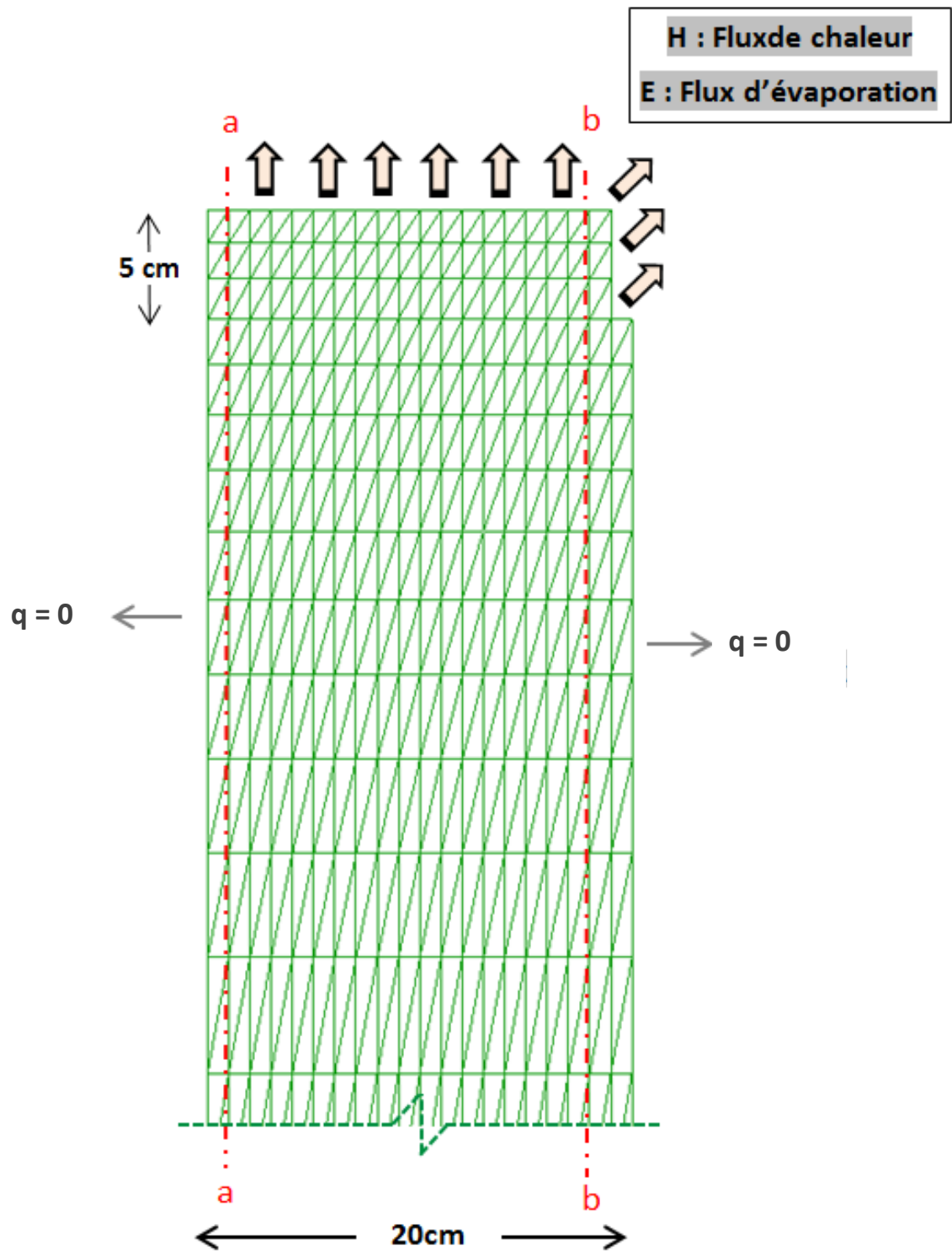
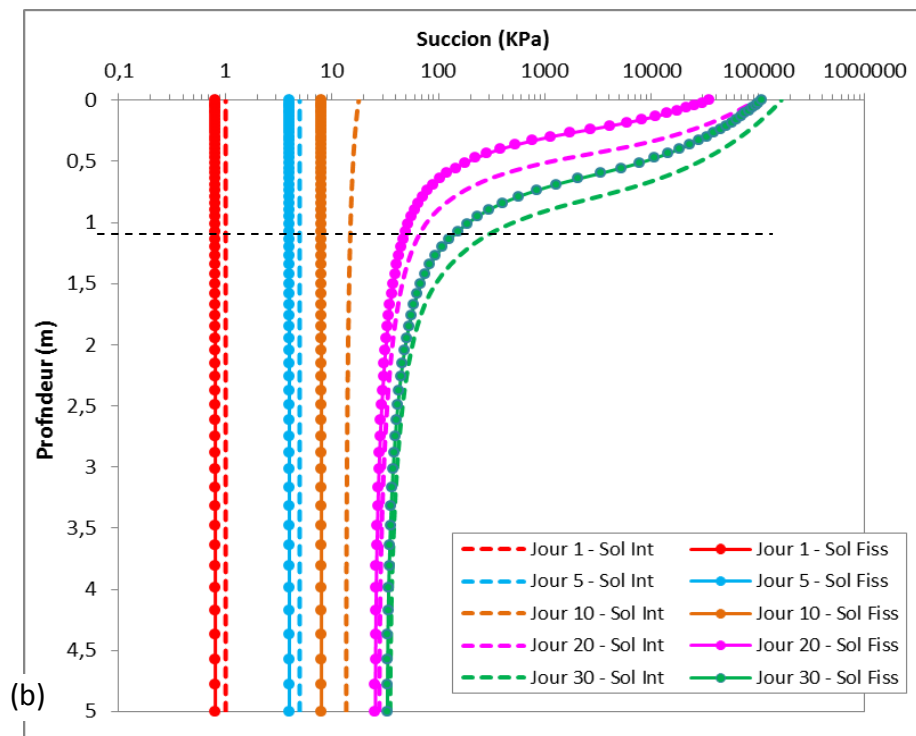
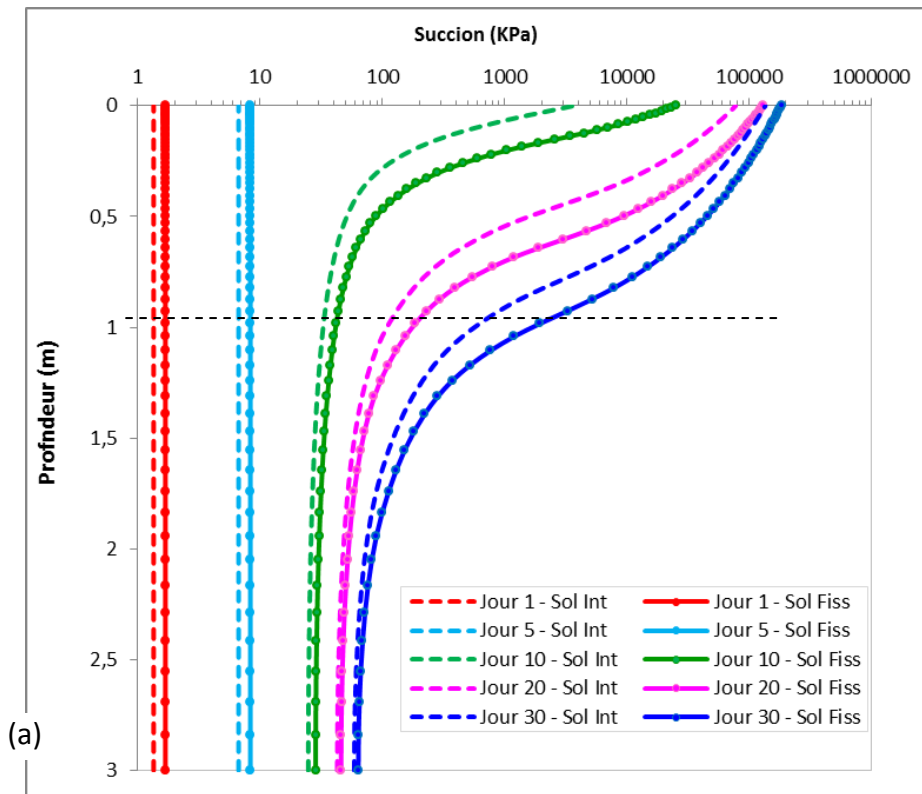


Figure 3.9: Géométrie et conditions aux limites du modèle utilisé dans la simulation du sol fissuré



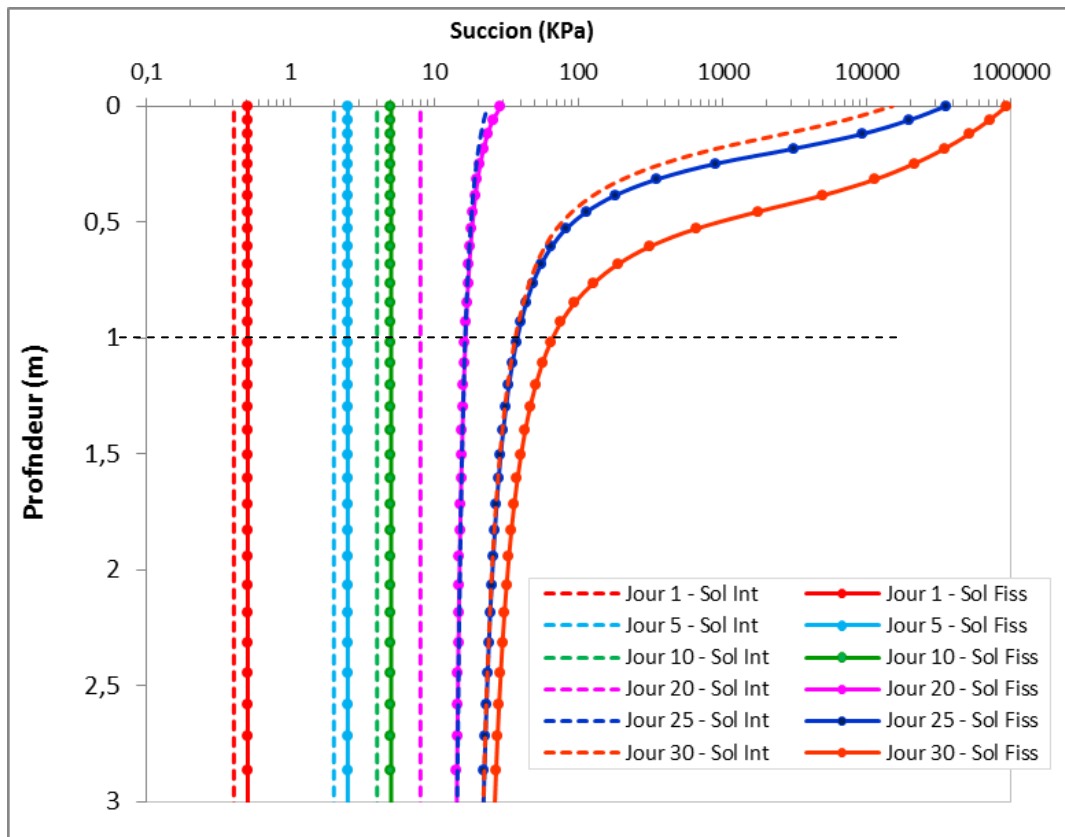
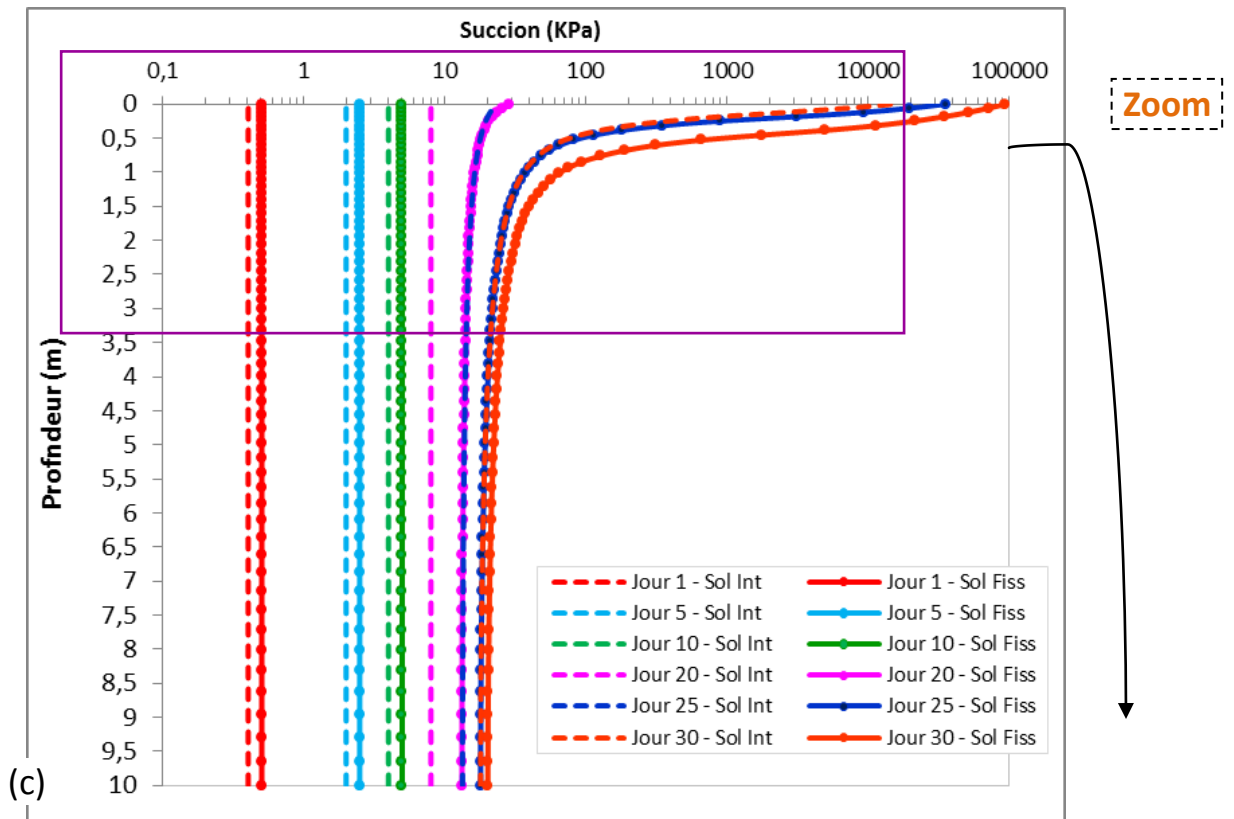
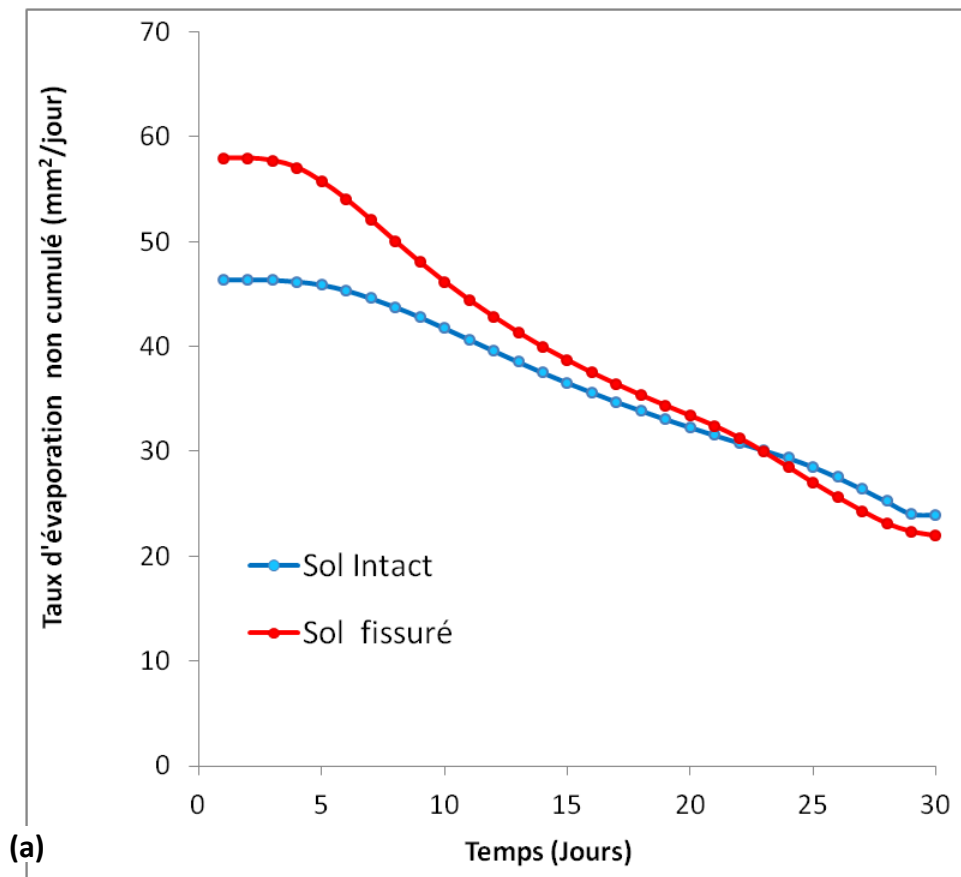


Figure 3.10: Etude de la zone influencée par es fissures pour trois profondeurs différentes du sol: 3m (a), 5m (b) et 10m (c).

3.3.2.2 Influence des fissures

La figure 3.11-a montre l'influence de la présence des fissures sur le taux d'évaporation. Au début, on note que cette présence induit une augmentation du taux d'évaporation à la surface du sol, ceci est dû à l'évaporation supplémentaire sur la surface des fissures. L'influence des fissures est très forte dans les premiers jours. Puis, elle tend à diminuer à cause de la baisse de la disponibilité d'eau dans le sol fissuré par rapport au sol non fissuré. A la fin de la période d'observation, on note un taux d'évaporation plus réduit dans le cas du sol fissuré. Cela peut être expliqué par la perte d'humidité qui augmente en présence des fissures (Figure 3.12).



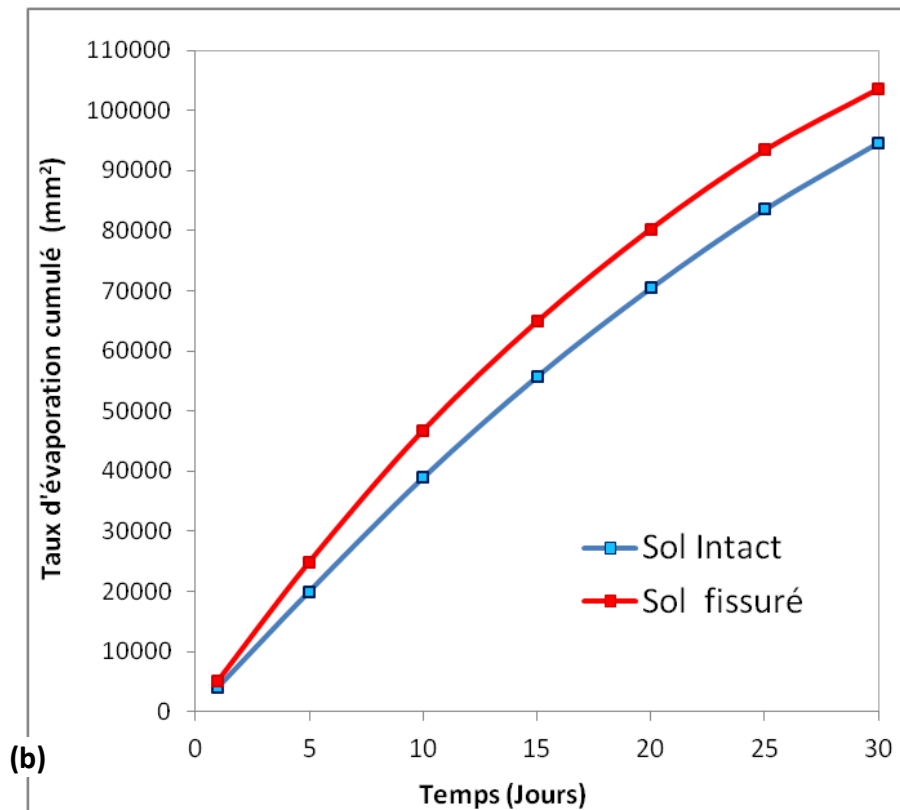


Figure 3.11: Influence des fissures sur le taux d'évaporation non cumulée (a) et cumulé (b) d'une surface intacte et fissurée soumise à la dessiccation

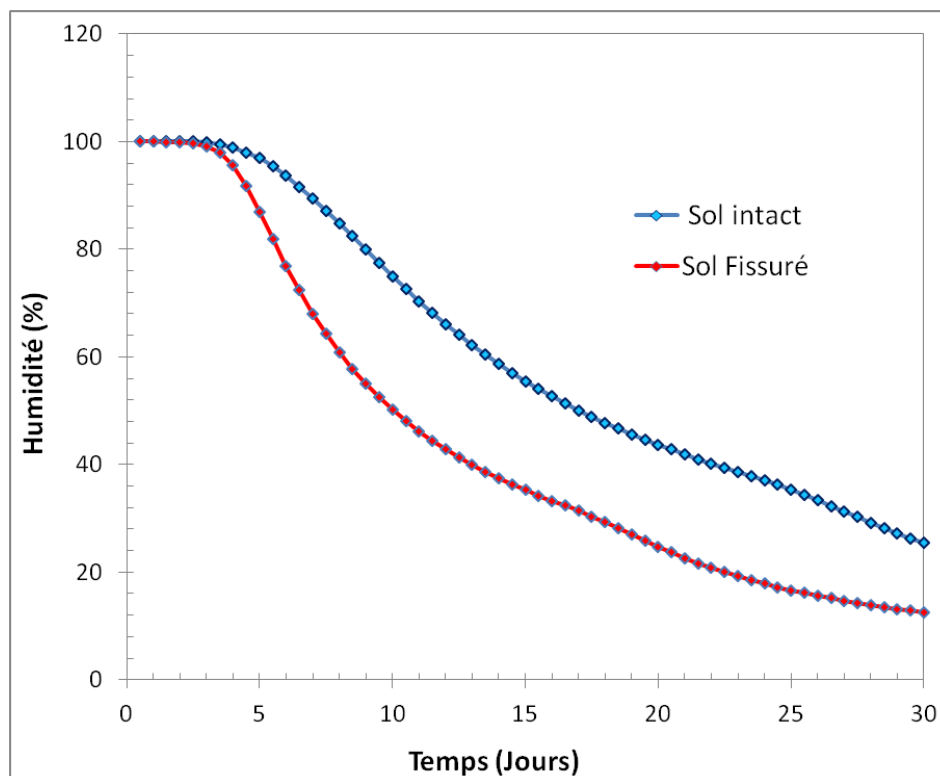


Figure 3.12: Influence des fissures sur l'humidité à la surface du sol

Teneur en eau

Les figures 3.13 a-b montrent l'influence des fissures sur le profil de la teneur en eau dans des sections verticales (a-a) et (b-b). Au début du chargement, on note que la présence des fissures fait augmenter la perte d'eau dans la couche supérieure sur une profondeur de 20 cm. Après 5 jours, la teneur en eau à 2 cm de profondeur est de 8% dans le sol fissuré, mais de 13% dans le sol intact. A 4cm de profondeur, elle est de 14% dans le sol fissuré, mais de 27% dans le sol intact. A 70 cm de profondeur, la teneur en eau est proche de 38% dans les deux cas. L'influence des fissures sur les couches profondes apparaît d'une manière progressive.

La zone fissurée se dessèche plus rapidement aboutissant à un gradient hydraulique plus important dans la couche proche de la surface du sol. Après 10 jours d'évaporation, seuls les premiers 5cm du sol intact atteignent la teneur en eau résiduelle, alors que pour le sol fissuré, les premiers 20 cm du sol atteignent la teneur en eau résiduelle.

Avec le temps, l'étendue de la zone influencée par les fissures s'élargit et les deux courbes se rejoignent à la fin des simulations. Après 20 jours, on remarque que la teneur en eau près de la base du massif est de 26% pour le sol intact et de 15% pour le sol fissuré.

Variation de la succion

Les figures 3.14.a-b montrent l'influence des fissures sur le profil de succion dans des sections verticales (a-a) et (b-b). On note dès les premiers jours une forte influence des fissures dans la couche supérieure. Après 5 jours d'évaporation, la succion à la surface du sol fissuré est pratiquement 2 fois supérieure à la succion dans le massif du sol intact. Pour une profondeur supérieure à 50 cm, les fissures ne semblent pas avoir d'influence significative.

Les variations de la succion dans le massif du sont liées à celles de la teneur en eau. Avec un sol plus sec, une énergie plus importante est nécessaire pour extraire l'eau. Ceci explique le développement important de la succion à la base du massif à partir du 20^{ème} jour. L'équilibre hydrique s'établit dans les derniers jours comme le montre la figure 3.14-a, mais toujours avec un potentiel plus important en présence des fissures.

D'autre part, une comparaison entre les résultats dans les deux sections a-a et b-b montrent que le développement de la succion devient de plus en plus important qu'on s'approche de la zone

fissurée. A titre d'exemple, on note qu'après 10 jours, la succion développée à la surface du sol est 22% plus élevée dans la section b-b que dans la section a-a. La zone proche de la fissure est d'abord affectée en premier puis l'impact des fissures s'étend horizontalement et verticalement dans le sol au fur et à mesure de la dessiccation.

Les figures 3.15 et 3.16 montrent l'influence des fissures sur la variation de la succion et de l'humidité à la surface du massif et à 50cm de profondeur. L'influence à la surface du sol est visible à partir du 3^{ème} jour; alors qu'à 50 cm de profondeur, cette influence n'apparaît qu'à partir du 13^{ème} jour.

La figure 3.17 montre l'influence de la présence des fissures sur la distribution de la succion dans le massif. On note dans le cas d'un sol fissuré, une distribution non uniforme de la succion. Des succions élevées sont concentrées au voisinage des fissures. Ensuite, on note une extension de la zone de fortes succions dans les directions verticale et horizontale. L'influence des fissures est visible dans une couche de 20 cm d'épaisseur, ce qui équivaut à 1/5 la profondeur du massif.

Valeur d'entrée d'air

Le temps nécessaire pour l'entrée d'air dans le sol constitue un paramètre important, car il peut servir à évaluer le moment à partir duquel la désaturation du sol se produit. La figure 3.18 montre l'influence des fissures sur le temps nécessaire pour atteindre la valeur d'entrée d'air (AEV) à la surface des sols. Cette valeur a été déterminée à partir de la courbe de rétention par la méthode des tangentes. On a obtenu $AEV = 4,6 \cdot 10^4$ kPa. On note que la présence des fissures réduit sensiblement le temps nécessaire pour atteindre AEV: En présence des fissures, celle-ci est atteinte après 6 jours, alors que le sol intact atteint cet état après 10 jours.

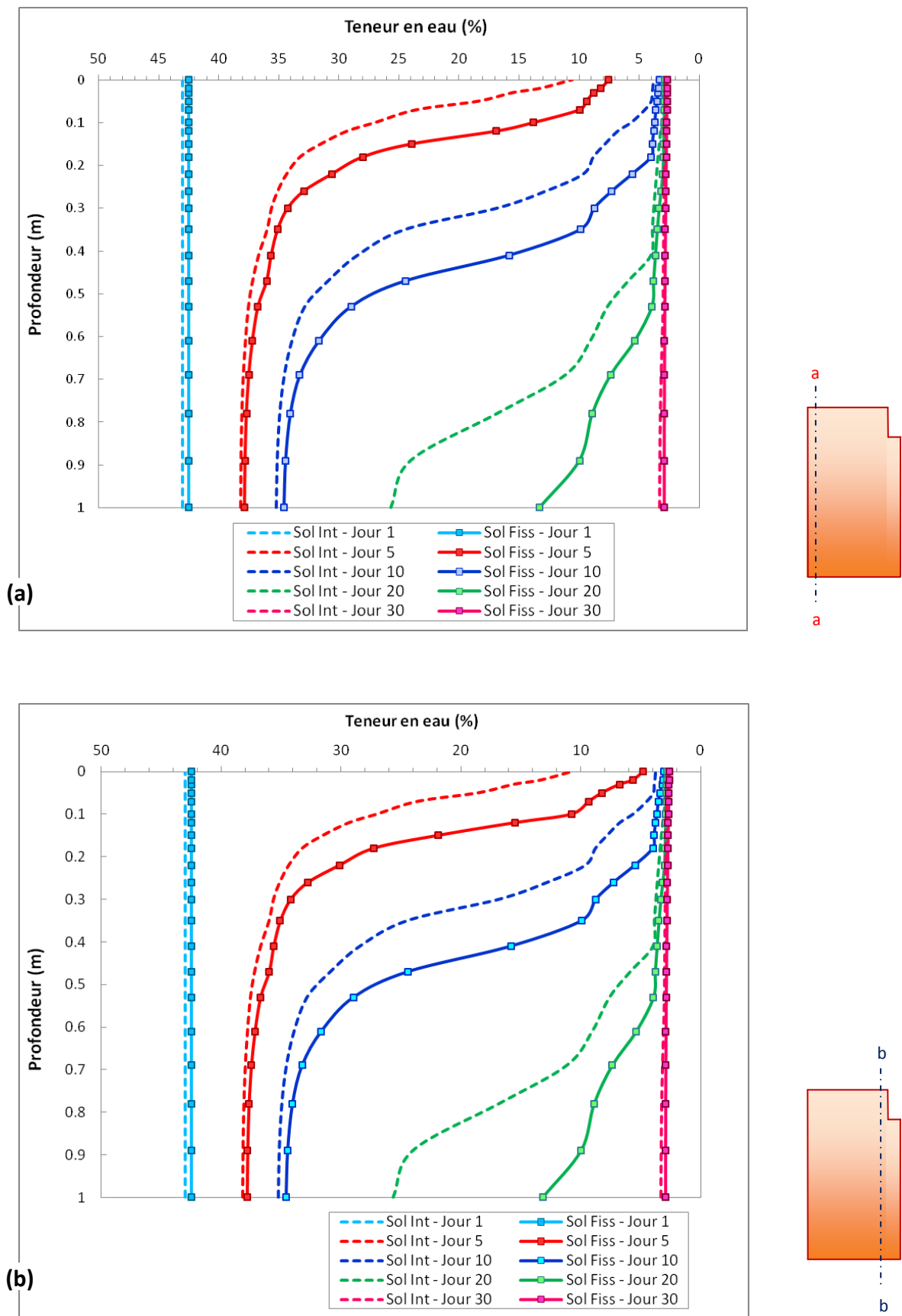


Figure 3.13: Influence des fissures sur la variation de la teneur en eau dans la section a-a (a) et la section b-b (b)

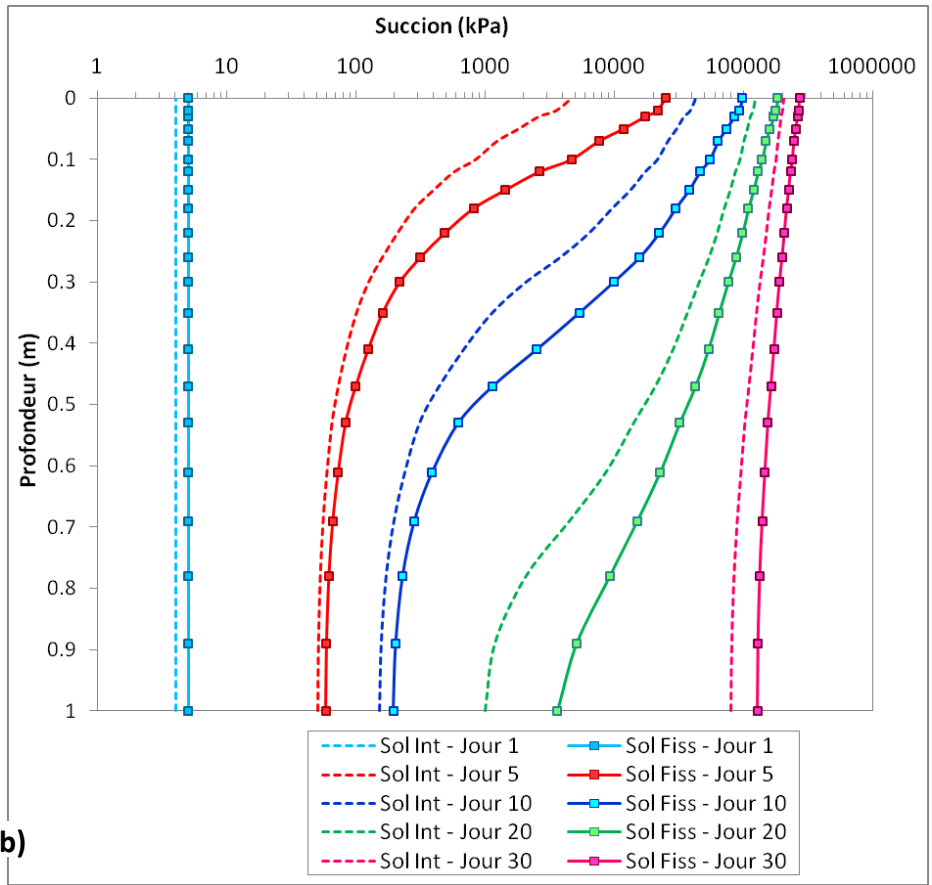
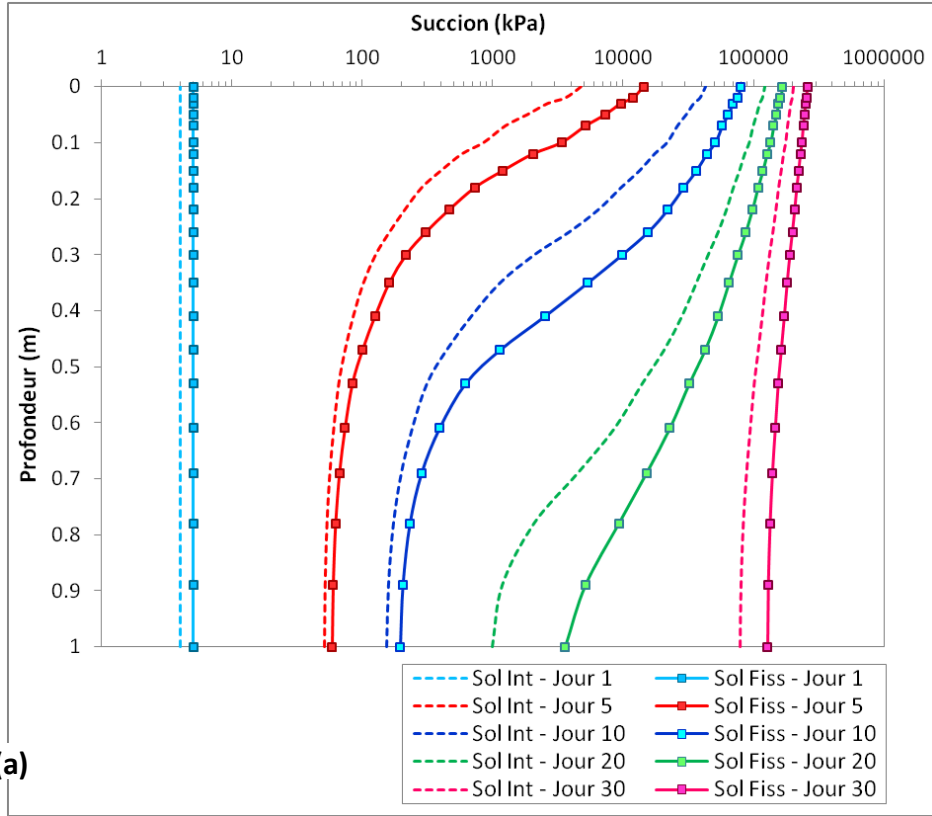


Figure 3.14: Influence des fissures sur le développement de la succion dans la section a-a (a) et la section b-b (b)

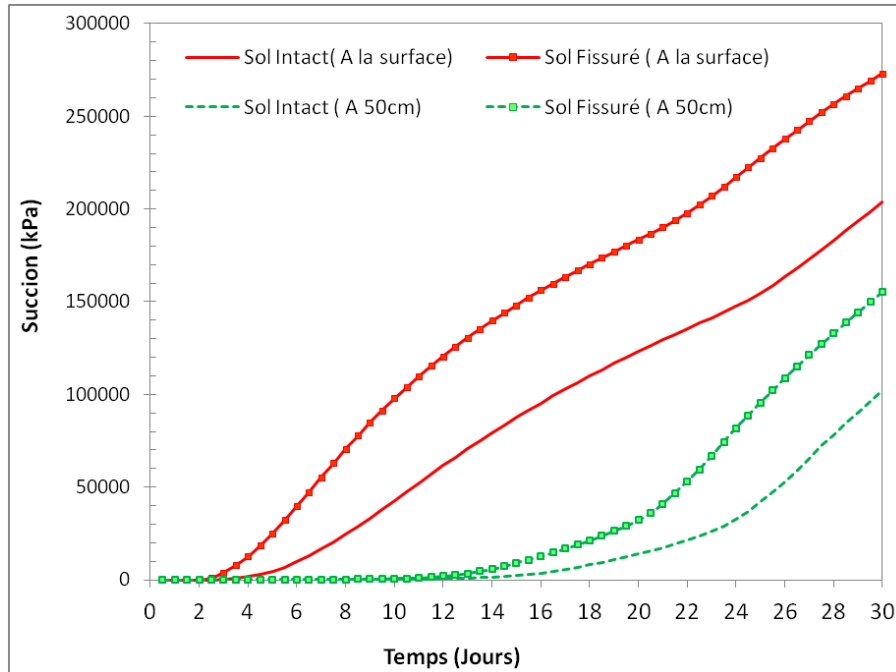
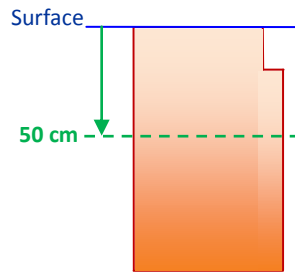


Figure 3.15: Influence des fissures sur la variation de la succion à la surface et à 50 cm de profondeur

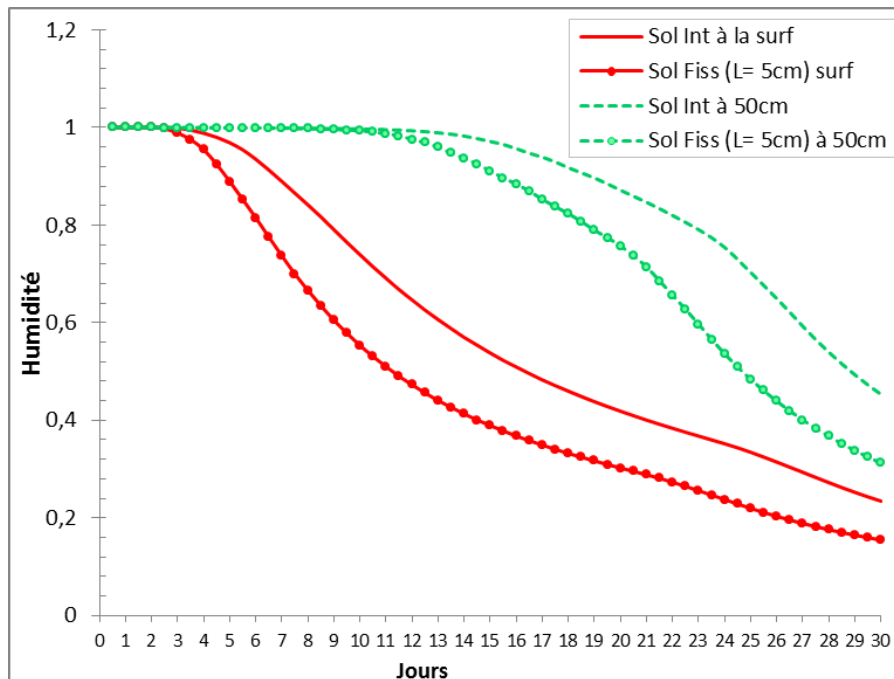


Figure 3.16: Influence des fissures sur la variation de l'humidité à la surface et à 50 cm de profondeur

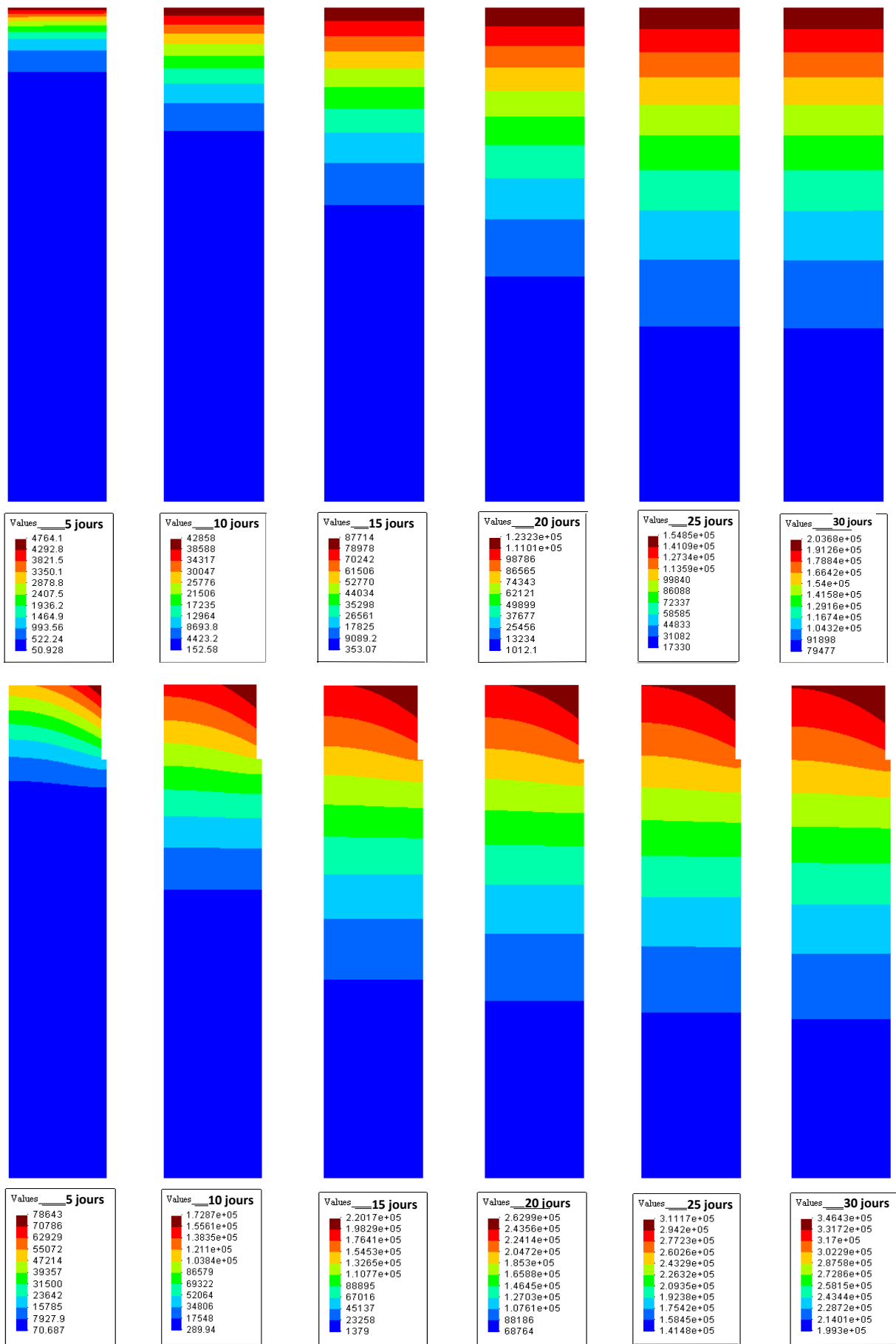


Figure 3.17: Développement de la succion dans le sol intact après 5, 10, 15, 20, 25 et 30 jours de dessiccation 107

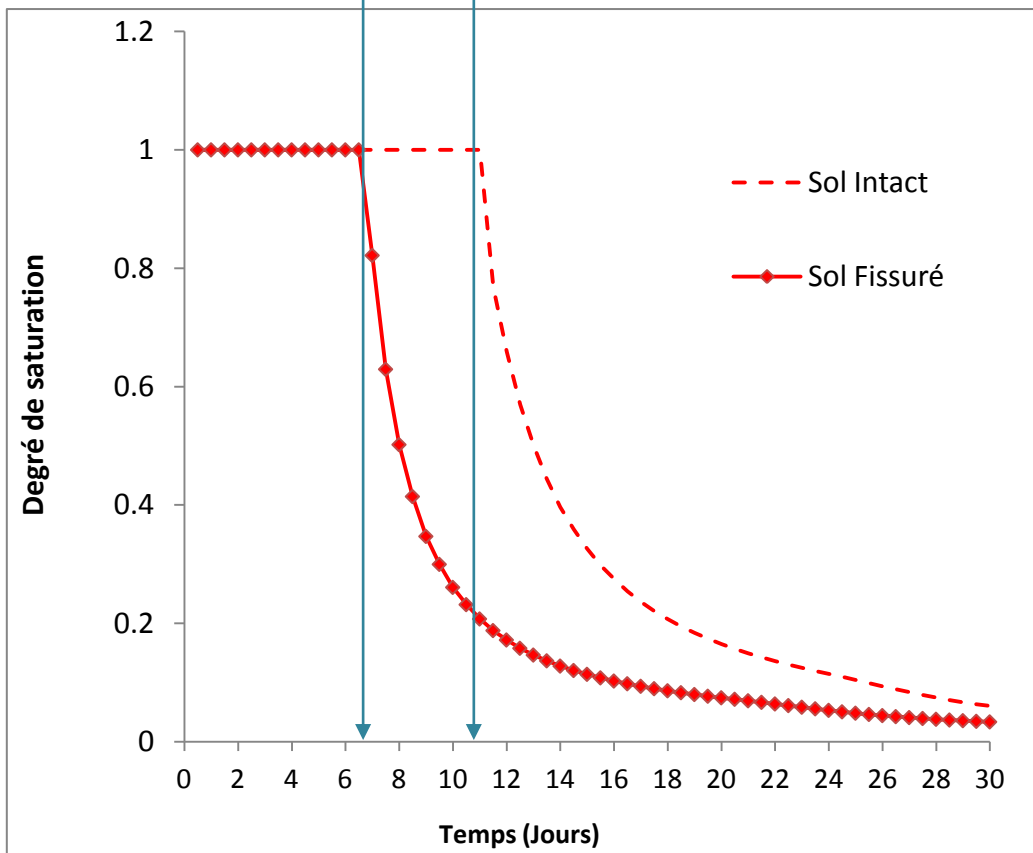
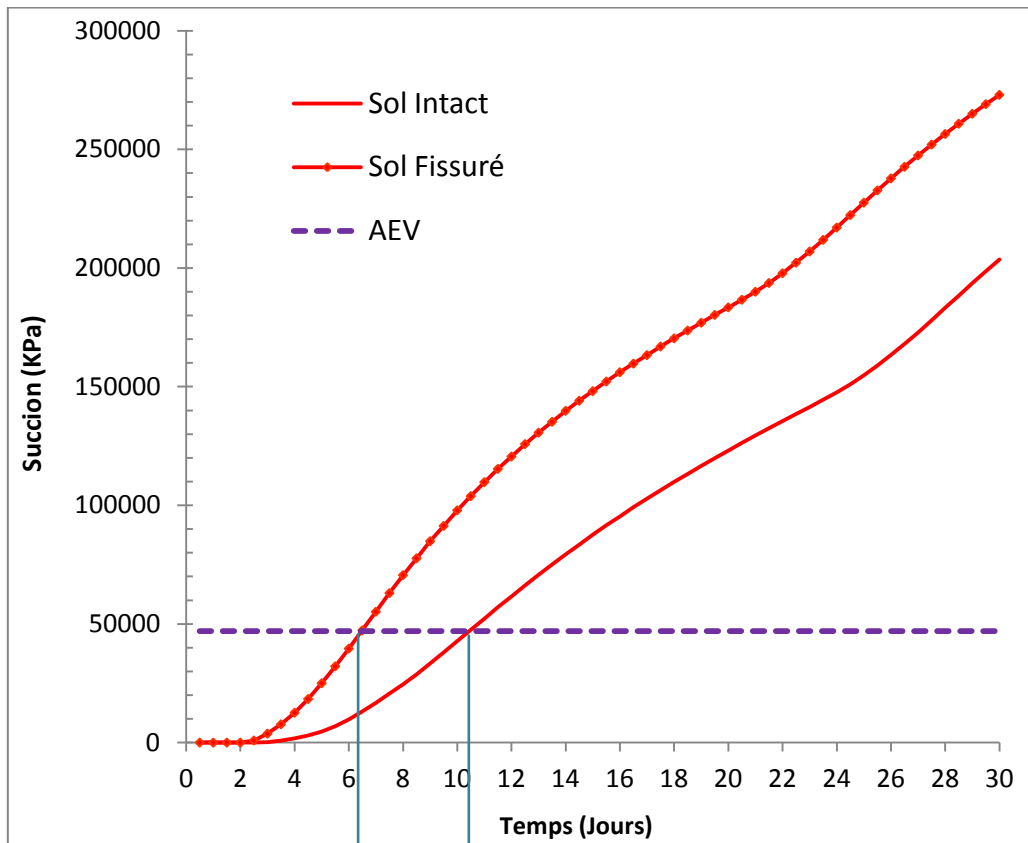


Figure 3.18: Influence de la présence des fissures sur le temps critique d'entrée d'air

3.3.2.3 Etude paramétrique

Dans cette partie, on étudie l'effet de la profondeur des fissures sur l'évolution du profil hydrique dans le massif du sol. Des calculs supplémentaires ont été effectués avec des fissures de 10 et 15 cm de profondeur.

La figure 3.19 montre l'influence de la profondeur des fissures sur le taux d'évaporation cumulé. On note que l'augmentation de la profondeur des fissures induit une augmentation du taux d'évaporation. Après 30 jours, la présence des fissures de 5, 10 et 15 cm de profondeur induit une augmentation du taux d'évaporation de 10%, 19% et 24%, respectivement (par rapport au sol intact). Ceci est dû à l'augmentation de la surface d'évaporation qui résulte de l'accroissement de la profondeur des fissures.

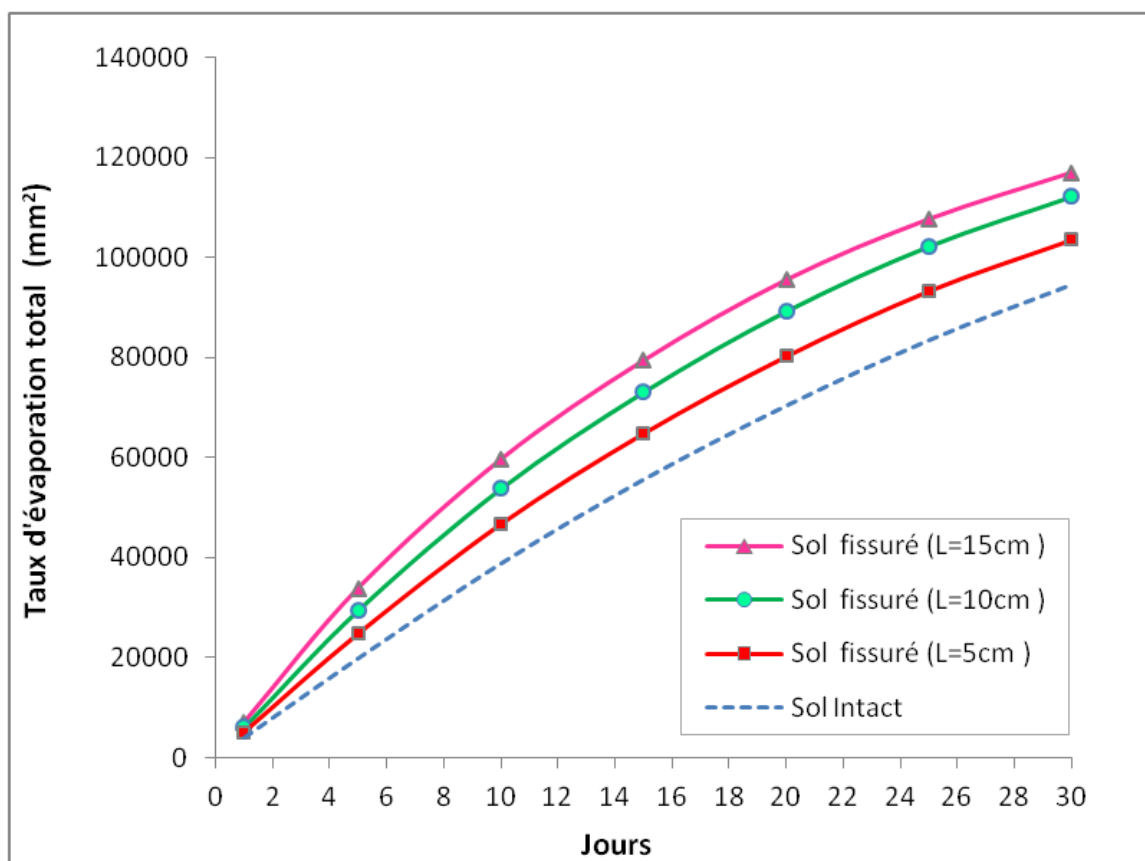


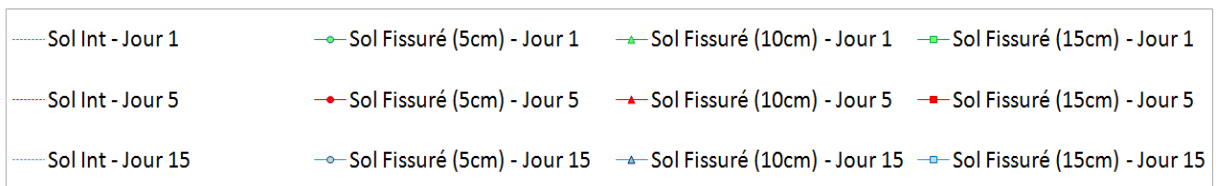
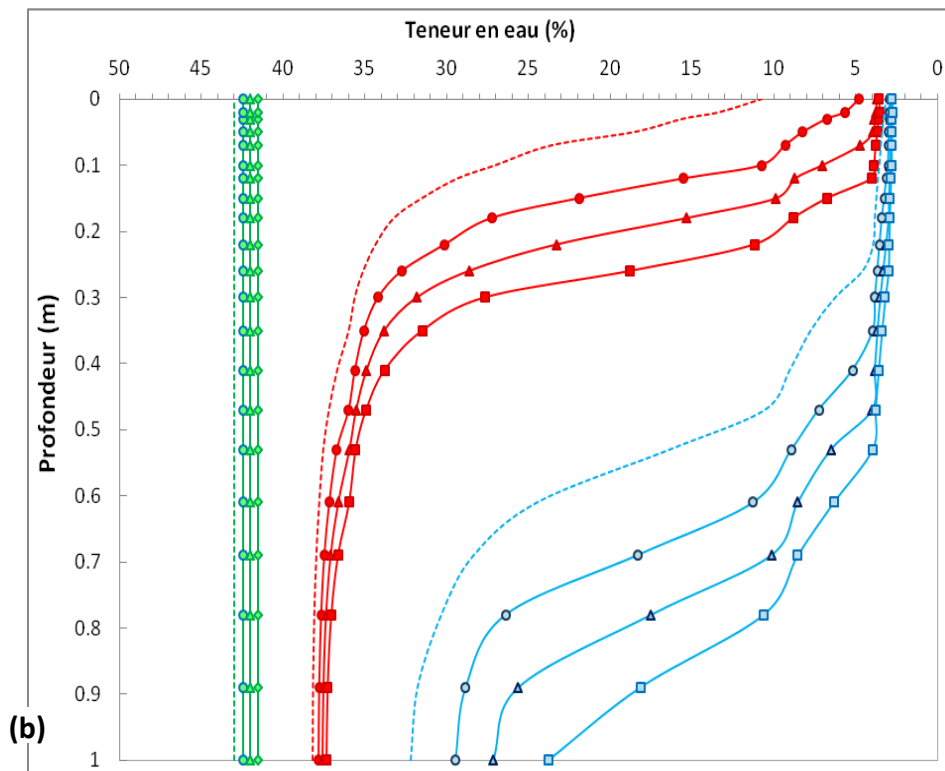
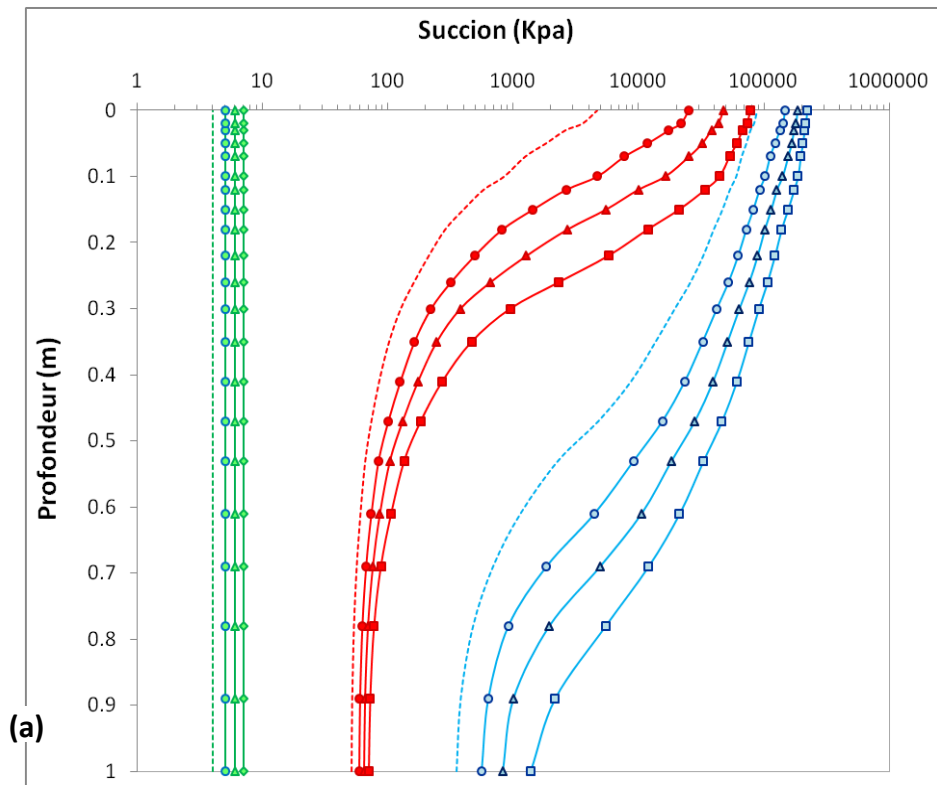
Figure 3.19: Influence de la profondeur des fissures sur le taux d'évaporation

La figure 3.20 montre l'influence de la profondeur des fissures sur la succion. On note un développement plus important de la succion pour les fissures les plus profondes. Durant les premiers jours, cette variation est concentrée dans la couche de surface. La succion la plus élevée correspond au sol le plus fissuré.

Après 15 jours, le front de dessiccation atteint 30cm pour le sol intact, 40cm pour le sol ayant des fissures de 5cm de profondeur, 50cm pour des fissures de 10cm de profondeur et 60cm pour des fissures de 15cm de profondeur.

Les variations de l'humidité, de la succion et du degré de saturation à la surface du sol pour les différentes configurations étudiées sont illustrées dans la figure 3.21. On note que la succion augmente avec la profondeur des fissures: Après 15 jours, on observe une augmentation de la succion à la surface de 129% pour les fissures de 5 cm de profondeur et de 304% les fissures de 15 cm de profondeur. On remarque que le degré de saturation décroît avec l'augmentation de la profondeur des fissures. A la fin des simulations, on trouve la même valeur du degré de saturation pour les cas étudiés.

Le sol ayant le taux des fissures le plus élevé entame la phase de désaturation en premier. Une augmentation de la profondeur des fissures induit une perte d'eau plus important, le sol atteint la condition d'entrée d'air en premier. On note que la phase de désaturation commence après 4 jours pour le sol ayant des fissures de 15 cm, après 5 jours pour le sol ayant des fissures de 10 cm, après 6 jours pour le sol ayant des fissures de 5 cm, alors que le sol intact atteint cette condition après 10 jours.



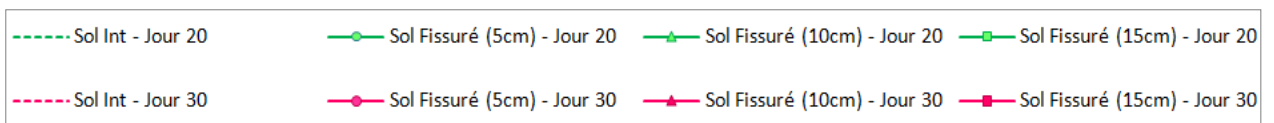
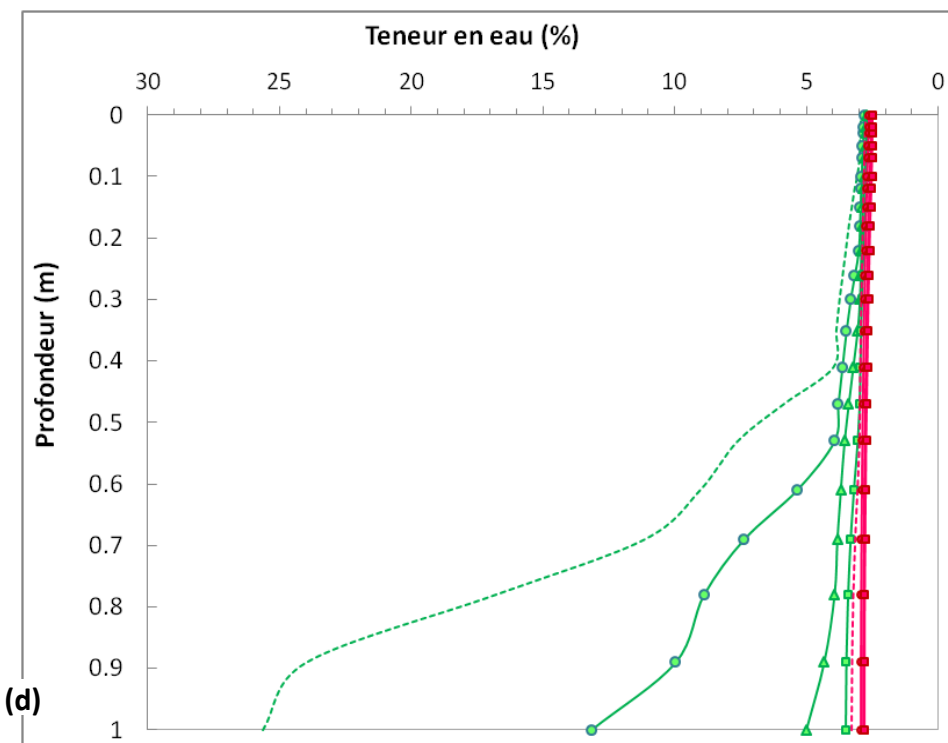
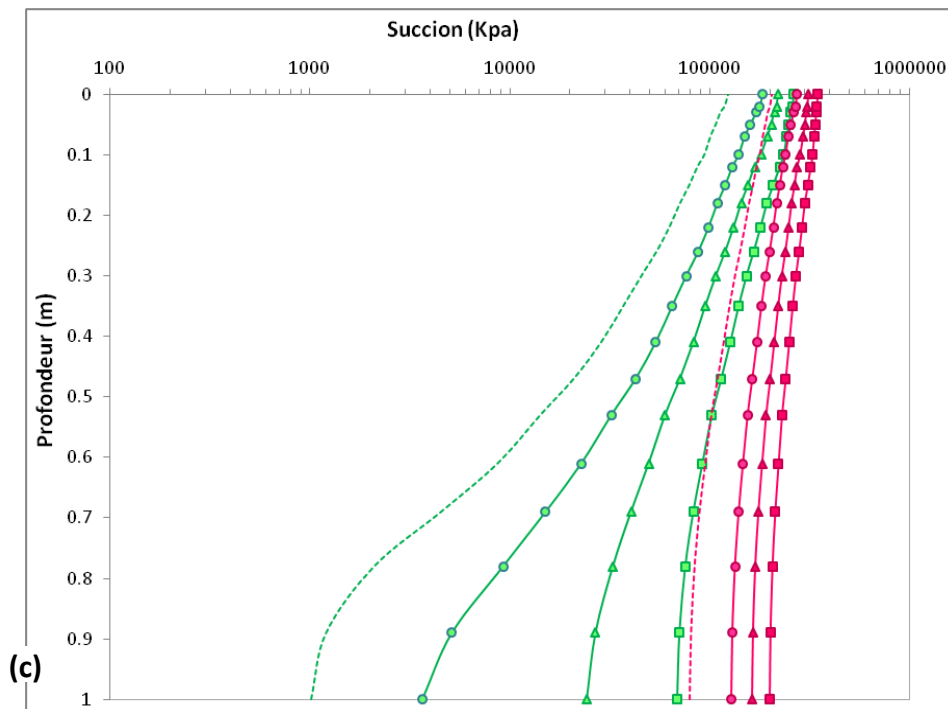


Figure 3.20: Influence de la profondeur des fissures sur le taux de suction: a) Suction pour les jours 1, 5 et 15; b) Suction pour les jours 20 et 30; c) Profils de la teneur en eau pour les jours 1,5 et 15; d) Profils de la teneur en eau la suction pour les jours 20 et 30

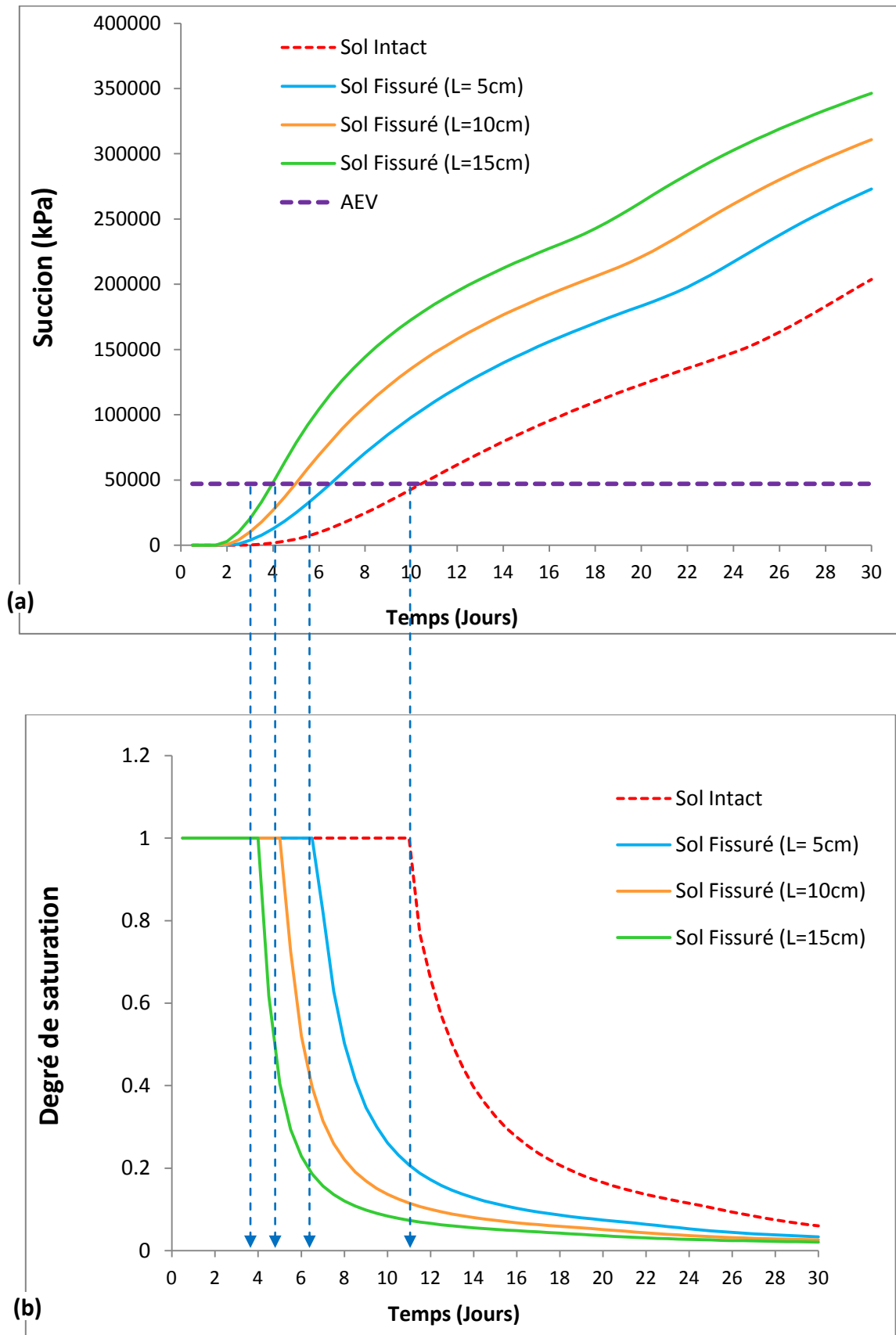


Figure 3.21: Influence de la profondeur des fissures sur le temps critique d'entrée d'air: Evolution de la succion à la surface du sol (a), Evolution du degré de saturation à la surface (b)

3.4. Elaboration d'une nouvelle approche pour le sol fissuré

3.4.1 Présentation

Les analyses présentées dans ce chapitre ont mis en évidence l'effet des fissures sur le phénomène de sécheresse dans les sols fins. Sur la base des résultats obtenus, on propose une nouvelle approche permettant de prendre en compte la présence des fissures dans le modèle d'interaction sol-atmosphère d'une manière simplifiée. Cette approche est basée sur l'hypothèse que les fissures font augmenter la surface de contact sol - atmosphère. Le sol fissuré est remplacé par un sol intact « équivalent » avec une surface d'évaporation équivalente 'L_{eff}' (Figure 3.22) :

$$L_{\text{eff}} = L_{\text{intact}} * (1+\lambda) \quad [3.25]$$

L_{intact} désigne la surface de contact sol-atmosphère du sol intact. Le paramètre λ définit le taux de fissuration du sol.

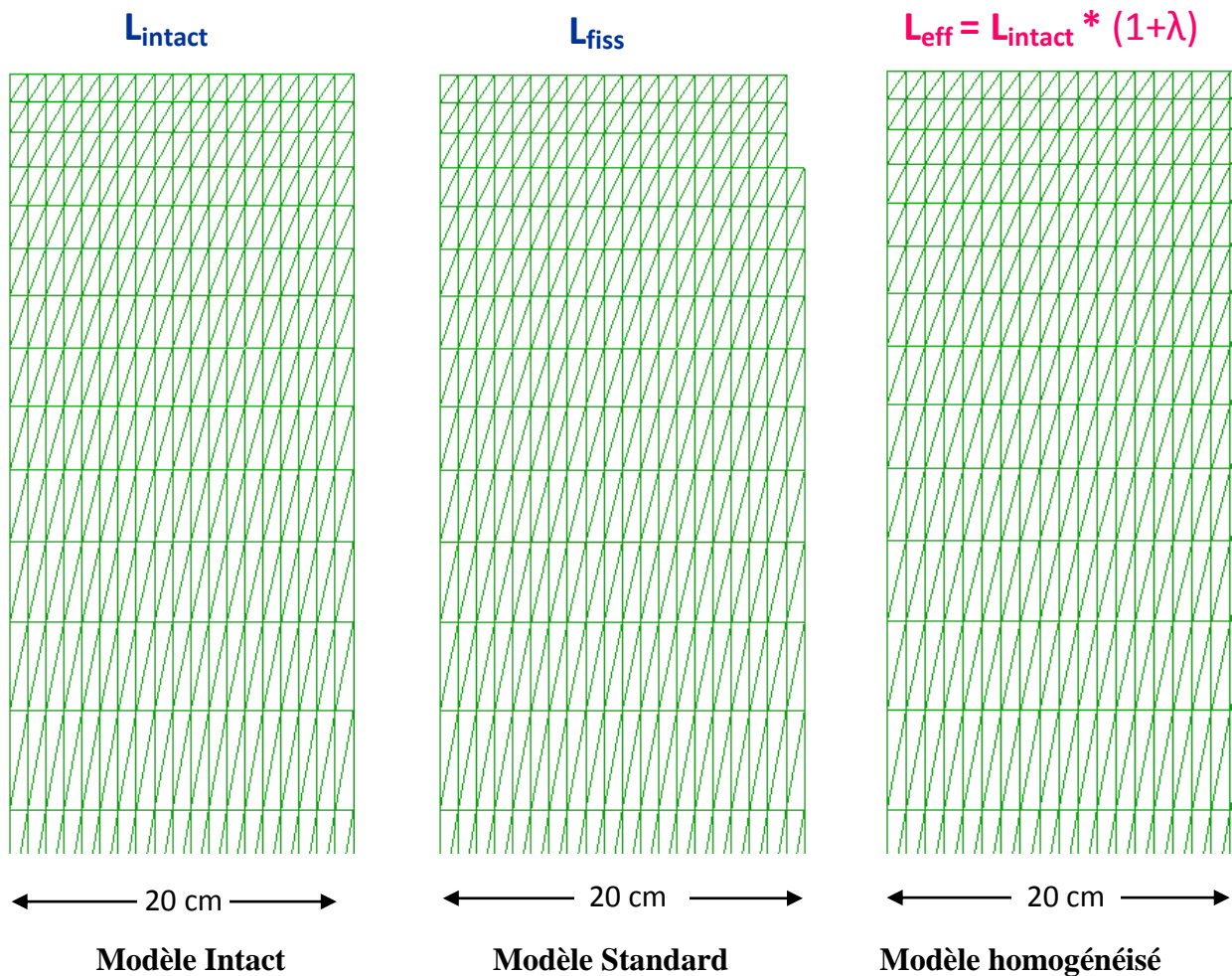


Figure 3.22: Principe du modèle simplifié équivalent

Ce modèle présente un grand intérêt, il permet d'effectuer une modélisation simplifiée de la sécheresse des sols fissurés.

3.4.2 Validation

Le modèle a été validé par comparaison des résultats obtenus avec le modèle standard et le modèle simplifié.

Un premier test de validation a été effectué sur l'exemple traité dans la première partie (Figure 3.9) sur un massif ayant des fissures de 5 cm de profondeur et de 2 cm de largeur. La valeur de λ a été déterminée à partir du rapport entre la surface totale de contact sol-atmosphère du sol fissuré à celle du sol intact (Eq. 3.25). On obtient $\lambda = 0,25$.

La figure 3.23 montre les flux d'évaporation obtenus à partir des deux approches. On note une bonne concordance entre les résultats de ces approches.

Les profils de succion déterminés par les deux approches sont présentés dans les figures 3.24 (a) et (b). On note également un très bon accord entre ces deux approches. Ce bon accord montre la pertinence de l'utilisation du modèle simplifié dans l'analyse du phénomène de sécheresse dans les sols fissurés.

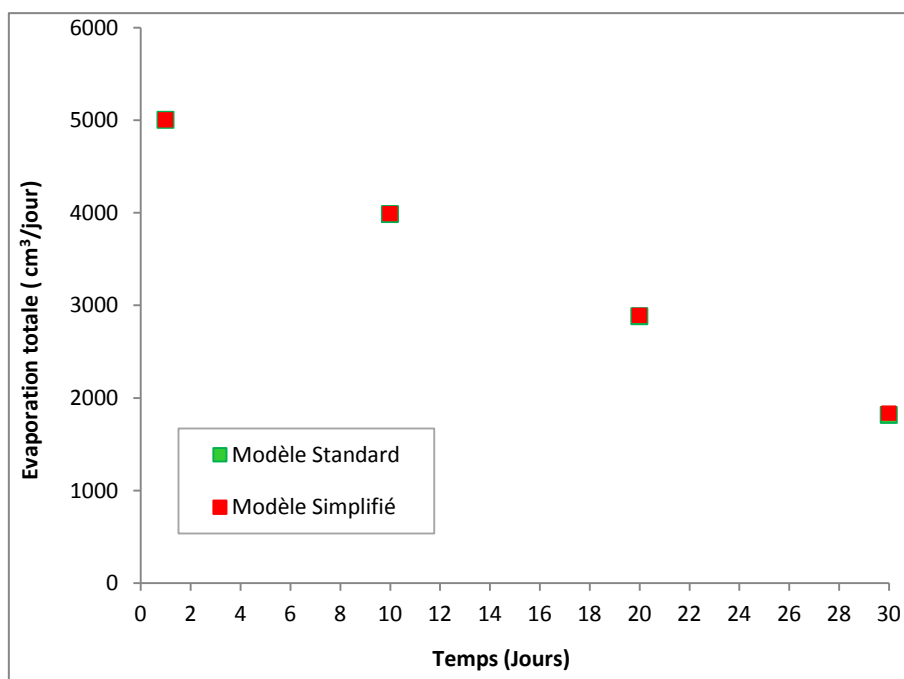


Figure 3.23: Validation du modèle simplifié des sols fissurés - Variation de l'évaporation

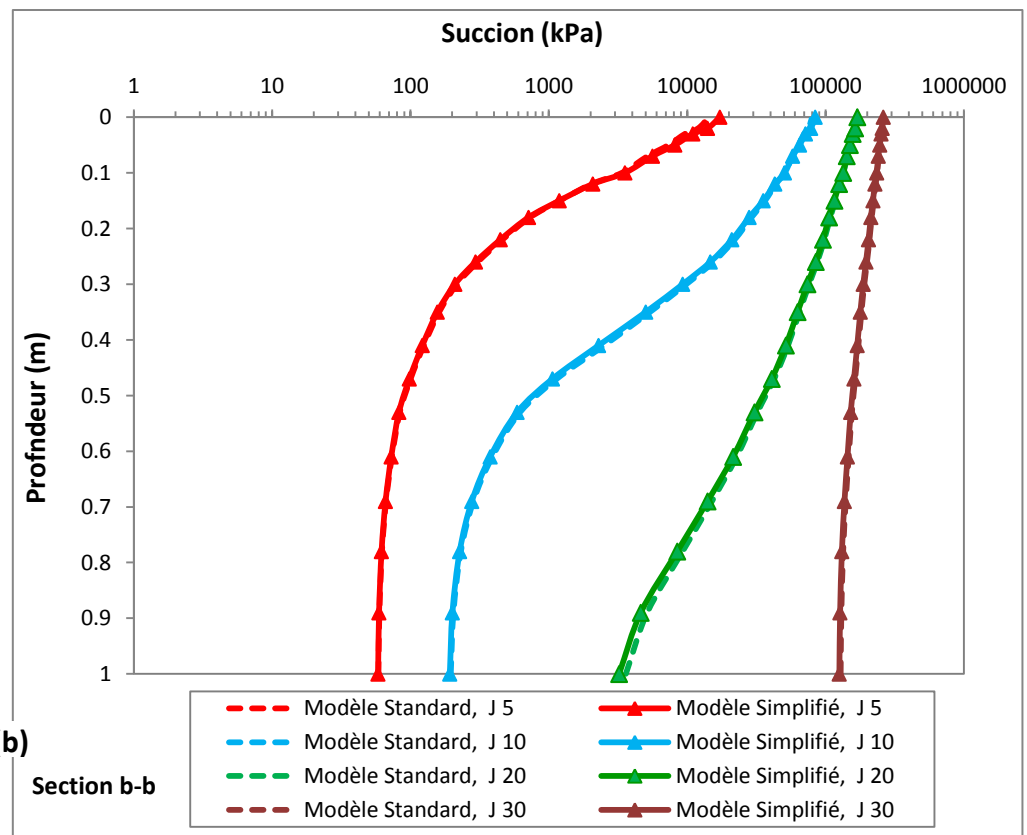
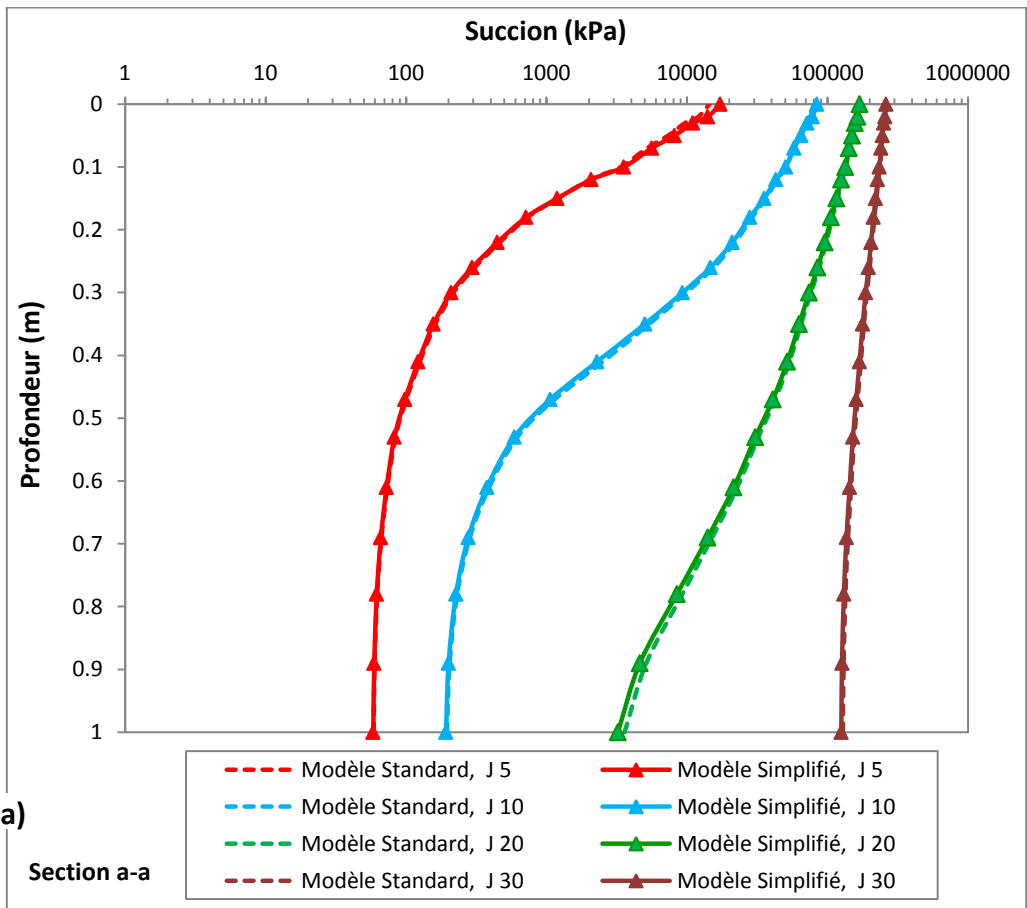


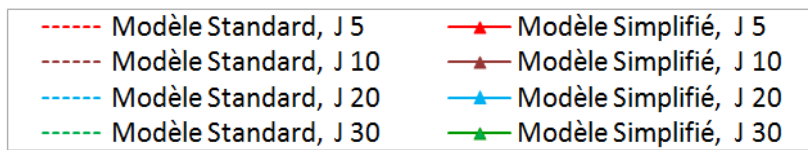
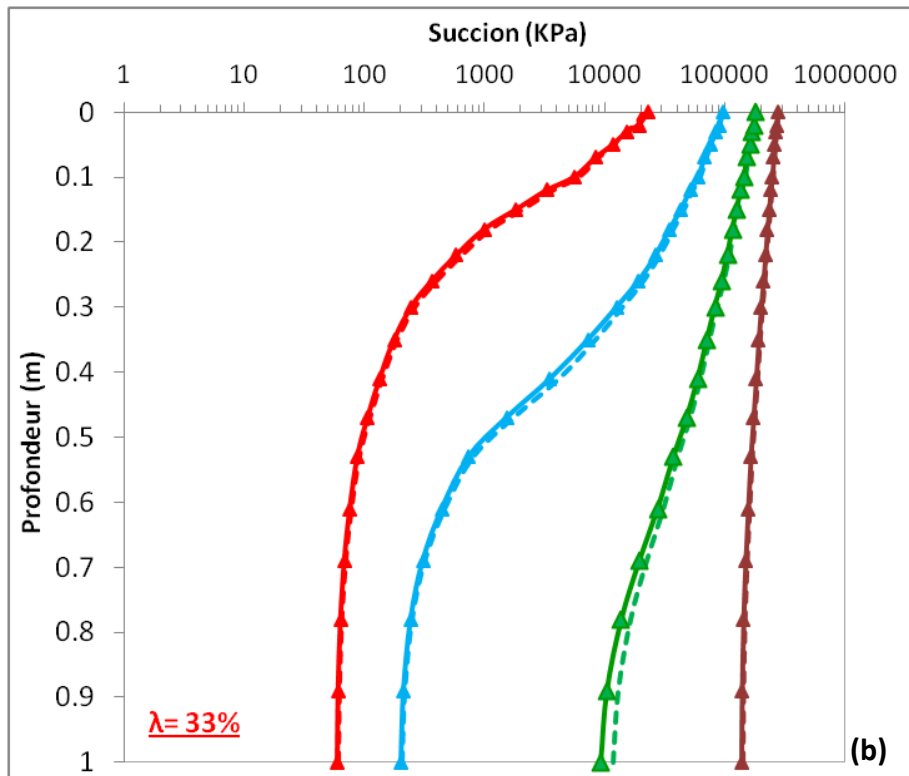
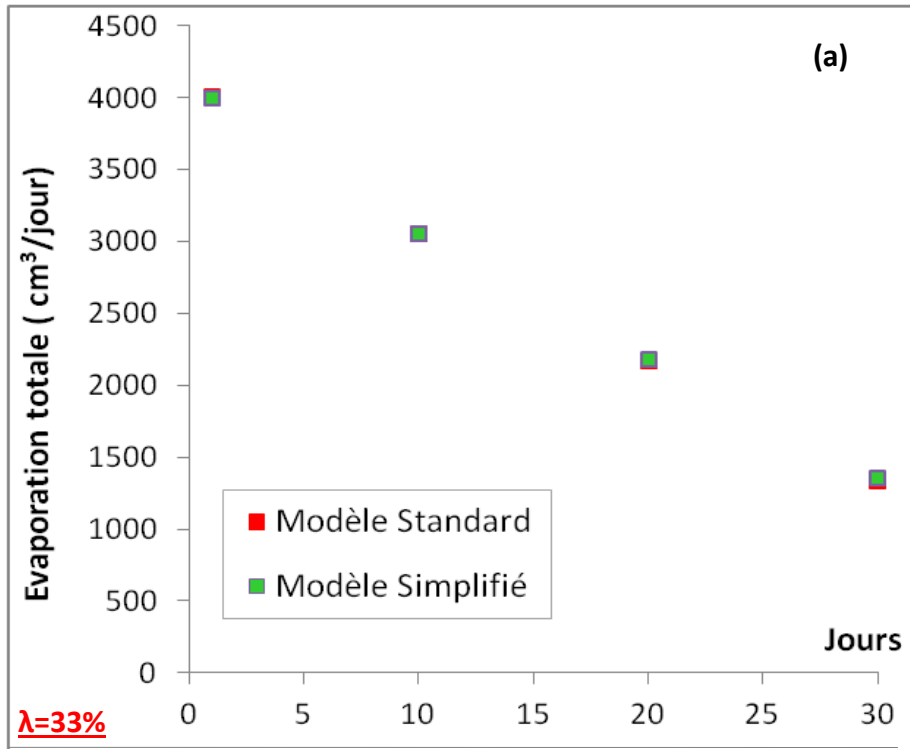
Figure 3.24: Validation du modèle simplifié – Variation de la succion : section a-a (a), section b-b (b)

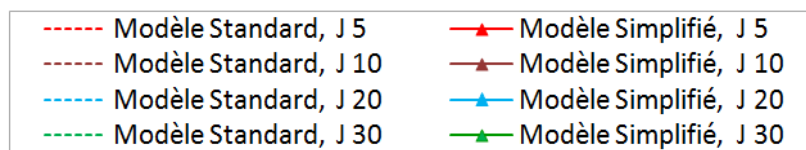
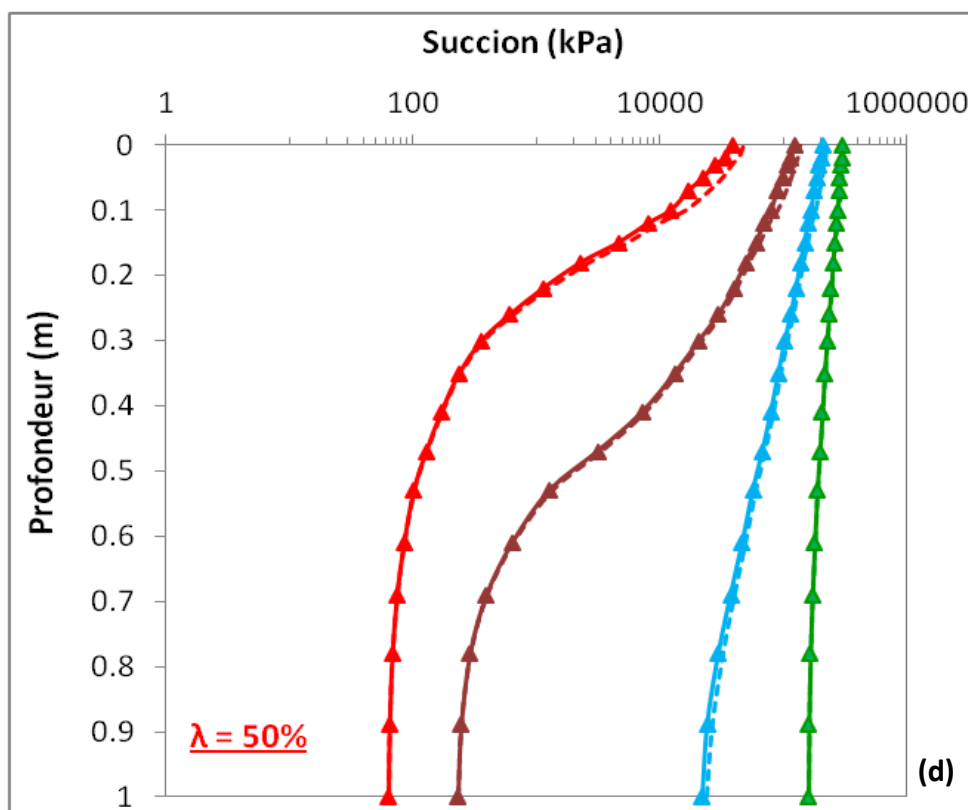
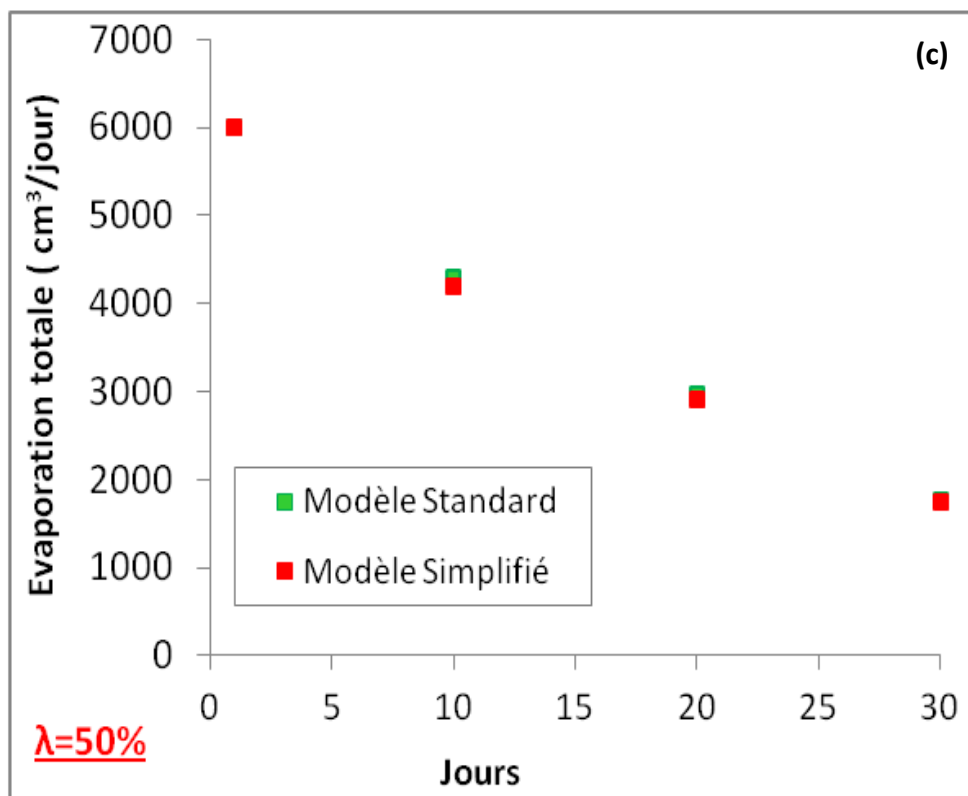
Le modèle simplifié a été ensuite validé sur d'autres cas en prenant trois largeurs du massif du (B= 15, 20 et 25cm) et pour chaque cas 3 profondeurs de fissures (5, 10 et 15cm). Avec ces configurations (Tableau 3.1), le paramètre λ varie entre 0,2 et 1.

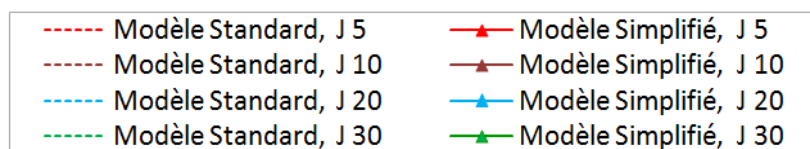
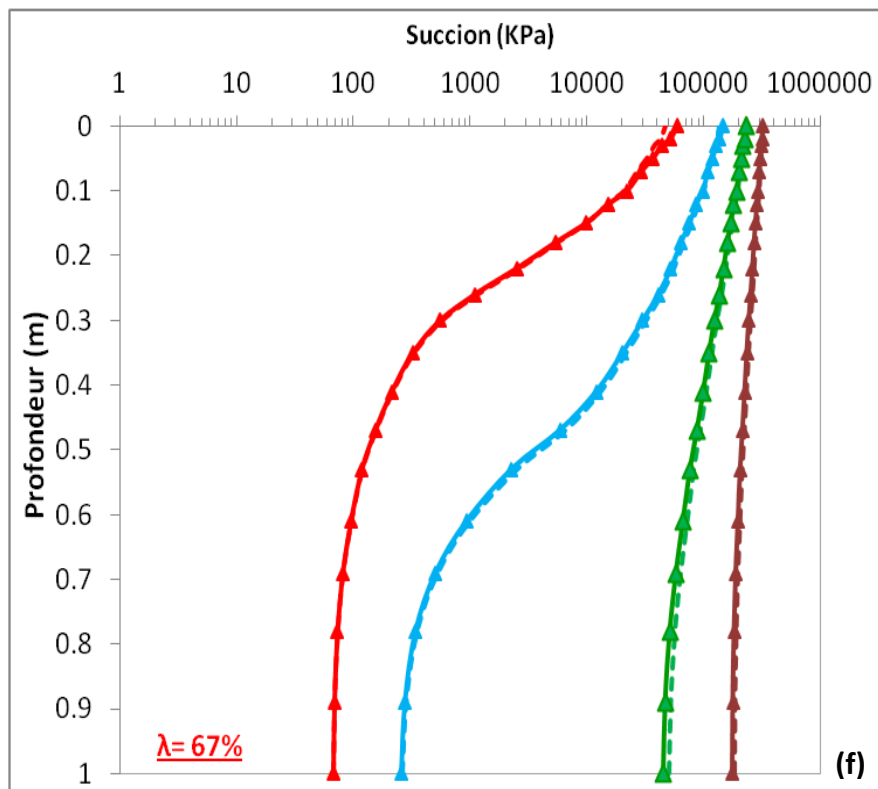
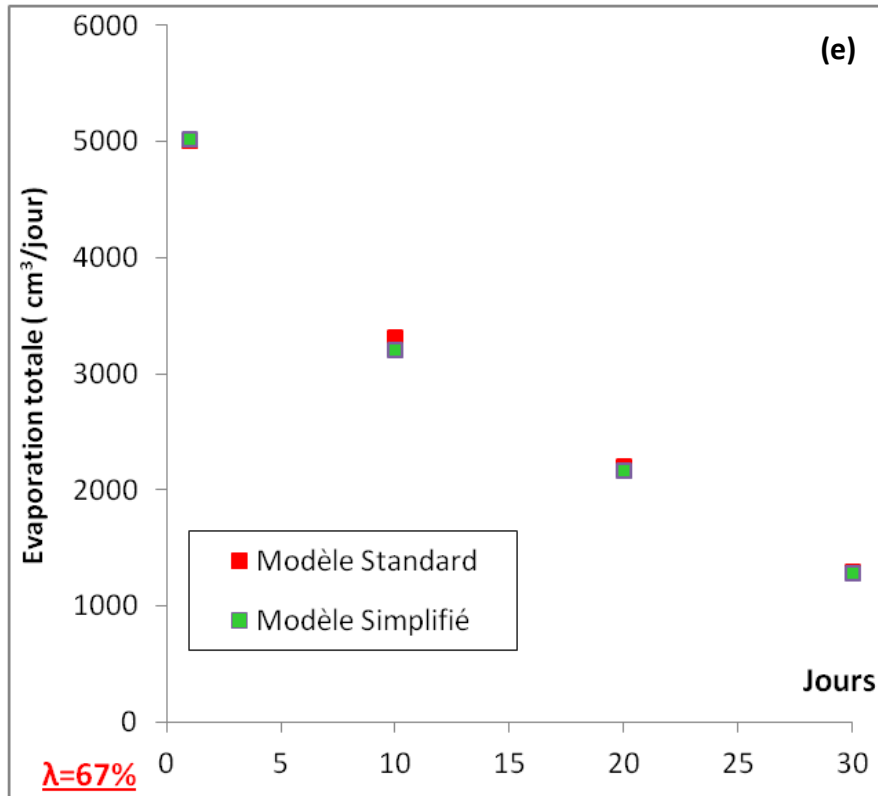
Tableau 3.1: Taux de fissuration pour les configurations étudiées

	L_{fissure} = 5cm	L_{fissure} = 10cm	L_{fissure} = 15cm
B = 15 cm	33%	67%	100%
B = 20 cm	25%	50%	75%
B = 25 cm	20%	40%	60%

La figure 3.25 montre les résultats des comparaisons entre le modèle simplifié et le modèle standard. Ces courbes donnent le flux d'évaporation et le profil de la succion dans la section b-b. On note de nouveau une bonne concordance entre les deux modèles. Le petit écart entre les courbes à la surface est faible. Ces tests de validation montrent que le modèle simplifié proposé est capable de reproduire les résultats du modèle standard de façon satisfaisante pour les faibles comme pour les fortes valeurs du taux de fissuration.







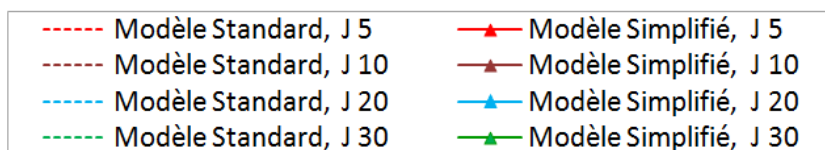
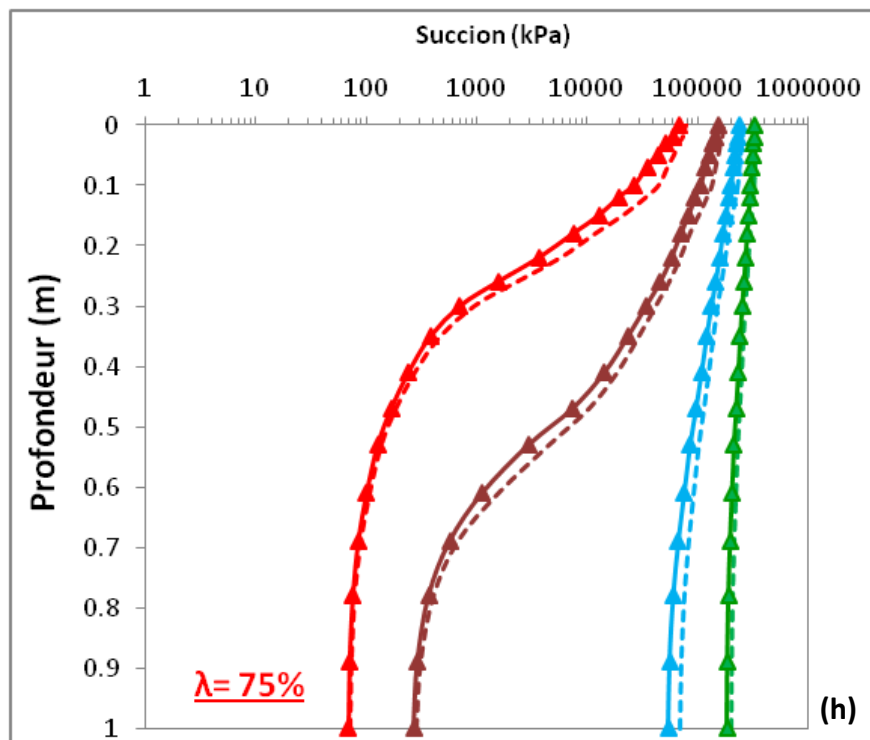
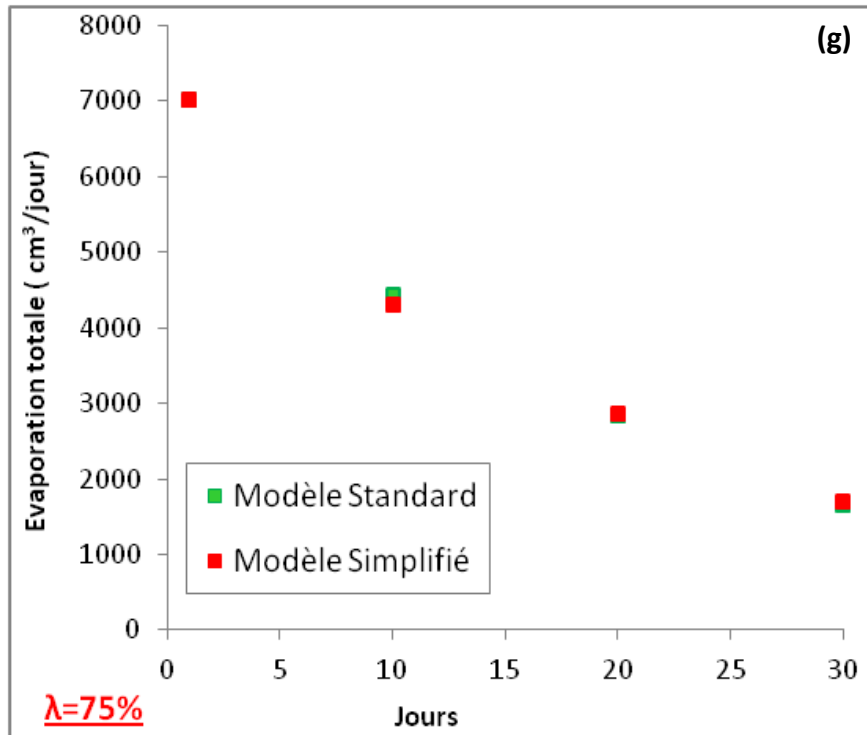


Figure 3.25: Validation du modèle simplifié sur les configurations données dans le tableau 3.1, Flux d'évaporation (a,c,e,g) et Profils de la succion (b,d,f,h)

3.4.3 Taux d'évaporation normalisé

La figure 3.26 montre les variations du taux d'évaporation normalisé (E_{vn}) qui représente le rapport entre le taux d'évaporation du sol fissuré et du sol intact avec le taux de fissuration (λ). On note qu'à un instant donné, E_{vn} croît linéairement avec le taux de fissuration :

$$E_{vn} = 1 + \alpha\lambda \quad [3.26]$$

La pente de cette courbe (α) dépend du temps. A partir des calculs effectués, on a tracé la variation du paramètre α avec le temps (Figure 3.27). On constate que ce paramètre décroît très fortement avec le temps. En 30 jours, il décroît de 0,01 à 0,003.

Cette méthode peut être généralisée. En effet, la détermination par simulations numériques de la variation du paramètre (α) avec le temps, permet d'utiliser le taux de fissuration (λ) pour déterminer l'évaporation d'un sol fissuré à partir de celle d'un sol intact.

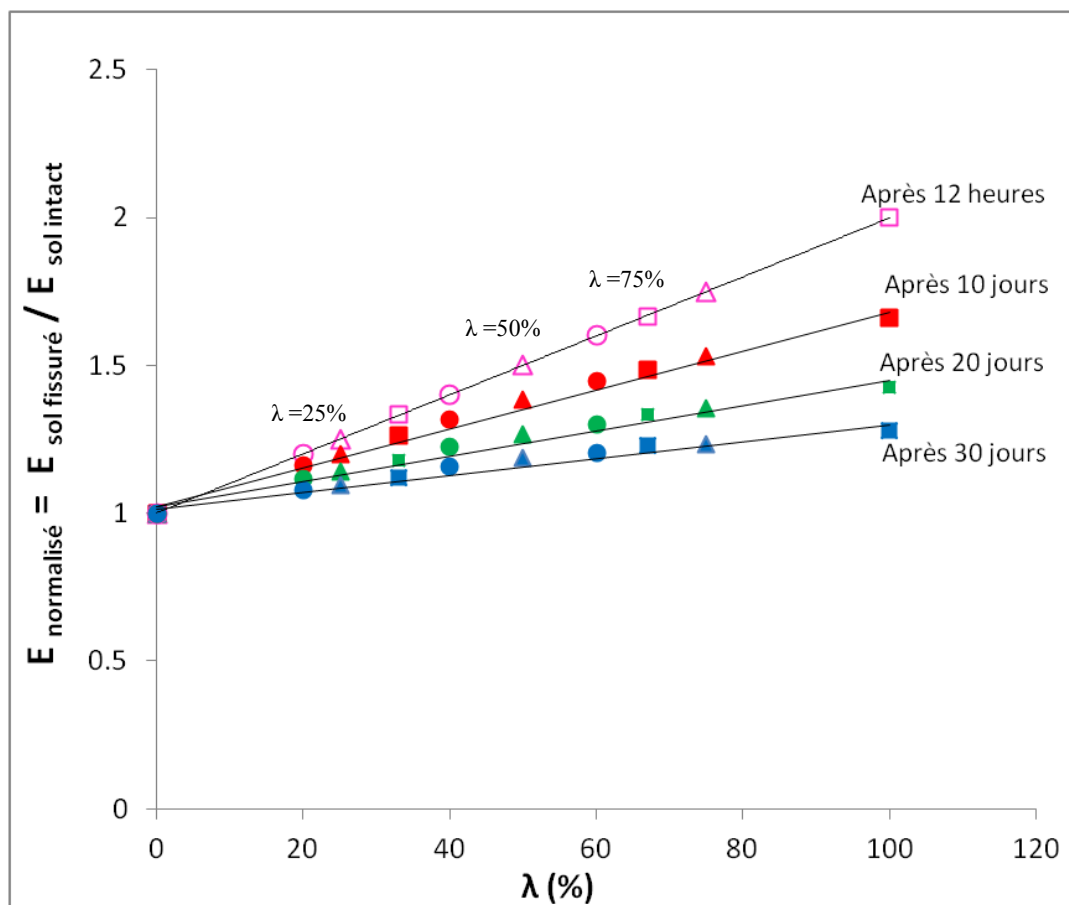


Figure 3.26: Variation du taux d'évaporation normalisé

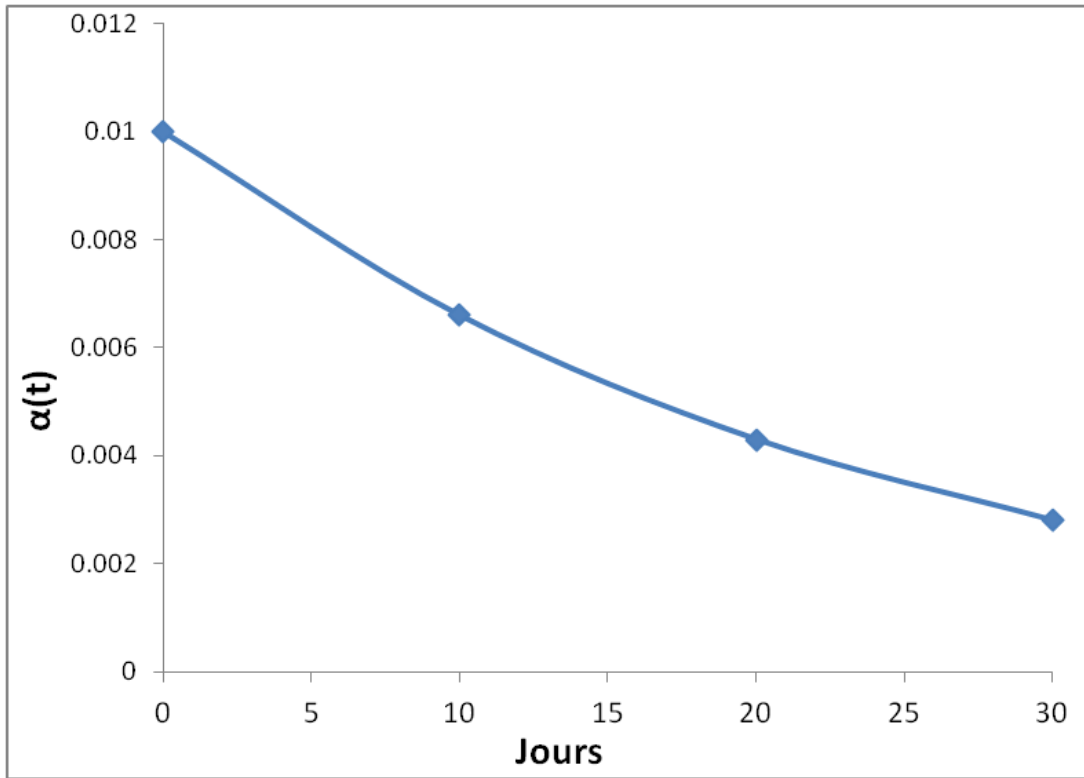


Figure 3.27: Variation du taux de dessiccation α avec le temps

3.5. Etude de l'interaction sol-atmosphère en présence d'une structure

On s'intéresse dans cette partie à l'étude de l'influence des fissures sur l'interaction sol - atmosphère en présence d'une structure. La modélisation sera effectuée en deux phases. La première concerne les sols non fissurés, la seconde traite les sols fissurés.

3.5.1 Présentation de l'exemple

La figure 3.28 illustre l'exemple étudié. Il concerne une structure de 10 m de largeur reposant sur un massif de sol avec une couche superficielle de sol fin de 3 m de hauteur. Grâce à la symétrie, seule la moitié du modèle est considérée dans la modélisation.

La modélisation est effectuée avec un massif de 60m de largeur. Cette dimension a été déterminée après une étude paramétrique pour vérifier l'absence d'interaction entre la frontière latérale et la structure.

Les conditions aux limites hydrauliques sont identiques à celles utilisées dans les sections précédentes. L'interface sol-structure est considérée comme une surface imperméable.

Le maillage est constitué de 6851 nœuds et 13200 éléments triangulaires à 3 nœuds. Le maillage est plus resserré à la surface, au voisinage et sous la structure pour décrire d'une manière plus fine la variation de la succion dans ces zones (Figure 3.29).

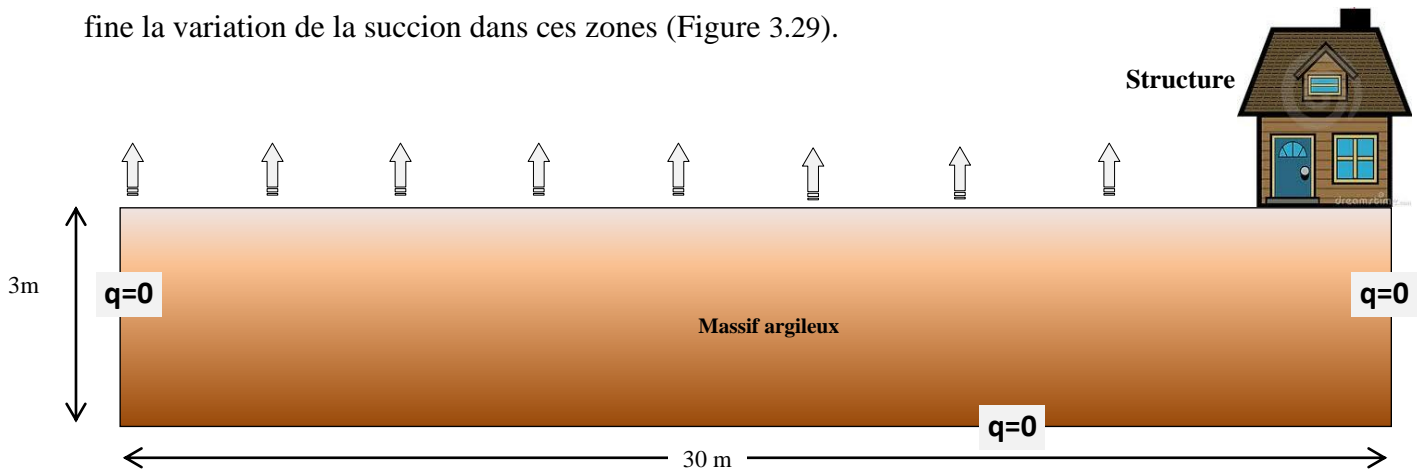


Figure 3.28: Géométrie du modèle utilisé dans l'interaction sol-atmosphère

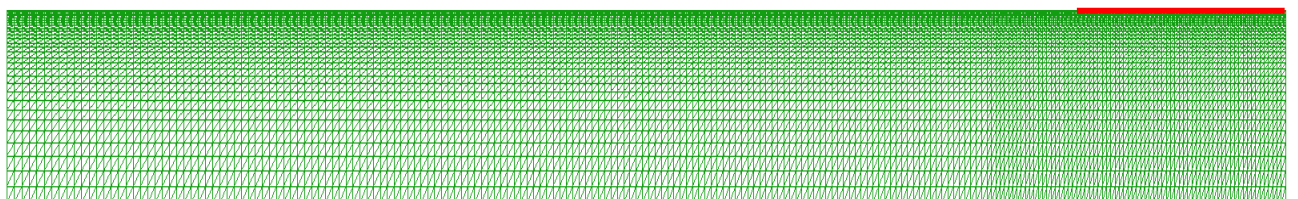


Figure 3.29: Maillage du modèle numérique adopté dans les simulations

3.5.2 Résultats des simulations

3.5.2.1 Sol intact

La figure 3.30 donne le profil de la succion à l'échelle logarithmique à la surface pour différents jours des simulations. Les résultats révèlent la présence de deux zones de distribution de la succion: la première zone, situant sous la structure, marque une très faible valeur succion. La deuxième zone s'étend sur toute la surface libre. Elle montre un développement très important et quasi-uniforme de la succion. Durant les premiers jours, la distribution de la succion est uniforme sur toute la surface. Avec le temps, la zone sous la structure conserve une faible succion durant la période des simulations. En fait, cette zone, étant protégée, on n'a aucun échange direct avec l'atmosphère. La teneur eau reste importante. Par contre, dans la zone non couverte, la succion continue à augmenter et marque des valeurs très élevées.

Le gradient de la succion est maximal à proximité de l'extrémité de la structure et devient négligeable sous la structure du fait d'un retard de séchage. C'est la zone critique de passage de la zone protégée à la zone non protégée où la succion varie très rapidement.

Ces résultats sont en accord avec d'autres résultats trouvés dans la littérature (Fredlund et al., 2010, Al-Qadad, 2009).

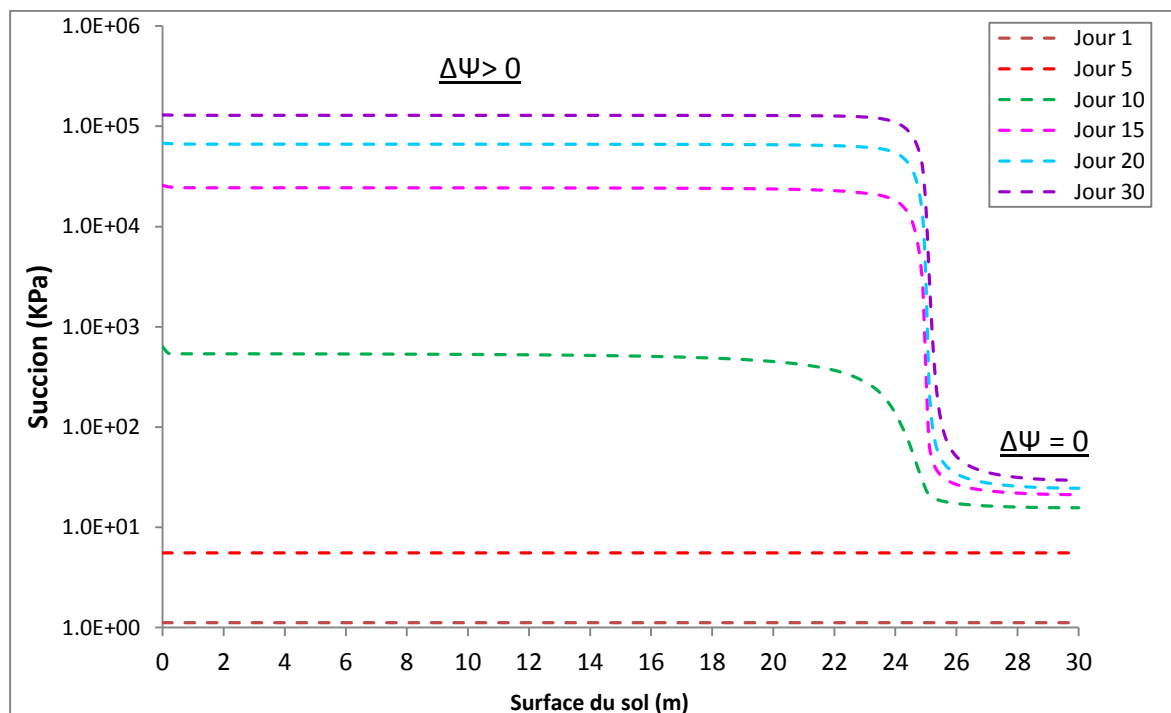


Figure 3.30: Variation de la succion à la surface du sol

3.5.2.2 Sol fissuré

Dans cette partie, on présente l'effet des fissures sur le développement de la succion dans le massif du sol. Les figures 3.31-a et 3.31-b donnent l'influence de la fissuration sur la succion induite par l'interaction sol-atmosphère. On note que la présence des fissures à la surface du sol n'influe pas sur la succion développée en dessous la structure. Cette zone étant protégée, un équilibre hydrique est conservé en absence et même en présence des fissures. Par contre, l'effet des fissures apparaît considérablement dans la région situant à l'extérieur de la structure; autrement dit, dans la zone d'échange sol-atmosphère. Durant les premiers jours, la différence entre la succion développée dans le sol intact et celle développée dans le sol fissuré est faible. Puis, l'effet des fissures apparaît à partir du 7^{ème} jour. La succion développée dans la zone non couverte est plus prononcée en présence des fissures indiquant ainsi un écoulement d'eau plus important induit par l'échange sol-atmosphère. Cette différence s'accroît au fur et à mesure avec le temps. La zone de transition présente un gradient de succion plus important aggravant ainsi l'endommagement dans les structures.

Les figures 3.32-a et 3.32-b montrent le développement de la succion dans le massif après 30 jours pour un sol intact et un sol fissuré. On note que pour le cas d'un sol intact, la variation de la succion est concentrée dans les premiers 40cm de la zone superficielle située à l'extérieur de la structure. En présence des fissures, la succion développée est plus importante. La zone de variation de succion est plus profonde et s'étend à 1m de profondeur, montrant ainsi un transfert d'eau plus important en présence des fissures.

Ainsi, dans les zones soumises au risque de sécheresse, il est conseillé d'éviter les constructions légères et les structures avec les fondations superficielles. Comme la zone touchée atteint le premier mètre du sol, il est plus sécurisant de faire des fondations avec une profondeur au-delà de 1 mètre afin d'éviter le problème du tassement différentiel.

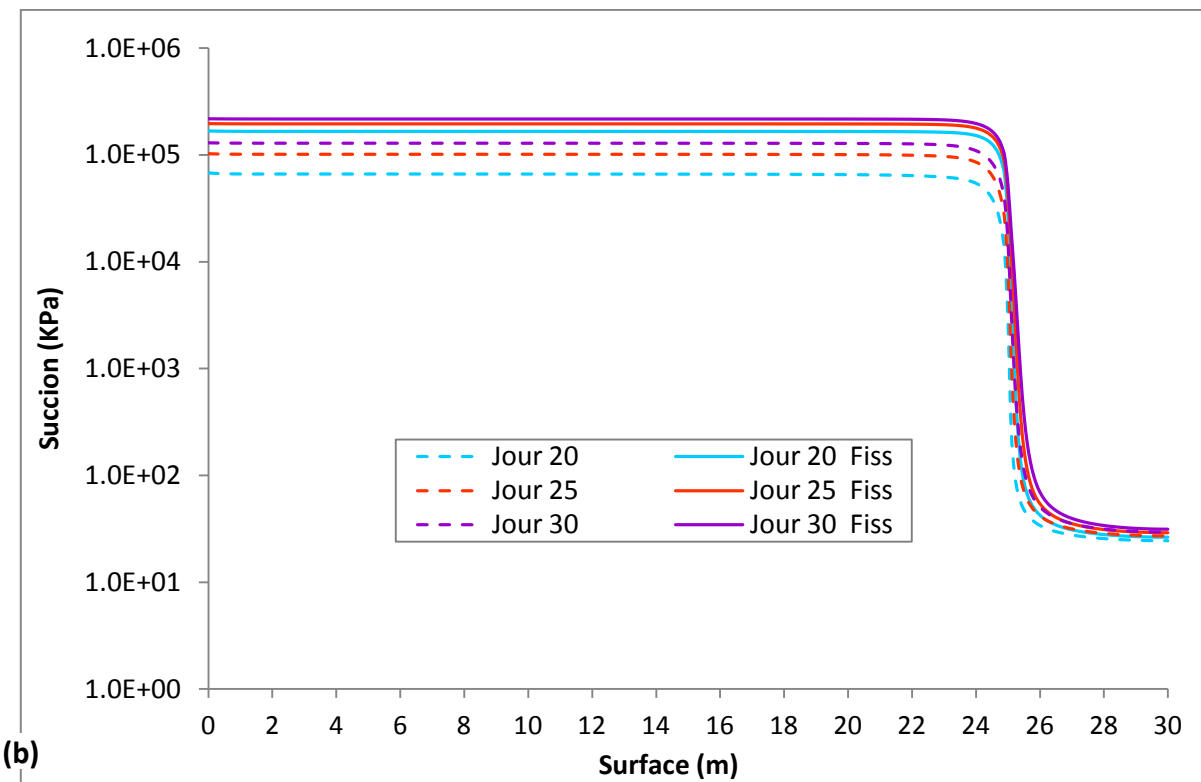
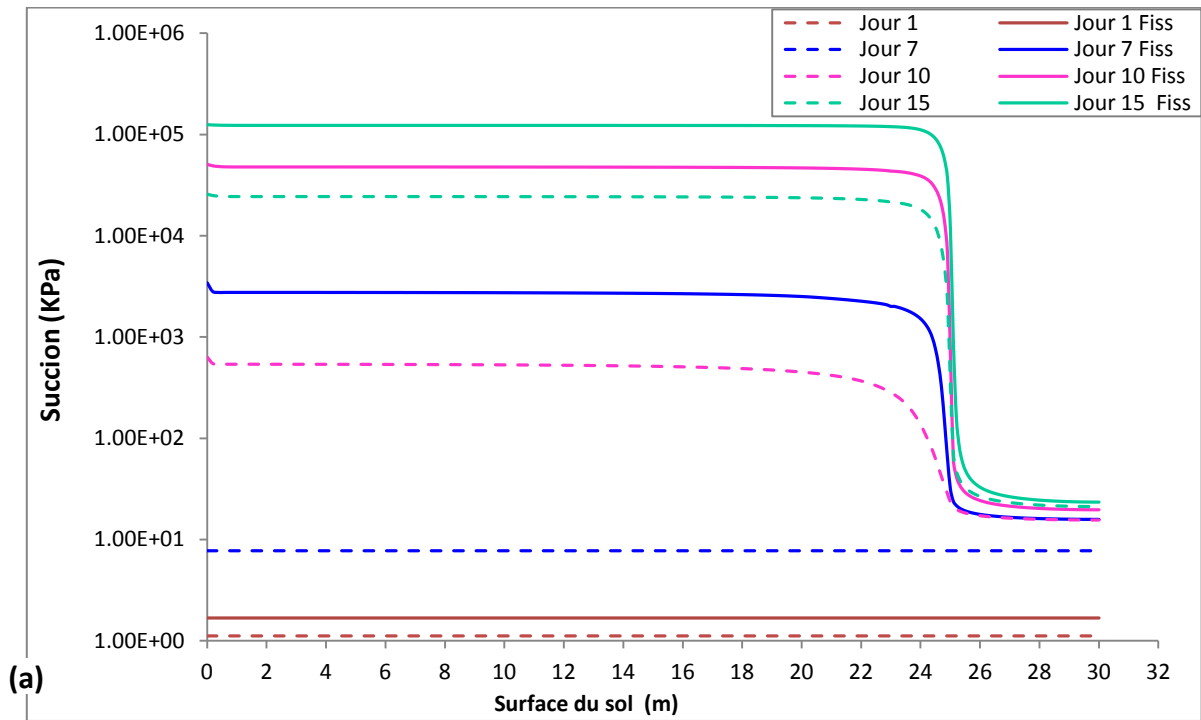


Figure 3.31: Influence des fissures sur la suction induite à la surface par l'interaction sol-: a) après 1, 7, 10 et 15 jours ; b) après 20, 25 et 30 jours

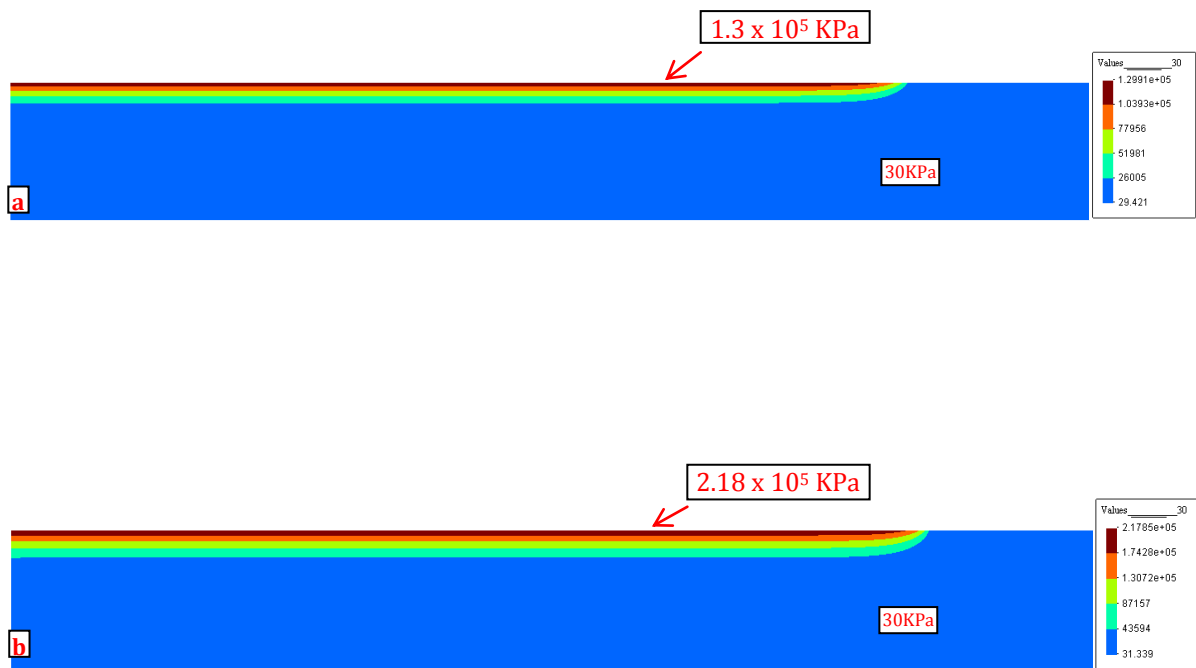


Figure 3.32: Influence des fissures sur la succion induite dans le massif du sol après 30 jours: a) Sol intact, b) Sol fissuré

3.6. Influence des fissures sur le comportement mécanique

3.6.1 Modèle numérique

Dans cette partie, on présente l'influence de la sécheresse sur le mouvement des sols induit par la variation de la succion qui peut induire des déformations des sols et par conséquent des mouvements des sols. L'objectif de cette étude est de montrer l'influence des fissures sur le mouvement des sols provoqué par la sécheresse.

La modélisation est effectuée dans deux phases. La première concerne l'interaction sol-atmosphère qui permet de déterminer la succion induite par cette interaction. La seconde phase comporte une analyse mécanique du problème des sols soumis à un champ de déformation induit par la succion. Ce calcul est effectué à l'aide du code de calcul FLAC3D.

Le modèle utilisé dans ce travail est basé sur l'approche de Fredlund et Morgenstem (1977). Cette approche utilise la contrainte nette ($\sigma - u_a$) et la succion ($u_a - u_w$) pour déterminer les déformations:

$$\epsilon_x = \frac{(\sigma_x - u_a)}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_y + \sigma_z - 2u_w) + \frac{(u_a - u_w)}{H} \quad [3.27]$$

$$\epsilon_y = \frac{(\sigma_y - u_w)}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_z - 2u_w) + \frac{(u_a - u_w)}{H} \quad [3.28]$$

$$\epsilon_z = \frac{(\sigma_z - u_w)}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y - 2u_w) + \frac{(u_a - u_w)}{H} \quad [3.29]$$

Où:

- $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ = déformations dans les directions x, y et z
- H : module d'élasticité de sol (pour la partie hydrique) lié à la succion ($u_a - u_w$)
- E : module d'élasticité de sol lié (pour la partie mécanique) aux contraintes ($\sigma - u_a$)

Le module élastique (E) peut être exprimé en fonction de l'indice de changement de volume C_s , de l'indice de vide initial e_0 et du coefficient du poisson ν . Le module élastique hydrique (H) peut être exprimé en fonction de l'indice de changement de volume C_m de l'indice de vide initial e_0 et du coefficient du poisson ν . Les modules d'élasticité peuvent être exprimés comme suit (Hung et Fredlund, 2002) :

$$E = \frac{4,605 (1+\nu)(1-2\nu)(1+e_0)}{C_s} (\sigma_{ave} - u_a) \quad [3.30]$$

$$H = \frac{4,605 (1+\nu)(1-2\nu)(1+e_0)}{C_m} (u_a - u_w) \quad [3.31]$$

Avec $\sigma_{ave} = (\sigma_x + \sigma_y)/2$: la contrainte normale moyenne

L'approche utilisée dans ce travail a été adoptée par d'autres chercheurs (Vu et Fredlund (2004, 2006); Amarasiri et al., 2011).

Le calcul est effectué d'après la procédure suivante :

- 1) La succion induite par le phénomène de dessiccation est calculée avec le modèle d'échange sol-atmosphère présentée dans la partie précédente (section 3.2).
- 2) Les incréments de déformations dues à la succion sont déterminés comme suit:

$$\Delta \epsilon_{sh\ ij} = \left(\frac{\Delta \Psi}{H} \right) \delta_{ij} \quad [3.32]$$

- H : module d'élasticité de sol lié à la succion ($u_a - u_w$)
- E : module d'élasticité de sol lié aux contraintes ($\sigma - u_a$)

- 3) Les déformations dues à la succion sont introduits dans FLAC 3D par l'intermédiaire du langage FISH. Le code FLAC3D donne les champs de déformations, de contraintes et de mouvement du sol.

3.6.2 Application à un sol intact

3.6.2.1 Présentation de l'exemple

Le calcul est effectué sur un massif de sol argileux de 3m de profondeur. Le massif a été discrétisé dans son intégralité par des éléments finis rectangulaires à 4 nœuds. Le maillage total est constitué de 100 éléments et 242 nœuds.

Conditions initiales et Conditions aux limites

La figure 3.33 montre l'exemple étudié. Préalablement à tout chargement hydrique, un état initial de contrainte correspondant au poids propre du sol est défini. Ainsi, on a effectué un premier calcul avec pour seul chargement mécanique le poids du massif de sol, jusqu'à stabilisation des contraintes. Ensuite, on a pris les résultats de ce calcul comme état initial des calculs ultérieurs, en annulant les déplacements.

Les déplacements horizontaux et verticaux sont bloqués sur la base inférieure du massif du sol et les déplacements horizontaux sont bloqués sur les frontières verticales du domaine. Les figures 3.33-a et 3.33-b montrent le modèle numérique tridimensionnel et les conditions aux limites.

Paramètres du sol

Le sol est modélisé par un comportement isotrope élastique linéaire. L'indice de changement du volume C_m est pris égal à 0.08, le coefficient de Poisson $\nu = 0.4$, le module d'Young $E = 10\text{MPa}$ et l'indice de vide initial e_0 est égal à 1.

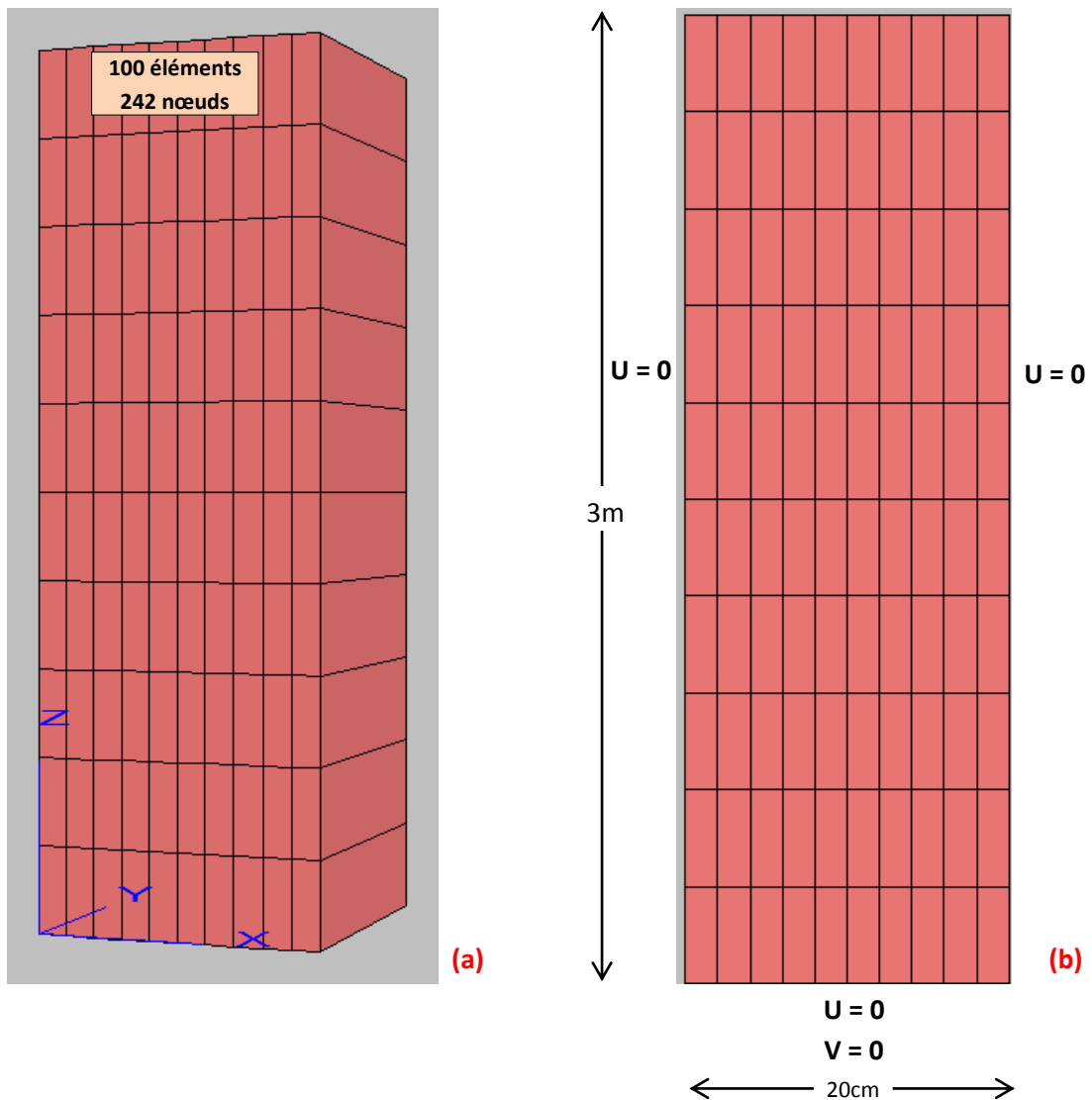


Figure 3.33: Géométrie du modèle numérique (a) et conditions aux limites (b)

3.6.2.2 Variation de la succion

La variation de la succion dans le massif du sol due au séchage a été obtenue par des simulations réalisées avec le modèle d'échange sol - atmosphère. Durant les simulations, les mêmes conditions climatiques et les mêmes propriétés du sol argileux de la partie précédente sont utilisées. La figure 3.34 donne la variation de la succion. La figure 3.35 montre la variation du module d'élasticité H avec la profondeur calculé d'après l'équation (3.30).

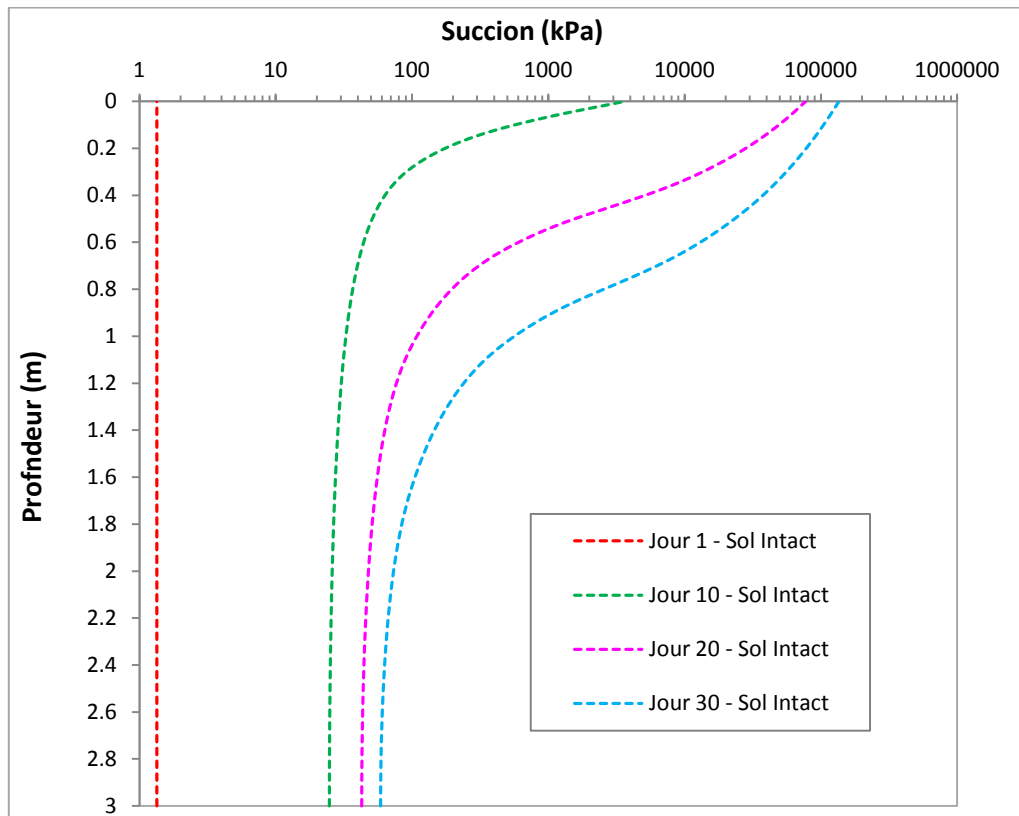


Figure 3.34: Succion déterminée par le modèle d'interaction sol-atmosphère

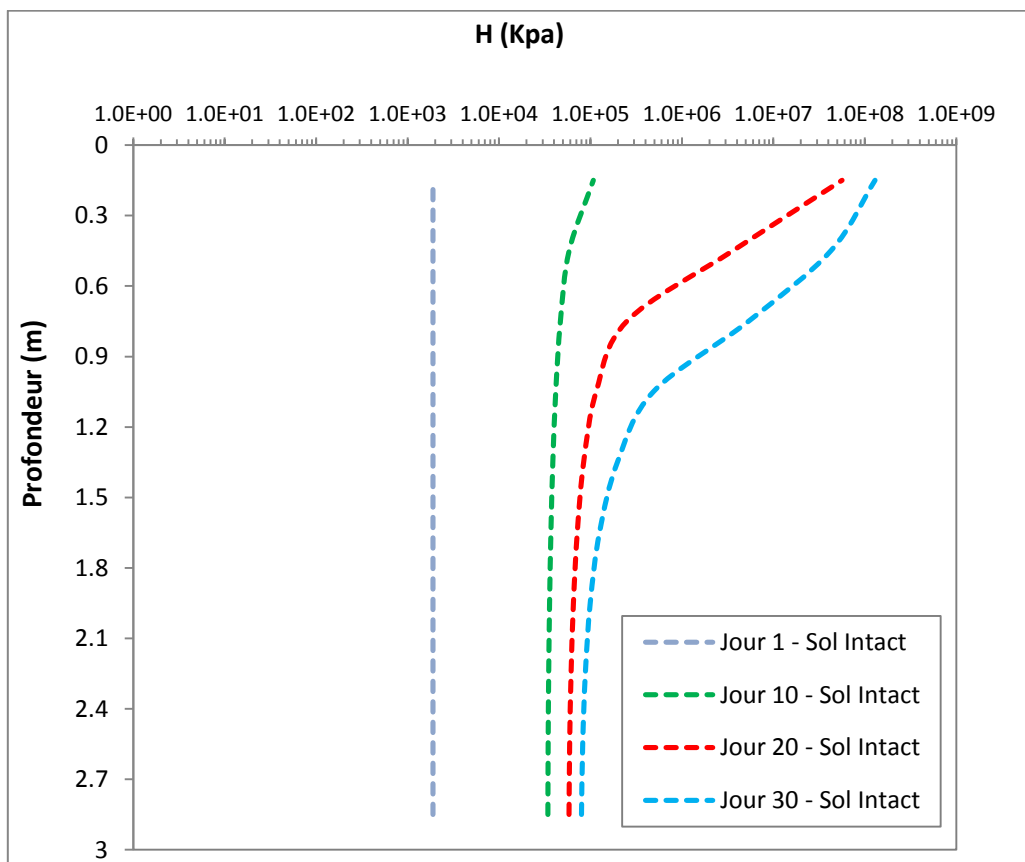


Figure 3.35: Variation du module (H) induite par la variation de la succion

3.6.2.3 Champs de déplacement

Solution analytique

Le sol est divisé en plusieurs couches (Figure 3.36-a). Pour chaque couche de sol, les déformations sont déterminées d'après la formule suivante :

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{d\Psi_i}{H(i)} \quad [3.33]$$

Par intégration, la variation de l'épaisseur de la couche est calculée par:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{\eta} \log [\Psi(t)] \quad [3.34]$$

$$\Delta h(t) = \frac{1}{\eta} \log [\Psi(t)] * h_i \quad [3.35]$$

η est une constante déduite de l'équation (3.30) et qui dépend des propriétés du sol.

Le tassement total du sol « Δh_t » est obtenu comme étant la somme du tassement de toutes les couches, comme suit :

$$\Delta h_t(t) = \sum_{i=1}^n \Delta h_i(t) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\eta} \log [\Psi(t)] \quad [3.36]$$

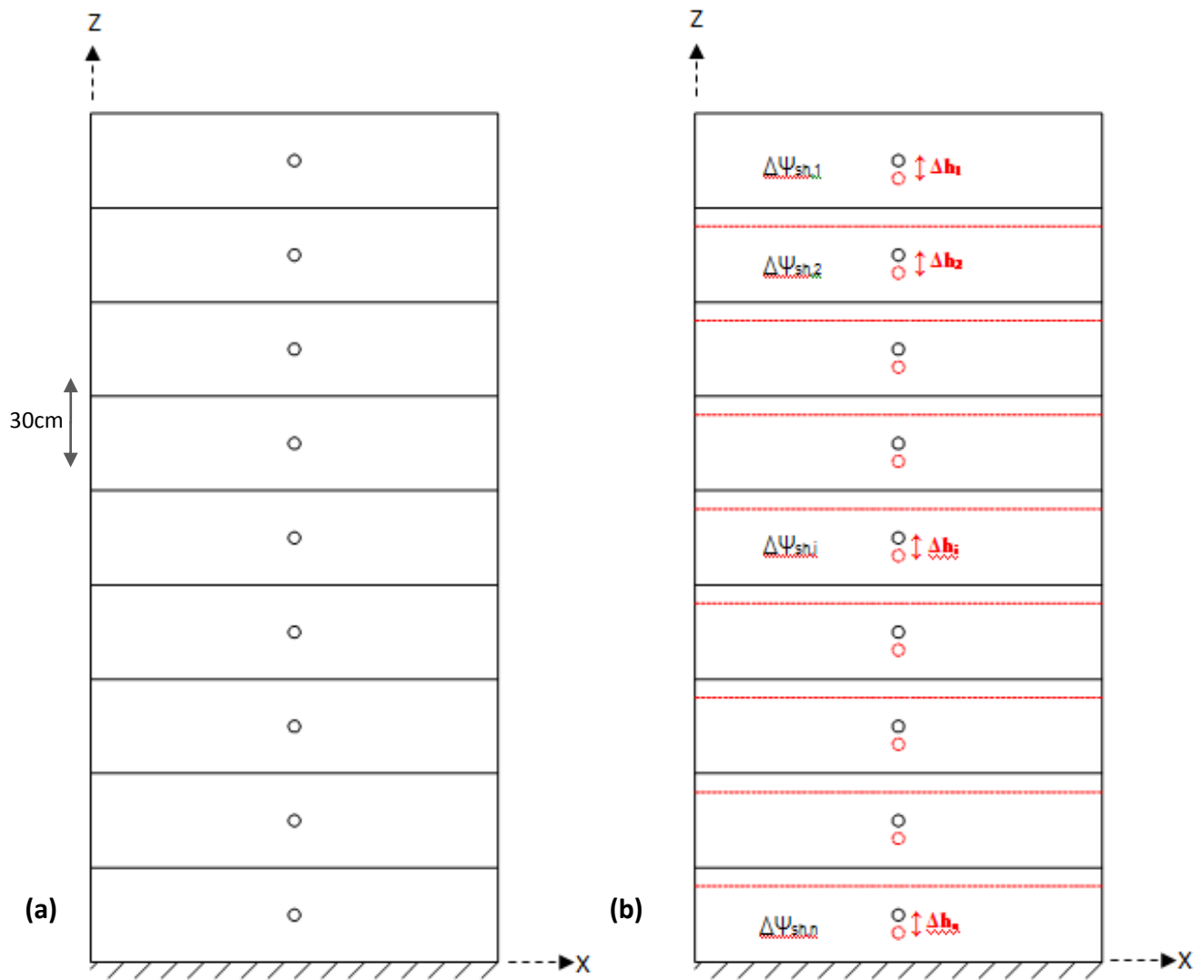


Figure 3.36: a) Etat initial: Avant l'imposition de la suction, b) Etat Final: Après l'imposition de la suction

La figure 3.37 montre l'évolution du tassement à la surface du sol sous l'effet de suction. On note que le tassement du sol augmente rapidement dès le début du chargement et poursuit son augmentation pendant la période des simulations. Il atteint 5.6 cm après 30 jours.

La figure 3.38 montre l'évolution du tassement en fonction de la profondeur du sol. L'intensité du tassement évolue comme la suction provoquée par le séchage augmente. On note les valeurs maximales du tassement dans la partie supérieure du sol. Cela revient au fait que la suction la plus développée est concentrée dans le premier mètre du sol (Figure 3.34).

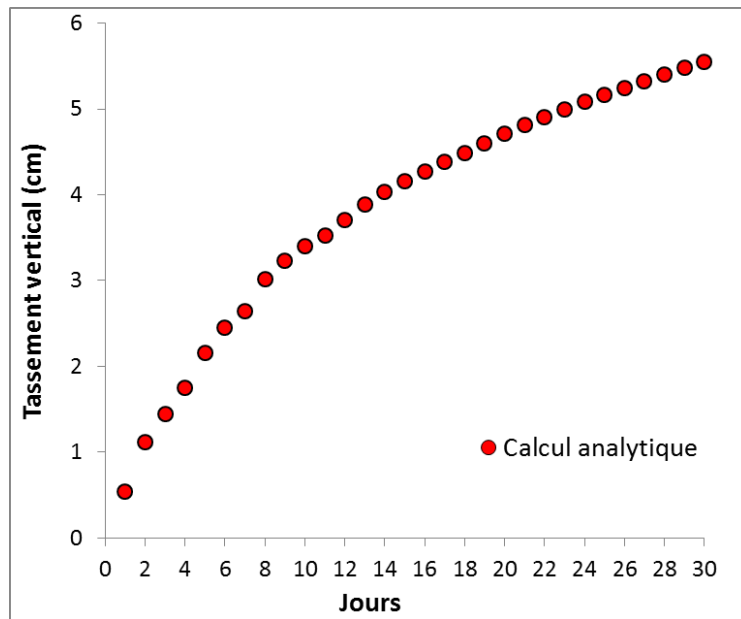


Figure 3.37: Evolution du tassement à la surface du sol : résultat obtenus par le calcul analytique

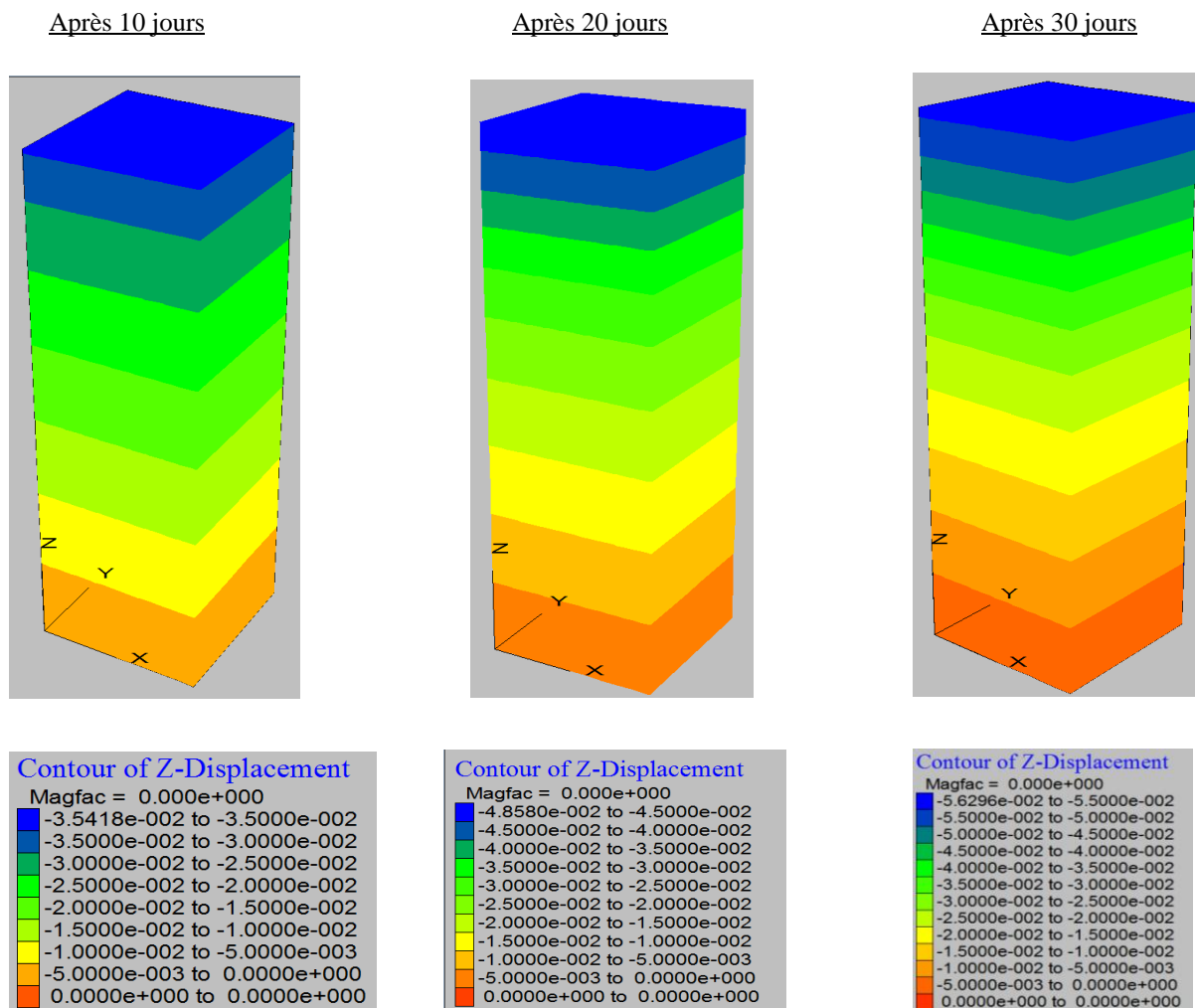


Figure 3.38: Evolution du tassement dans la profondeur du sol

Comparaison solution analytique - calcul FLAC 3D

La figure 3.39 montre une comparaison entre les résultats du tassement à la surface obtenus par le calcul analytique et le modèle implanté dans le logiciel FLAC 3D. Une bonne concordance entre les deux calculs est observée montrant ainsi la validité de l'approche avec le code FLAC 3D.

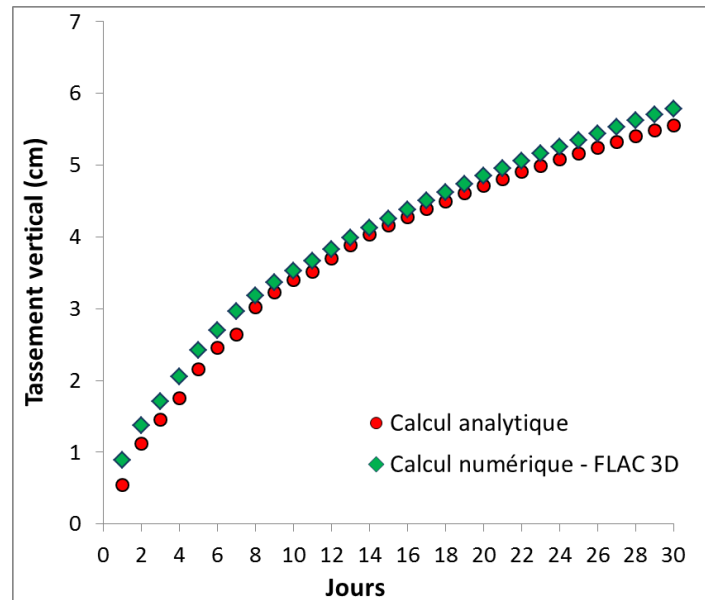


Figure 3.39: Comparaison entre le modèle analytique et calcul avec FLAC 3D - tassement à la surface du sol

3.6.3 Influence des fissures sur l'évolution du tassement vertical

3.6.3.1 Présentation

Dans le cas fissuré, on a utilisé l'approche simplifiée pour obtenir l'évolution de la succion en fonction de la profondeur. La valeur de λ adoptée dans le calcul est égale à 1.5. Ce qui correspond à un sol ayant des fissures à la surface de profondeur 15 cm espacées chaque 5cm. La figure 3.40 montre la succion retenue dans la modélisation du comportement mécanique d'un sol fissuré.

La figure 3.41-a montre une comparaison entre l'évolution de la succion dans le sol fissuré avec celle obtenue dans le cas intact. Dans la figure 3.41-b, on montre la variation du module 'H' dans

le sol intact et le sol fissuré. Le module (H) étant linéairement proportionnel à la succion, on note la variation la plus importante de ce paramètre dans le premier mètre du sol. En fait, c'est la zone d'influence des fissures sur l'évolution hydrique dans le sol.

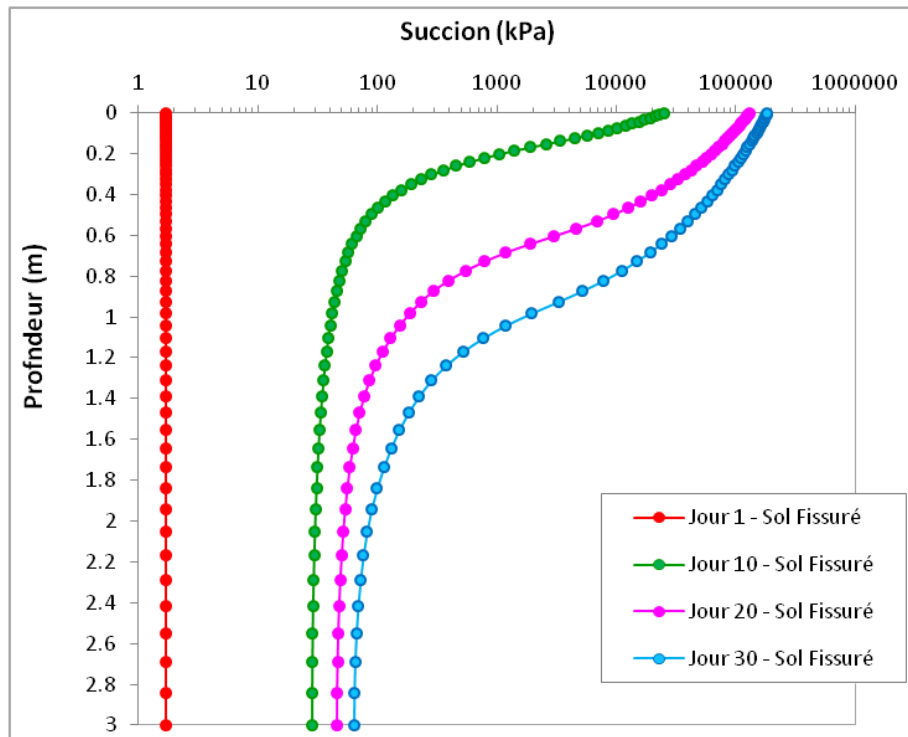
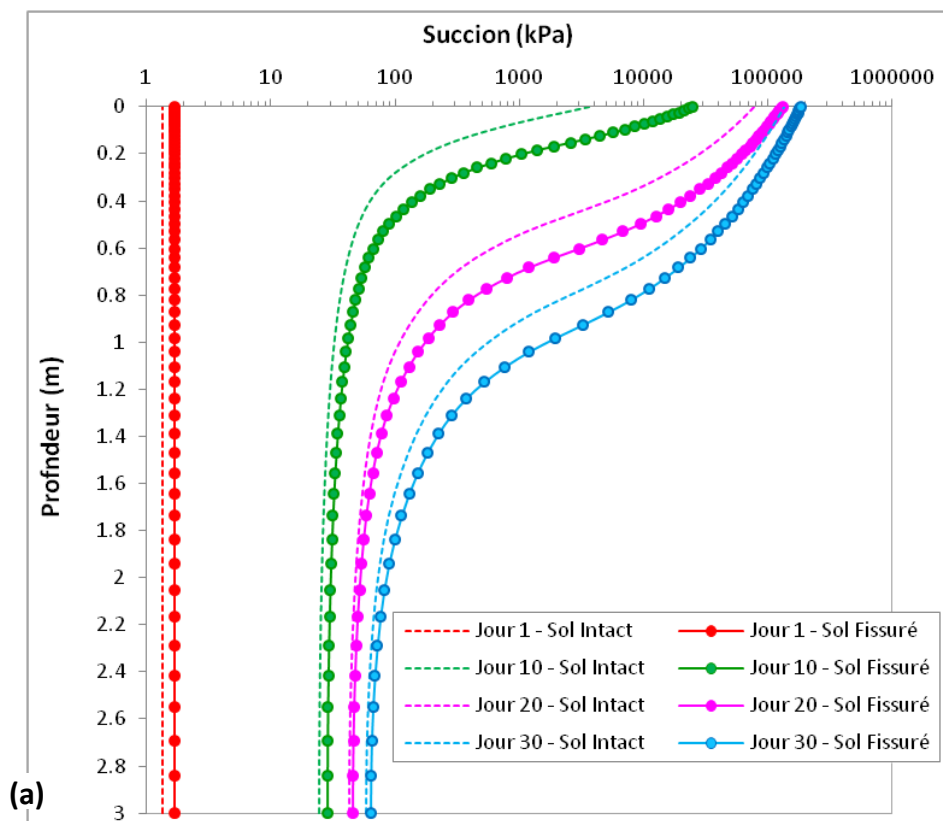


Figure 3.40: Succion retenue pour le calcul du tassement dans le sol fissuré



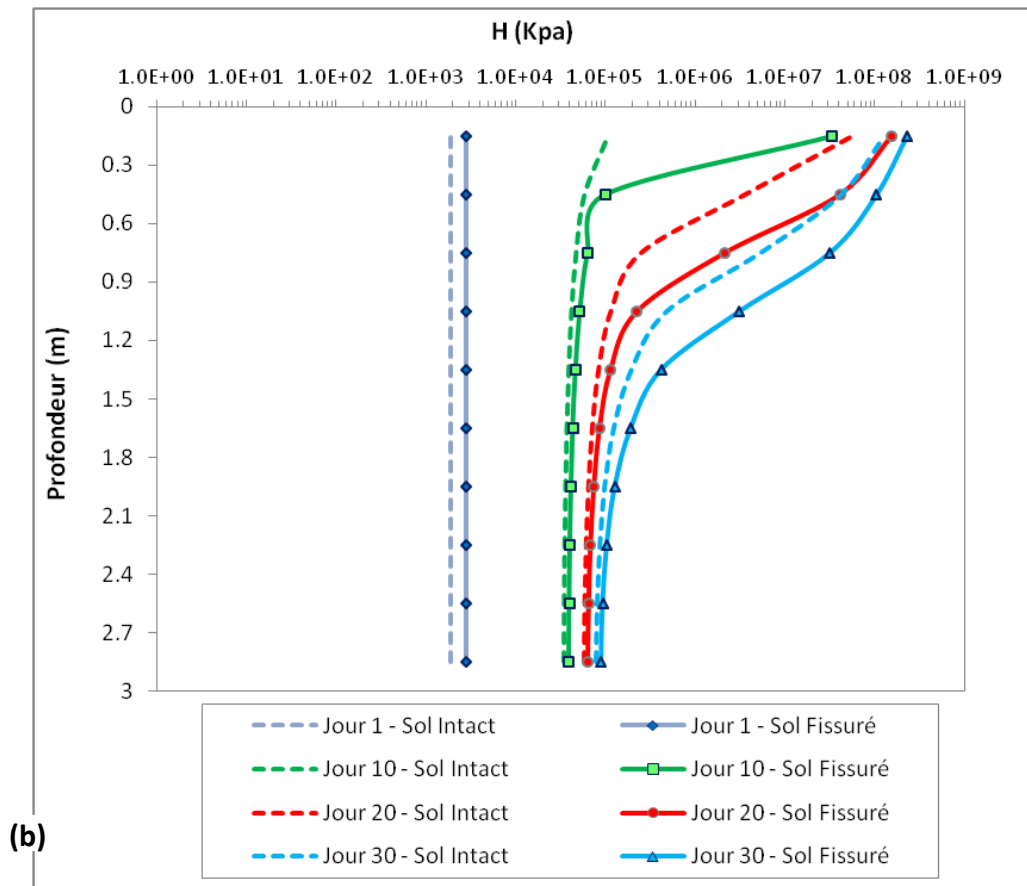


Figure 3.41: Influence des fissures sur la variation de la succion (a), Influence des fissures sur la variation du module élastique H (b)

3.6.3.2 Résultats et discussions

La figure 3.42 montre la variation du mouvement du sol et dans la figure 3.43, on montre l'évolution du tassement dans le profil du sol.

La succion Ψ augmente considérablement en présence des fissures. La variation de la succion ($\Delta\Psi$) provoquée par le séchage est ainsi plus importante dans le sol fissuré. Il en est de même pour le module élastique (H) comme le montre la figure 3.41-b. La déformation verticale du sol étant fonction de $\Delta\Psi$ et de H, on obtient alors le même ordre de grandeur dans le cas intact et fissuré.

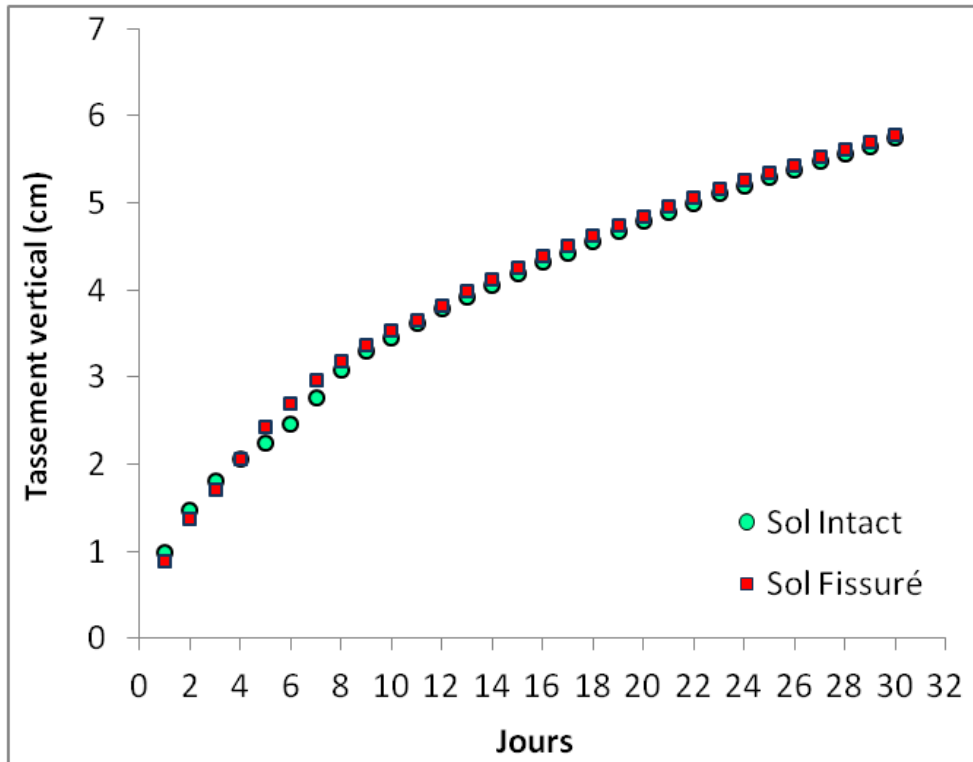


Figure 3.42: Evolution du tassement à la surface du sol dans le cas intact et fissuré

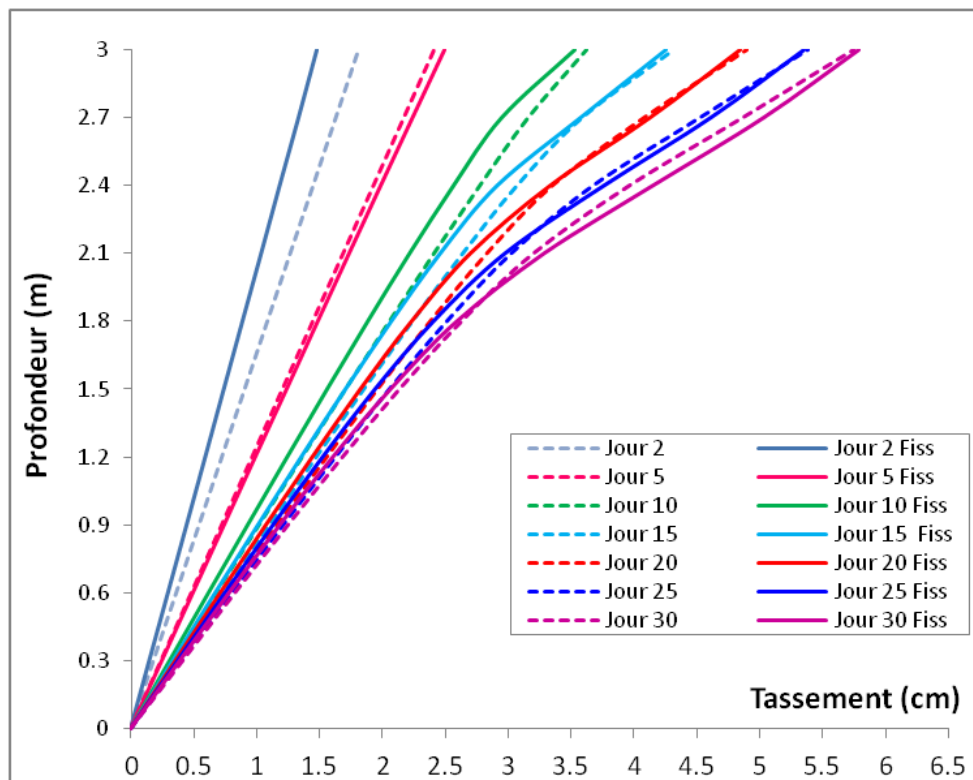


Figure 3.43: Evolution du tassement dans le massif du sol

3.7. Conclusion

Ce chapitre a comporté une analyse de l'influence des fissures sur le phénomène de sécheresse. Des analyses effectuées à l'aide d'un code d'éléments finis ont montré que :

- La non prise en compte des fissures dans l'échange sol-atmosphère peut conduire à une sous-estimation du taux d'évaporation. Les fissures augmentent le taux d'évaporation d'une façon importante. Dans le cas d'un sol fissuré, une évaporation additionnelle provient de la surface des fissures. Dans l'exemple avec une fissure de 15cm de profondeur, on a obtenu une augmentation du taux d'évaporation de l'ordre de 24% par rapport au sol intact.
- La présence des fissures accélère la cinématique de perte d'eau surtout dans la couche superficielle et fait augmenter la succion. La fissure constitue en fait un espace supplémentaire qui accélère le transfert d'eau. La teneur en eau résiduelle est atteinte plus rapidement en présence des fissures. Ensuite, l'effet des fissures apparaît dans des zones plus profondes.
- Une distribution non uniforme de la succion est observée dans la couche de surface avec une concentration au voisinage des fissures.
- La présence des fissures réduit le temps nécessaire pour atteindre les conditions d'entrée d'air. Les résultats d'analyses montrent que la phase de désaturation est atteinte après 4 jours pour un sol ayant des fissures de 15 cm de profondeur alors que pour un sol intact, il faut attendre 10 jours pour atteindre cette condition.

Compte tenu de la forte influence des fissures sur l'interaction sol-atmosphère et afin de simplifier l'étude de cette interaction, on a proposé un modèle simplifié qui permet de remplacer le massif du sol fissuré par un massif équivalent «intact». Le modèle est basé sur la considération d'une surface de contact «sol-atmosphère» équivalente:

$$L_{\text{eff}} = L_{\text{intact}}(1+\lambda)$$

L_{intact} désigne la surface de contact sol-atmosphère du sol intact. Le paramètre λ définit le taux de fissuration des sols. La validation de ce modèle a été réalisée en comparant les résultats de ce

modèle au modèle numérique standard. Une bonne concordance entre les deux modèles a été obtenue tant au niveau de la variation de la succion qu'au niveau du flux d'évaporation. Une formule a également été proposée pour déterminer la variation du taux d'évaporation d'un sol fissuré à partir de celui d'un sol intact. Cette formule fait intervenir le taux de fissuration (λ) et un paramètre dépendant du temps qu'on peut déterminer par simulations numériques.

Une étude de l'échange sol-atmosphère en présence d'une structure a été effectuée. Un développement important de la succion dans la couche superficielle de la surface située à l'extérieur de la structure. Sous la structure, la succion développée est très faible et presque constante durant toute la période des simulations du fait d'un retard de séchage. Une zone critique de transition se trouve à l'extrémité de la structure où la succion croît rapidement induisant ainsi un gradient de succion très fort. Cette distribution de la succion peut induire un tassement différentiel entre la zone couverte par la structure et la zone exposée à l'échange sol-atmosphère, qui peut être à l'origine des désordres importants dans les structures.

Une modélisation numérique pour étudier l'influence des fissures sur l'évolution du tassement du sol a été également effectuée. L'analyse est effectuée à l'aide d'une approche découplée. La succion induite par la dessiccation est d'abord déterminée par la résolution numérique du modèle d'échange sol-atmosphère. Puis, le calcul mécanique est effectué à l'aide du code FLAC 3D. Les résultats obtenus ont montré que la présence des fissures n'affecte pas le tassement du sol. Cela est principalement dû au fait que l'augmentation de la succion induit une augmentation du module d'élasticité de sol lié à la succion (H) qui neutralise l'effet de la succion sur la déformation.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail de thèse visait l'étude du phénomène de sécheresse qui résulte de l'interaction sol-atmosphère en prenant en compte la présence des fissures dans les sols fins. Il comporte une étude expérimentale et numérique.

L'étude bibliographique a permis d'analyser les différents aspects du comportement des sols non saturés et les modèles proposés pour l'interaction sol-atmosphère. Elle a mis en évidence l'interaction entre l'évaporation et les différents paramètres du sol et de l'air comme la teneur en eau, la succion, la température, l'humidité relative, le rayonnement et la fissuration. Elle a mis en évidence une forte influence des fissures sur le comportement thermo-hydro-mécanique des massifs des sols fins.

L'étude expérimentale a été réalisée au laboratoire au Japon. Elle a comporté des essais de séchage à succion imposée sur des échantillons d'argile Kaolinite intacts et fissurés. On a étudié les propriétés de rétention et du retrait de l'argile Kaolinite en utilisant la méthode translation d'axes et la méthode par phase vapeur pour le contrôle de succion. Les essais ont montré que la phase de retrait dans les échantillons fissurés est très courte et que le développement des fissures domine le comportement des sols fins. On a aussi noté que la présence des fissures affecte la cinétique de séchage : la vitesse de perte d'eau augmente avec la fissuration engendrant un taux ainsi d'évaporation plus important. En ce qui concerne la courbe de rétention, les essais ont montré que la courbe de rétention n'est pas affectée par la présence des fissures.

La partie numérique a comporté une modélisation du processus de sécheresse des sols fissurés. L'interaction sol-atmosphère a été introduite dans un programme de transfert d'humidité et de chaleur. Il a permis d'analyser l'influence des conditions atmosphériques sur les variations du taux d'évaporation, de la succion et d'humidité dans le massif de sol. Les résultats de modélisation ont montré que la présence des fissures fait accélérer le processus d'évaporation. Cette accélération résulte de l'évaporation additionnelle sur les surfaces des fissures. On a noté des gradients de teneur en eau plus important en présence des fissures associés au développement plus important de la succion. L'effet des fissures est d'abord concentré dans la zone proche de la surface du sol, puis il s'étend dans des zones plus profondes.

Le temps critique d'entrée d'air (AEV) est un paramètre important car il caractérise le début de la désaturation des sols initialement saturés. Les résultats des simulations ont montré que la présence des fissures réduit le temps nécessaire pour atteindre les conditions d'entrée d'air.

Compte tenu de la forte influence des fissures sur l'interaction sol-atmosphère, un modèle simplifié tenant compte de la présence des fissures dans l'interaction sol-atmosphère a été proposé. Ce modèle permet de remplacer le massif du sol fissuré par un massif équivalent « intact ». Il est basé sur la considération d'une surface de contact «sol-atmosphère » équivalente prenant en compte la surface additionnelle des fissures. La validation de cette approche, par sa confrontation au modèle conventionnel, a donné des bons résultats. Cette approche peut ainsi être utilisée pour étudier d'une manière simplifiée la sécheresse des sols fissurés.

L'étude de l'influence des fissures sur l'interaction sol-atmosphère en présence d'une structure a montré que cette présence accélère le phénomène de sécheresse dans la zone libre (en dehors de la structure) avec un fort gradient de succion au voisinage de l'extrémité de la structure, qui peut être à l'origine des désordres dans cette structure. Des recommandations ont été établies pour la construction en zone soumise au risque de sécheresse.

Le couplage thermo-hydro-mécanique a été effectué. Les succions déterminées par les analyses thermo-hydriques, sont introduites dans le code FLAC3D pour déterminer les champs de déplacement, de déformation et des contraintes dans le massif du sol. Les études réalisées en l'absence de la structure ont montré une faible influence des fissures sur la réponse mécanique des sols.

Cette étude pourra être utilisée pour étudier des dispositions de protection des structures en zone exposée au risque de sécheresse. Des recommandations qui concernent à la fois les sols et la structure peuvent être établies pour la construction en zone soumise au risque de sécheresse.

Le travail ouvre des larges perspectives, notamment le développement d'un modèle capable de décrire correctement les mécanismes d'initiation et de propagation des fissures et leur influence sur l'interaction sol-structure.

Dans le présent travail, l'étude du couplage hydro-thermo-mécanique a été effectuée pour une application relativement simple. La réalité peut correspondre à des situations beaucoup plus complexes. En présence des fissures, on se rapproche plutôt d'un milieu discontinu. La suite de ces travaux devrait aussi porter sur des simulations numériques à grande échelle, afin d'étendre notre compréhension du mécanisme de fissuration sur le comportement mécanique des massifs de sol en présence des structures.

Références

- Abbaszadeh, M., Houston, S., Zapata, C. Houston, W., Welfert, B, Walsh, K. (2011). Laboratory determination of soil-water characteristic curves for cracked soil. *Proceedings of the 5th International Conference on Unsaturated Soils, Barcelona, Sept 6 – 8*, (pp. 187-194, CRC Press/Balkema, ISBN: 978-0-415-60428-4).
- Abu-Hejleh, A.N., Znidarcic, D., 1995. Desiccation theory for soft cohesive soils. *Journal of Geotechnical Engineering* 121 (6), 493–502.
- Al-Qadad, A., 2009. Influence de la Sécheresse sur les Structures : Modélisation de L'Interaction Sol-Atmosphère-Structure. Ph.D. Thesis, Université des Sciences et Technologies de Lille, France.
- Alonso, E.E., Gens, A., Hight, D.W., 1987. Special problem soils, general report, Proc. 9th ECSMFE Vol. 3. Balkema, Dublin, pp. 1087–1146.
- Alonso, E.E., Gens, A., Josa, A., 1990. A constitutive model partially saturated soils. *Geotechnique* 40 (3), 405–430.
- Albrecht B.A, Benson C.H., “Effect of desiccation on compacted natural clay”, *J. Geotech. Geoenviron.*, vol. 127, no1, 2001, p. 67-75.
- Alonso, E.E., and Olivella, S. 2006. Unsaturated soil mechanics applied to geotechnical problems. *Unsaturated Soils*, Publication No. 147. (1-2): 1-35.
- Amarasiri, A.L., Kodikara, J.K., Costa, S. (2011). Numerical modelling of desiccation cracking. *INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL AND ANALYTICAL METHODS IN GEOMECHANICS*. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* , 35:82–96.
- Arbizzi, S., Kreziak, C., Barraud, D., Larrere, F., Souvignet, S., Nagel, B., (2008). Analyse d'une base des données « pathologies liées à la sécheresse » et mise en relation avec les sols support. *Symposium international Sécheresse et constructions, SEC 2008, 1-3 Septembre 2008, Marne la vallée, France*, 385-391.
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B., & Chapuis, R.P. (2003). A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(6), 1104- 1122
- Aubertin, M., Ricard, J.-F., & Chapuis, R.P. (1998). A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(1), 55-69
- Aydin, M. (1998). A new model for predicting evaporation from bare field soil. In: *Proceedings of the International Symposium and second Chinese National Conference on Rainwater Utilization*, (pp. 283–287). Xuzhou-Jiangsu, China,.

- Aydin, M., and Huwe, B. (1993). Test of a combined soil moisture/ soil heat simulation model on a bare field soil in Southern Turkey. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* , 156,441–446.
- Aydin, M., Yang, S. L., Kurt, N., & Yano, T. (2005). Test of a simple model for estimating evaporation from bare soils in different environments. *Ecological Modelling*, 182, 91–105.
- Aydin, M.,and Uygur, V. (2006). A model for estimating soil water potential of bare fields. In *Proceedings of the 18th International Soil Meeting (ISM) on Soils Sustaining Life on Earth, Managing Soil and Technology, Şanlıurfa* , 477–480.
- Azam,S., Ito, M. (2011). Unsaturated soil properties of a fissured expansive clay. *Pan-Am CGS Geotechnical Conference* .
- Ben-Asher, J., Matthias. A.D, Warrick, A.W., 1983. Assessment of evaporation from bare soil by infrared thermometry, *Soil Sci. Soc. Am, J.*, 47, 185-191
- Bertin M., Faroux J.P., Renault J. (1981). *Thermodynamique. Cours de Physique*, 3ème édition, Dunod.
- Biddle, P.G., (1983) Pattern of soil drying and moisture deficit in the vicinity of trees on clay soils, *Géotechnique*, 33, No. 2, 107-126.
- Blatz J. Cui Y.J, Oldecop L., « Vapour Equilibrium and Osmotic Technique for Suction control», *Geotechnical and Geological Engineering* ; vol 26, n°6, 2008, pp. 661-673.
- Blight, G.E. (1997). "Interactions between the Atmosphere and the Earth". *Géotechnique*, 47(4), 715-767
- Boivin, P., Garnier, P, & Vauclin, M. (2006). Modeling the soil shrinkage and water retention curves with the same equations. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 1082-1093
- BRGM (Communique de presse, Orléans, le 12 juillet 2011): Sécheresse 2011: Aléa retrait-gonflement des sols argileux et prévention
- Brooks RH, Corey AT (1964). Hydraulic properties of porous media. Colorado State University Hydrology Paper, Fort Collins, Nr. 3, vol. 27, March
- Caballero Y., Morel S., Habets F., Noilhan J, Le Moigne P., Lehenaff A., Boone A., 2007, Hydrological sensitivity of the Adour Garonne river basin to climate chnage, *Water Ressources, Water Resources Research*, **43**, W07448.
- Campanella, R.G. and Mitchell, J.K., 1968. "Influence of Temperature Variations on Soil Behavior", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 94, No. SM3. *Proceedings paper 5958*, pp. 709-734
- Chertkov, V. Y. (2004). A physically based model or the water retention curve of clay pastes. *Journal of Hydrology*, 286, 203-226

Chrétien M., Lataste J.F., Fabre R. (2010). Suivi hydro géophysique in-situ du phénomène hydratation-dessiccation des sols argileux. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2010 -Grenoble 7-9 juillet 2010 .

Cojean R., 2008. Présentation de projets de recherche récents ou en cours se rapportant à la sécheresse géotechnique. Symposium international Sécheresse et Constructions (SEC 2008). Editions LCPC, Paris, pp. 427-430.

Cojean R., Audiguier M., Geremew Z., Laribi S., Thénevin I., Cui Y.J., Tang A.M., Ta A.N., Heck J.-V., Taillefer N., Deffontaines B., Kaveh F., Fruneau. (2009). ALEA ET RISQUE SECHERESSE Analyse du comportement des sols argileux lors de cycles climatiques extrêmes.

Commission européenne, 2007. Manque d'eau et sécheresse en Europe: la Commission se saisit de cette question vitale. Bruxelles. Available online on: http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/scarcity_en.htm

Cui, Y. J., Lu, Y. F., Delage, P., and Riffard, M., 2005, "Field simulation of in situ water content and temperature changes due to ground-atmospheric interactions," *Geotechnique*, Vol. 55, No. 7, pp. 557-567.

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.*

De Vries, D.A. 1963. Thermal properties of soils. In *Physics of plant environment*. Edited by W.R. Van Wijk, North Holland Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands, pp. 210-235.

Demarty J.(2001). Développement et application du modèle SISPAT-RS à l'échelle de la parcelle dans le cadre de l'expérience Alpilles ReSeDA. Thèse ,université PARIS 7-DENIS DIDEROT ,UFR de PHISIQUE.

Deng, G., & Shen, Z.-J. (2006). Numerical simulation of crack formation process in clays during drying and wetting. *Geomechanics and Geoengineering*, 1(1), 27-41

Dalton, J., 1802, "Experimental Essays on the Constitution of Mixed Gases: On the Force of Steam or Vapor from Water or Other Liquids in Different Temperatures, Both in a Torricelli Vacuum and in Air; on Evaporation; and on Expansion of Gases by Heat," *Manchester Literary Philosophical Society Mem.*, pp. 536–602.

Delage P., Howat M. et Cui Y.J. (1998) *The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay*. *Engineering Geology* (50) 1-2, p. 31-48

Delage P., Cui Y.J., 2000. Comportement mécanique des sols non saturés. C302, Techniques de l'ingénieur *Traité Construction*, vol. c2.

Delage, P., Cui, Y.-J. (2000a). L'eau dans les sols non saturés. *In Technique de l'Ingénieur, traité Construction*, Vol C2, C(301), 1-20.

- Ducreux, G.H., Marand, A.B. (2008) Etudes de cas de fissurations de bâtiments liées à la dessiccation du sol. Importance de la configuration initiale de l'ouvrage. Symposium international Sécheresse et constructions, SEC 2008, 1-3 Septembre 2008, Marne la vallée, France, 393-398.
- Edlefsen, N. E., Anderson A. B. C., (1943): Thermodynamics of soil moisture. *Hilgardia*, 15, 31-298.
- Fredlund D.G., Morgenstem (1977). Stress state variables for unsaturated soils (1).ASCE J; Geotech. Eng.Div.GT5, 103, 447-466.
- Fredlund, D. G., and Rahardjo, H. 1993. Soil mechanics for unsaturated soils. New York: John Wiley & Sons.
- Fredlund, D. G. and Xing, A. 1994. Equations for the soilwater characteristic curve, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, No. 3: 521-532.
- Fredlund, D., Houston, S., Nguyen, Q., Fredlund, M. (2010). Moisture Movement Through Cracked Clay Soil Profiles. *Geotech. Geol. Eng.*28 , pp.865- 888.
- Fox, M.J., 1968. A technique to determine evaporation from dry stream beds, *J.Appl. Meteorol.*, 7, 679-701
- Gardner, W.R. (1958). "Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table". *Soil Science*, 85, 228 -232.
- Graham. C.B., 2004. Evaporation from Bare Soil and Soil Cracks: A Numeric Study. Thesis-Master of Science Oregon State University
- Hallaire, V. (1984). "Evolution of crack networks during shrinkage of a clay soil under grass and winter wheat crops." *Proceedings, 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, 1 39-145.
- Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Knutson, C. L., et Wilhite, D. A., 2004, "Estimating the economic impacts of drought,"Seattle, WA.,United states,American Meteorological Society, pp.5241-5243.
- Hillel, D., 1975, "Simulation of evaporation from bare soil under steady and diurnally fluctuating evaporativity," *Soil Science*, Vol. 120, No. 3, pp. 230-237.
- Hillel, D. (1980). Applications of Soil Physics. AcademicPress,New York, London , p. 385.
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. Academic Press, San Diego, CA. 771 p
- Hillel, D. (2004). "Introduction to environmental soil physics".
- Hilf JW., 1956. An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils, Ph. D. Thesis.n Technical Memorandum No. 654, United State Department of the Interior Bureau of Reclamation, Design and Construction Division, Denver, Colorado, USA.

- 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
- Hung, Q.V., and Fredlund, D.G. 2002. Using Volume Change Indices for Two-dimensional Swelling Analysis. Proceedings of the 55th Canadian Geotechnical and 3rd Joint IAHC-CNC and Groundwater Specialty Conferences. Niagara Falls, Ontario, pp. 505- 511
- IPCC. (2001). Climate change 2001. The scientific basis. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC-GIEC, (2007) *Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse*, un rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 114p.
- Jacquemin S.C., 2011. Laboratory Determination of Hydraulic Conductivity Functions for Unsaturated Cracked Fine Grained Soil .Thesis, Arizona State University.
- Kimball, B.A., Jackson, R.D., Reginato, R.J., Nakayama, F.S., and Idso, S.B. 1976. Comparison of field-measured and calculated soil-heat fluxes. *Soil Science Society of America Proceedings*, 40(1): 18-25.
- Kodikara, J. K., Barbour, S. L., and Fredlund, D. G. 2000. Desiccation cracking of soil layers, Proceedings of the Asian Conference in Unsaturated Soil, UNSAT ASIA 2000, Singapore, 18-19 May 2000: 693-698.
- Kodikara, J, Barbour, S. L., & Fredlund, D. G. (1998). An Idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation: Discussion. *Canadian Geotechnical Journal*, 35, 1112-1114
- Kodikara, J.K., Choi, X. (2006). A simplified analytical model for desiccation cracking of clay layers in laboratory tests. *Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils, Carefree, AZ, United State* (Vol. 2, pp. 2558-2567). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Konrad, J.M. et Ayad, R. (1997). Desiccation of a Sensitive Clay : Field Experimental Observations. *Canadian Geotechnical Journal*, n°34 , p. 929-942.
- Krisdani, H., H. Rahardjo and E. Leong, 2008. Effects of different drying rates on shrinkage characteristics of a residual soil and soil mixtures. *Engineering Geology*, 102(1-2): 31-37
- Kuhn, J. A., et Zornberg, J. G. (2006). "Field suction and effect of cracking in highly plastic clay." Austin. Rapport. pp. 176.
- Lai S., Tiedje J.M., Erickson A.E. (1976). In situ measurement of gas diffusion coefficient in soils. *Soil Science Society of America Proceedings*. 40(1):3-6.
- Lakshmikantha, M.R., Prat, P.C., Ledesma, A. (2006). An experimental study of cracking mechanisms in drying soils. *Proceedings of the ISSMGE's Fifth International Congress on Environmental Geotechnics, Cardiff University, ...* (Vol 1, pp 816-823).

- Lal, R., et Shukla, M. K., 2004, "Principles of Soil Physics " Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, pp. 699.
- 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.
- Lautenbacher, C. C., 2005, "From information to action: The global earth observation system of systems," San Diego, CA, United states, American Meteorological Society, pp. 37-61.
- Leong, E.C. & Rahardjo, H. (1997). Permeability functions for unsaturated soils. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123 (2), 1118-1126.
- Li JH, Zhang LM, Wang Y, Fredlund DG.,2009. Permeability tensor and REV of saturated cracked soil. *Can Geotech J*; 46:928–42.
- 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
- MAIF. 2000. La méthodologie de l'expertise « sécheresse ». 19p. et Annexes.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Asce, M., Maqsoud, A. & Bussière, B. (2006a). Predictive Model for the water retention curve of deformable clayey soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering ASCE*, 132(9): 1121-1132
- MEEDDAT, 2007. "Le retrait gonflement des argiles : comment prévenir les désordres dans les l'habitat individuel " – Face aux risques .
- MEEDDAT. 2008. Le retrait-gonflement des argiles. Comment prévenir les désordres dans l'habitat individuel?. 28p.
- Min, T-K., & Nhat, V. D. (2007). A Simple Model of Shrinkage Cracking Development for Kaolinite. *Journal of the KGS*, 23(9), 29-37
- Miller, C.J., Mi, H., Yesiller, N., 1998. Experimental analysis of desiccation crack propagation in clay liners. *Journal of the American Water Resources Association*, AWRA 34 (3), 677–686.
- Min, T-K., & Nhat, V. D. (2007). A Simple Model of Shrinkage Cracking Development for Kaolinite. *Journal of the KGS*, 23(9), 29-37
- Moisselin JM, Schneider M, Canellas C, Mestre O. 2002. Les changements climatiques en France au XXe siècle (Climate changes in France during the 20th century, in French). *La Météorologie* 38 : 45-56. Najac J. 2008. Impact du changement
- Moisselin, J.-M., Dubuisson, B., (2006), Evolution des extrêmes de températures et de précipitation en France au XXe siècle. *La Météorologie*, vol. 54, p. 33-42.
- Monteith, J.L. 1965. Evaporation and environment. In *The State and Movement of Water in Living Organisms*, Symposium: Society of Experimental Biology. VQ~1. 9. Edited by G.E. Fogg. Academic Press, San Diego, Calif. pp. 205-234.

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

Mualem, Y. (1976). "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media". *Water Resources Research*, 12, 513-522.

Musy, A., and Higy, C. (2004). "Hydrologie". Polytechniques et universitaires romandes.

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

Novak, V. (1999). Soil-crack characteristics estimation methods applied to heavy soils in the NOPEX area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 98 - 99, 501-507

Oleszczuk, R., & Brandyk, T. (2008). The analysis of shrinkage - swelling behaviour of peat - moorsh soil aggregates during drying - wetting cycles. *Agronomy Research*, 6(1), 131-140

Penman, H. L. (1948). "Natural evaporation from open water, bare soil and grass,". *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, , pp. 120-145.

Penman, H. L., 1956, "Estimating evaporation," *Trans. Am. Geophys. Union* 37, Vol. 37, pp. 43-50.

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

Péron, H., Herchel, T., Laloui, L., 2007. An improved volume measurement for determining soil water retention curves. *Geotechnical Testing Journal* 30 (1), 1–8.

Péron, H., 2008. Desiccation cracking of soils. 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 soils: experimental characterization and mechanisms identification. *Canadian Geotechnical Journal* 46, 1177–1201.

Pham, Q.H., Fredlund, D.G., and Barbour, S.L. 2003. A practical hysteresis model for the soil-water characteristic curve for soils with negligible volume change. *Géotechnique*, 53: 293–298.

Philip, J. R., et de Vries, D. A., 1957, "Moisture movement in porous materials under temperature gradients," *Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 38, No. 2, pp. 222-232.

Prat, P.C., Ledesma, A., Lakshmikantha, M.R., 2006. Size effect in the cracking of drying soil. In: Gdoutos, E.E. (Ed.), *Proceedings of the 16th European Conference of Fracture*. Springer.

Priestley, C.H.B., and Taylor, R.J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100: 81-92.

Projet ARGIC (Analyse du Retrait-Gonflement et de ses Incidences sur les Constructions) (mai 2009) Projet ANR-05-PRGCU-005, Rapport final BRGM/RP-57011-FR.

Projet ClimSec: Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol. France, 2011. J.-M. Soubeyroux, J.-P. Vidal, J. Najac, N. Kitova, M. Réalisé par la Direction de la Climatologie de Météo-France avec le soutien de la FONDATION MAIF.

Pruess, K., A. Simmons, Y.S. Wu, and G. Moridis. 1996. TOUGH2 Software Qualification Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California.

Qui, G.Y., Yano, T., Momii, K., 1998. An improved methodology to measure evaporation from bare soil based on comparison of surface temperature with a dry soil surface. *Journal of Hydrology*, 210, 93-105

Rayhani, M.H.T., Yanful, E.K., and Fakher, A. 2007. Desiccation-induced cracking and its effect on the hydraulic conductivity of clayey soils from Iran. *Can. Geotech. J.*, 44: 276-283.

Rayhani, M.H.T., Yanful, E.K., and Fakher, A. 2008. Physical modeling of desiccation cracking in plastic soils. *Engineering Geology*, 97: 25-31.

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

Ritchie, J.T. 1972. Model for predicting evapotranspiration from a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.* 8 : 1204-1213

Ritchie, J. T., et Adams, J. E., 1974, "Field measurement of evaporation from soil shrinkage cracks," *Proceedings of the Soil Science Society of America*, Vol. 38, No. 1, pp. 131-134.

Richards L.A. - A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution. *Soil science*, 51, pp. 377-386, 1941.

Romero E. Characterisation and thermo-hydromechanical behavior of unsaturated Boom clay: an experimental study, Ph. D. thesis. Universitat Politecnica de Catalunya, 1999.

Sato, T., Kimura, F., and Kitoh, A. (2007). Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model . *Journal of Hydrology* , 333, 144–154.

Sécheresse et construction, 1993. Guide de prévention. La Documentation Française.

Selim, H. W., et Kirkham, D., 1970, "Soil temperature and water content changes during drying as influenced by cracks: A laboratory experiment," Soil Science Society of America Proceeding, Vol. 34, No. 4, pp. 565-569.

Soubeyroux, J.-M. , Vidal, J.-P., Najac, J., Kitova. N., Blanchard, N., Dandin, P., Martin, E., Pagé, C., Habets, F. (2011). *Projet ClimSec: Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol.*

Shuttleworth, W. J. (1993) Evaporation. IN MAIDMENT, D. R. (Ed.) Handbook of Hydrology. New York, McGraw-Hill Inc.

Ta, A.N., 2009. Etude de l'interaction sol-atmosphère en chambre environnementale. Ph.D. Thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

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

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., Zhao, L., Wang, B.J., 2008. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils. Engineering Geology 101, 204–217.

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

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.

Tessier D. (1984) *Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux : Hydratations, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation.* Thèse de l'université Paris VII, 362p.

Thorntwaite C.W. (1954). A re-examination of the concept and measurement of potential evapo-transpiration. pp 200-209. Seabrook, NJ: publication in Climatology.

Turc L.(1955). Le bilan d'eau des sols. Relation entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. Ann. Agron.5,491-596.

Van Bavel, C. H. M., and Hillel, D. (1976). "Calculating potential and actual evaporation from a bare soil surface by simulation of concurrent flow of water and heat,". Agric. For. Meteorol, Vol. 17 , 453–476.

Van Genuchten, M. Th. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils". *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.

Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., and Pufahl, D.E. (1999). Influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. *Géotechnique* 49, No. 2 , 143 – 159.

Vidal JP, Soubeyroux JM. 2008. Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol (Impact of climate change on droughts and soil moisture in France, in French). In: Magnan JP, Cojean R, Cui YJ, Mestat P (Eds.) SEC 2008 – International Symposium Droughts and Constructions. Vol. 1. : 25-31. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées: Marne-la-Vallée, France.

Villar M. V (1999) *Investigation of the behaviour of bentonite by means of suction-controlled oedometer tests*, Engineering Geology, Vol. 54, Issues 1-2, pp. 67-73

Vincent M., Bouchut J., Fleureau J.-M. (LMSSMat), Masrouri F. (LAEGO), Oppenheim E. (CEBTP-Solen), Heck J.-V. (CSTB), Ruaux N. (CSTB), 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., Plat E., Le Roy S. (2007) – Cartographie de l'aléa Retrait-Gonflement et Plans de Prévention des Risques. Revue Française de Géotechnique, n° 120-121, 189-200.

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., Roth, K., 2005. Studies of crack dynamics in clay soil I. Experimental methods, results, and morphological quantification. *Geoderma* 125, 203–211.

Vu H.Q., Fredlund D.G.(2004). The prediction of one-,two-,and three- dimensional heave in expansive soils *can.geotech.j.41:713-737*.

Vu H.Q., Fredlund D.G.(2006). Challenges to modeling heave in expansive soils. *can. geotech.j.43:1249-1272*.

Wilson G.W (1990). Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems. Ph.D thesis, university of Saskatchewan, Saskatoon,Canada.

Wilson, G.W., Fredlund, D.G. & Barbour, S.L. (1994). "Coupled Soil-Atmosphere Modelling for Soil Evaporation". *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 151-161

Yesiller, N., Miller, C.J., Inci, G., Yaldo, K., 2000. Desiccation and cracking behavior of three compacted landfill liner soils. *Engineering Geology* 57, 105–121.

Yigzaw, Z.G., 2009. Analyse des processus de retrait-gonflement des sols argileux en réponse à des sollicitations hydriques cycliques. Rôle de la microstructure.

Zeh, R. M., & Witt, K. J. (2006). Tensile Strength of Compacted Clays as Part of the Crack Prediction of Clay Liner Landfills. *Proceedings of the ISSMGE's fifth International*

Congress organised by the Geoenvironmental Research Centre, Cardiff University and held at Cardiff City Hall on 26 - 30 June 2006.

Zhang L, Fredlund DG (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* .

Manifestations scientifiques

Plusieurs parties de ce travail ont été présentées lors des manifestations scientifiques :

Conférence internationale avec acte publié (Voir annexe 1):

- D. Tabbal, I. Shahrour, A. Al-Qadad, F. Hage Chehade, M. Sadek, "*Influence of cracks on the soil-atmosphere interaction: numerical coupled model of thermo - atmosphere - porous media*", **V International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering , Ibiza-Spain, June 2013**

Journée franco-libanaise (octobre 2011, octobre 2013):

- D. Tabbal, I. Shahrour, A. Al-Qadad, F. Hage Chehade, M. Sadek, "*Impact of cracks on the thermo-hydric behavior of clay soils*", **Second Franco-lebanese conference, University "Littoral Côte d'Opale" - Dunkerque - France, 22 - 25 October 2013.**
- D. Tabbal, I. Shahrour, A. Al-Qadad, F. Hage Chehade, M. Sadek "*Effect of drought on structures: modeling thermo -porous- mechanical coupled model* ", **Franco - Lebanese conference, University of Lille1 Sciences and technologies- France, 18- 21 October 2011**

Deux articles sont en cours de finalisation pour être soumis à des revues internationales.

Annexe 1

INFLUENCE OF CRACKS ON THE SOIL-ATMOSPHERE INTERACTION: NUMERICAL COUPLED MODEL OF THERMO- ATMOSPHERE- POROUS MEDIA

**D.TABBAL^{*†}, I. SHAHROUR^{*}, A. AL-QADAD^{*}, F. HAGE CHEHADE[†] AND M.
SADEK^{*}**

^{*} Laboratory of Civil Engineering and Geo-Environment (LGCgE)
University Lille1 of sciences and Technology
Polytech-Lille – Av. Paul Langevin – 59655 Villeneuve d'Ascq cedex, France
e-mail: diala_tabbal@hotmail.com, www.lgcge.fr

[†] Ecole Doctorale des Sciences et de Technologie (EDST)
Lebanese University, Beirut, Lebanon
e-mail: edst@ul.edu.lb , www.edst.ul.edu.lb

Key words:Clay, cracks, soil-atmosphere interaction, evaporation, finite element model

Abstract. Soil shrinks as it desiccates, and the magnitude of shrinkage can be large for clayey soils. The drying of soil leads to cracks formation, causing high suctions to develop within. Cracks expose the deep soil and more evaporation can be expected in dry periods. To illustrate the effect of cracking, a numerical model of soil-atmosphere interaction has been developed taking into account the thermo-fluid coupling of an unsaturated clay soil. The model is used to simulate the evolution of evaporation during the drying process. The main results show a significant influence of the presence of cracks on the evaporation. This study also offers a simple method for taking into account the presence of cracks in the soil-atmosphere exchange.

1 INTRODUCTION

Desiccation cracking is a common phenomenon in clay materials. Since superficial soils are directly exposed to seasonal changes in climate, desiccation cracks develop at the surface of soils as they dry and shrink.

Cracks induce changes in soil surface patterns and can greatly modify their hydraulic properties. Moreover, shrinkage cracks create in soil zones of weakness affecting the stability of buildings and structures that are constructed on clayey soils.

Many attempts have been made to follow the initiation of cracks and to describe the cracking process. Most of these studies are based on field and laboratory experiments [1-9].

In view of modeling the cracking process, there is very little literature on the impact of cracks on evaporation from soil surface and on suction development [10-12]. In this study, a numerical model is developed to investigate the effect of cracks on evaporation evolution from a soil surface exposed to dry conditions. Then a simplified approach able to reproduce the impact of cracks on the soil behaviour is presented and discussed.

2 NUMERICAL MODEL

The theory is based on the principles of Darcy's law and Fick's law to describe the flow of liquid water and water vapor in the saturated-unsaturated soil below the surface. Penman-Wilson (1948)[13] method for evaporation is used to predict evaporation from the soil surface, as follows:

$$E_{vap} = \frac{\Delta R_n / L_V + \eta E_a}{\Delta + \frac{1}{\varphi_s}} \quad (1)$$

$$E_a = 0.35(1 + 0.15U_a) \left(\frac{1}{\varphi_a} - \frac{1}{\varphi_s} \right) P_a \quad (2)$$

Δ is the slope of the saturation vapor pressure versus temperature curve at the mean temperature of the air, R_n is the net radiation at the soil surface, L_V is the latent heat to vapor, η is the psychrometric constant, U_a is the wind speed, P_a is the vapor pressure in the air above the evaporation surface; φ_a and φ_s designate the relative humidity in the air and at the soil surface, respectively.

Permeability is calculated using (Fredlund et al. 1994; Leong and Rahardjo 1997) formulation [14,15] and Wilson's equation (1990) [16] was used to estimate the temperature at the surface of soil. For water retention curve, the Van Genuchten equation (1980) [17] is used and Van de Griend and O'Neill (1986) [18] equation is used to compute the thermal conductivity.

2.1 Model description

A conceptual model is developed that quantitatively describes the soil-atmosphere interaction for a clayey soil undergoing desiccation. Figure 1 shows finite element mesh and the domain boundary used in numerical analysis.

The model was 1 m deep, modeling the entire depth of soil and 20cm wide, half of the physical length because of the symmetry.

Mesh element sizes were reduced near the soil surface to increase model accuracy. To create a domain 1m deep by 20 cm wide, 21 rows and 20 columns, 800 elements were built.

The numerical model was used to simulate the results of 30 days evaporation for a clayey soil undergoing desiccation.

2.2 Boundary & Initial conditions

2.2.1 Initial Conditions

The same initial conditions were used in all simulations:

- Soil initially saturated given by: $\Psi=0$ for $t = t_0$ and
- Surface temperature set at 20°C for $t = t_0$

2.2.2 Boundary Conditions

Flow was allowed only from the upper surface to simulate the evaporation and thermal flux. Outward flux was not allowed at the right, left and lower boundaries (Figure 1).

For the sake of simplicity and to represent the drying environment, weather parameters was set constant for all the period of simulations with a temperature set at 20°C , relative humidity at 60%, solar radiation at 800 w/m^2 and air velocity set equal to 60 Km/h.

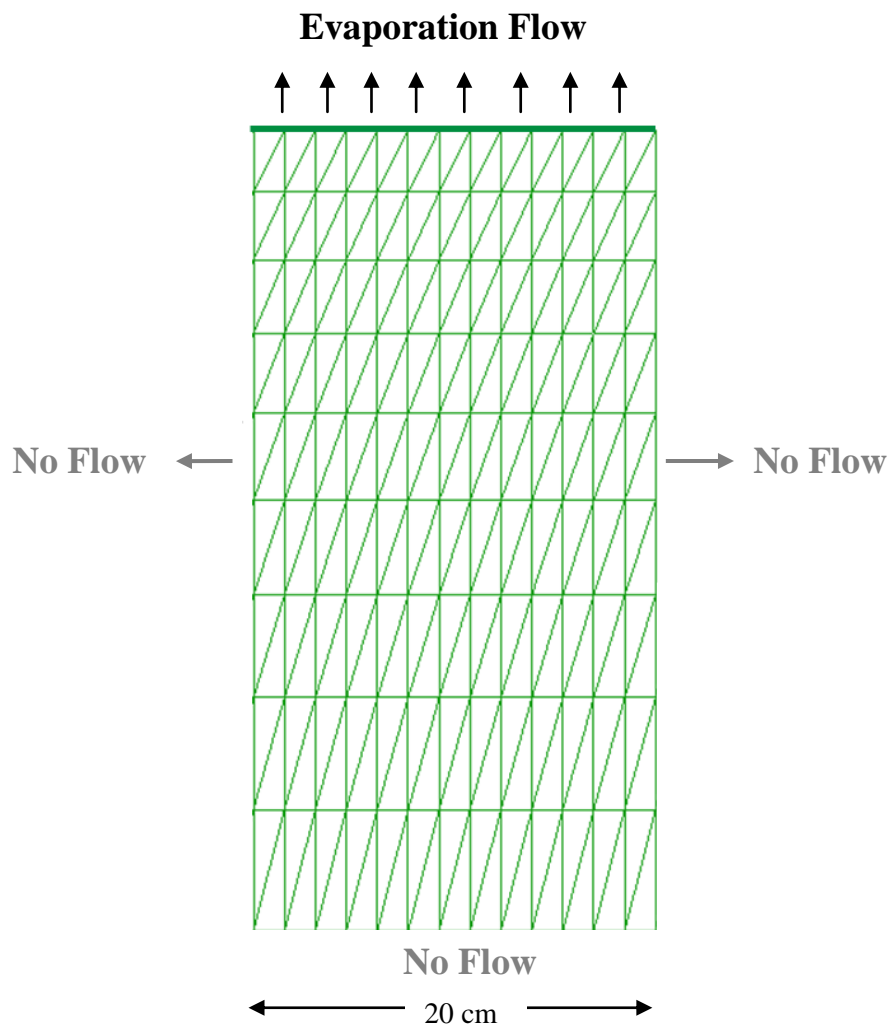


Figure 1: Geometry and boundary conditions used in case of intact soil

2.3 Soil properties

The model requires several input parameters specific to the soil undergoing desiccation. Hydraulic conductivity and water retention characteristics are needed to predict the evolution of the suction profile with time, relative humidity of the air and at the surface are needed to evaluate evaporation from soil surface.

3 RESULTS OF THE NUMERICAL SIMULATIONS

Results of the evaporation from the interface soil-atmosphere for intact and cracked cases are shown in the following sections.

3.1. Case 1: Intact soil

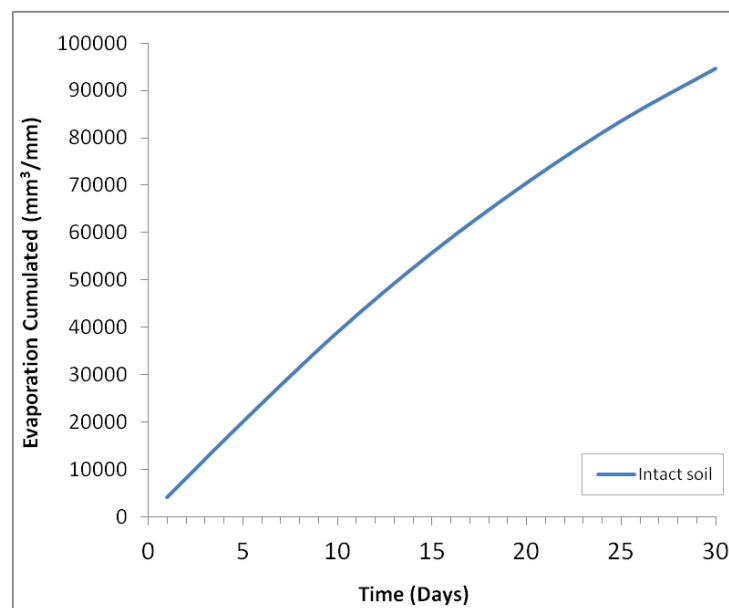


Figure 2: Cumulated evaporation flux for an intact soil surface

Figure 2 presents the cumulated evaporation flux for the 30 days. Evaporation shows a value of 400 mm/day at the end of the first day then increased almost linearly with time and attains a value of 9500 mm/day after 30 days.

Because soil is exposed to drying conditions, loss of water starts since the first day of simulations and continues; which, in turn, promote the evaporation process and increases the evaporation rate along the 30 days.

3.2. Case 2: Cracked soil

The purpose of this section is to show the impact of soil cracks on evaporation from soil surface. To that purpose, a crack of 5cm depth and 1cm width was incorporated into the model described above.

The geometry of the cracked model and the boundary conditions are shown in Figure 3. We suppose that a crack occurs every 40cm at soil surface. And, since only half of the model is analyzed, the width of the model was then equal to 20cm with a depth of 1 m. The rightmost column represented the crack, with a new vertical front of 5cm. To increase model accuracy, mesh element sizes were reduced near the crack and soil surface. Row widths away from the crack increased from 1.0 to 10 cm (Figure 3).

In the case of cracked soil, evaporation occurs from both surface and crack front. Then in the boundary conditions, the crack front is subjected too to atmosphere conditions. Simulations were conducted in the same manner of the intact soil using the same soil properties, same initial conditions and same weathers parameters.

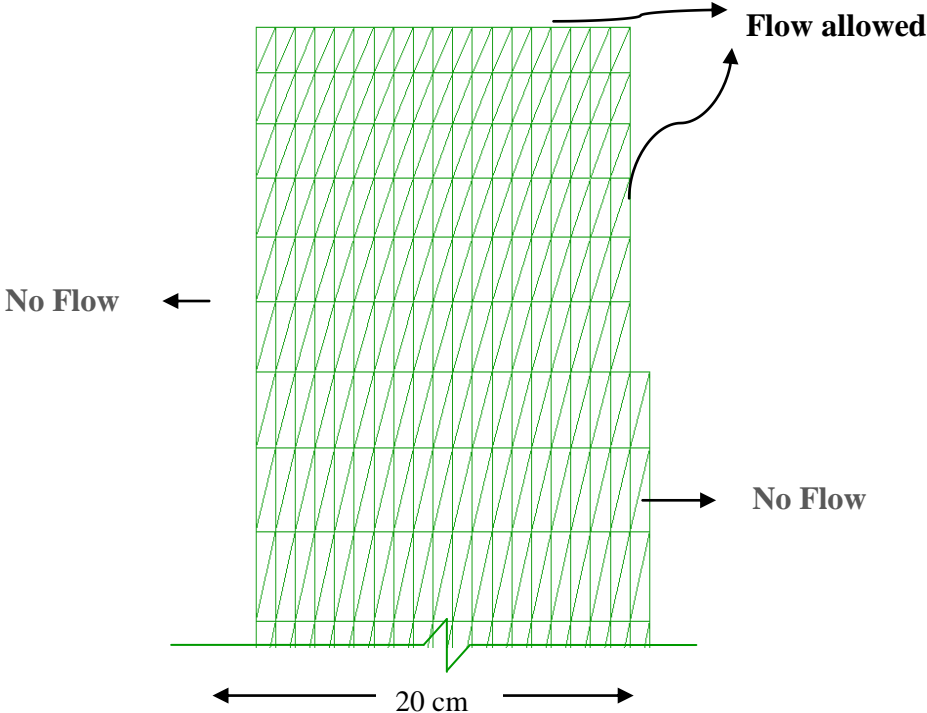


Figure 3: Geometry and boundary conditions of FEM used in the simulations of cracked soil

4 RESULTS COMPARISON: CRACKED/INTACT SOIL SURFACE

To show the influence of crack on the evaporation, the results from intact and cracked models are combined and compared in Figure 4.

It can be seen that the addition of the crack increased the evaporation from the first day and for the whole days of the simulations.

Crack was found to increase evaporation by 17% and 10% after 15 days and 30 days respectively.

The presence of crack exposes the deep soil and more evaporation can be expected in dry periods since the evaporation surface is increased. Cracks provide an excess of water loss mainly due to an increase in the hydraulic conductivity resulting in a higher evaporation rate.

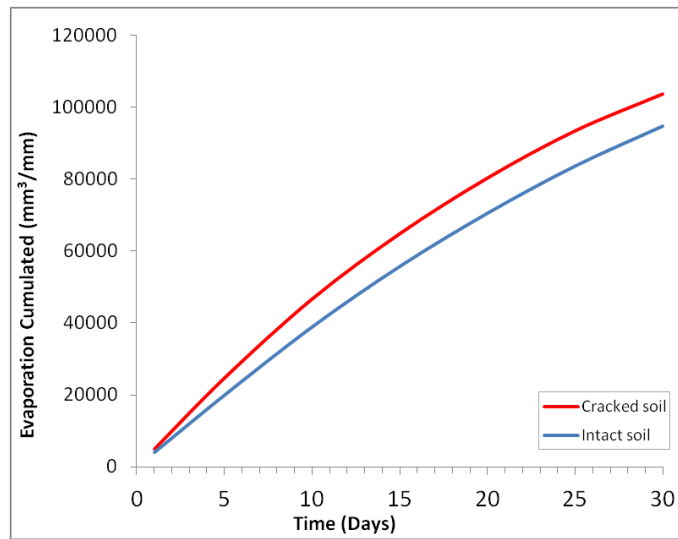


Figure 4: Evaporation pattern from intact and cracked surface

5 A simplified approach for cracked model

In this approach, a new finite element constitutive model, where we propose a new tool for modeling cracks in a simplified way is developed and discussed.

It was found from the previous study in this paper that, the surface of evaporation is the key parameter that controls the changes in the evaporation evolution and the cracking process.

Hence, we suggest that, for a cracked soil, the water evaporates from a fictive length L_{eff} with the same boundary conditions as the intact soil surface.

As the length L_{eff} is larger than L_{intact} soil and in order to reproduce the effect of cracks, L_{eff} was estimated to be equal to L_{intact} soil multiplied by a parameter λ .

Numerical modeling to demonstrate the validity of the new methodology described herein was carried out. The results of the homogenized method subjected to desiccation conditions were compared to the previous model. The same soil model of 1m x 20 cm with a crack of (1cm x 5cm) is considered which corresponds to $\lambda = 1.25$ in the proposed model.

5.1. Validation of the proposed model

The results of non-cumulative evaporation using both models are shown in figure 5. The graph show that the results from both approaches are very similar and that for all days of simulations.

The proposed approach was shown as an effective tool for modeling the effect of crack on soil performance especially when the geometry of the sample is difficult to reproduce.

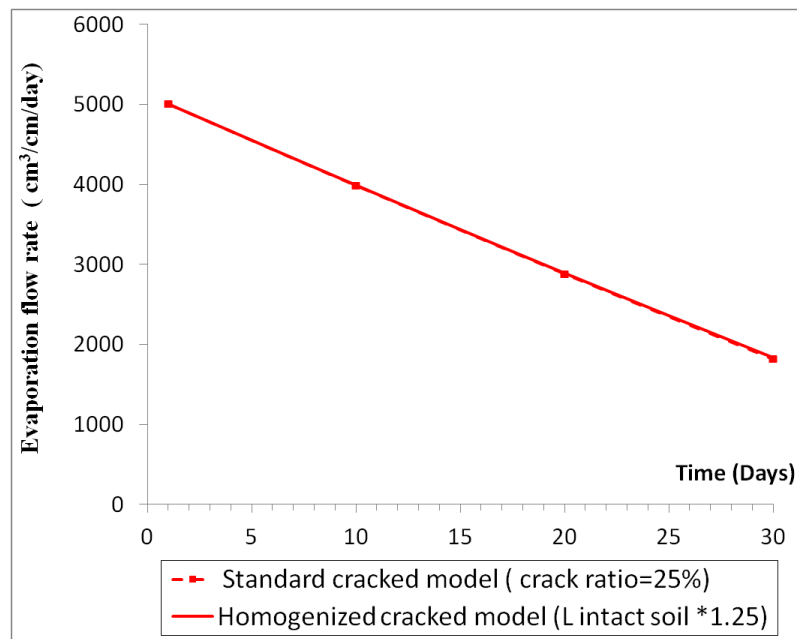


Figure 5:Evaporation flow pattern from both approaches

6 CONCLUSION

Desiccation cracking is a common phenomenon in clay materials, which can significantly affect the performance of soil. In this study, the effect of soil cracks on evaporation was investigated. Two cases were studied: intact case and cracked case. Two finite element models for intact and cracked surface were created and evaporation was simulated using a multiphase numeric simulator. The model quantified the contribution of soil cracks on evaporation rates for a simulation of 30 days. Results were then compared with those of an intact soil. They show the important contribution of cracks in evaporation flux. In cracked soil, further loss of moisture from soil occurs as direct evaporation from the fronts of crack. Actually, the simulations that don't consider the presence of crack could severely underestimated evaporation flow.

A new approach to reproduce the impact of cracks on the soil behaviour in a simplified method was presented. Results from both models were shown and discussed; Remarkable agreement can be seen between the two models. The proposed model was shown to be able to reproduce the cracked soil behavior very well.

In further study, cracks should be taken in consideration when modeling soil-atmosphere interaction in dry periods.

7 REFERENCES

- [1] Adams, J. E., et Hanks, R. J., 1964, "Evaporation from soil shrinkage cracks," Soil Science Society of America Proceeding, Vol. 28, pp. 281-284.
- [2] Selim, H. W., et Kirkham, D., 1970, "Soil temperature and water content changes during drying as influenced by cracks: A laboratory experiment," Soil Science Society of America Proceeding, Vol. 34, No. 4, pp. 565-569.
- [3] Yesiller, N., Miller, C. J., Inci, G., et Yaldo, K., 2000, "Desiccation and cracking behavior of three compacted landfill liner soils," Engineering Geology, Vol. 57, No. 1-2, pp. 105-121.
- [4] Cui, Y.J., Lu, Y.F., Delage, P., Riffard, M., 2005. Field simulation of in-situ water content and temperature changes due to ground-atmospheric conditions. *Géotechnique* 55 (7), 557–567.
- [5] Tang, C., Shi, B., Liu, C., Zhao, L., Wang, B., 2008. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils. *Engineering Geology* 101, 204-217
- [6] Tang, C.S., Shi, B., Liu, C., Suo, W.B., Gao, L., 2011: Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer. *Appl. Clay Sci.* 52(1-2), 69-77
- [7] Miller, C. J., Mi, H., et Yesiller, N., 1998, "Experimental analysis of desiccation crack propagation in clay liners," *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 34, No. 3, pp.677-686.
- [8] Nahlawi, H., Kodikara, J.K., 2006. Laboratory experiments on desiccation cracking of thin soil layers. *Geotechnical and Geological Engineering* 24, 1641–1664.
- [9] Péron, H., Herchel, T., Laloui, L., Hu, L.B., 2009. Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils: experimental characterization and mechanisms identification. *Canadian Geotechnical Journal* 46, 1177–1201.
- [10] Zhang, L.M., and Fredlund, D.G. 2003. Characteristics of water retention curves for an unsaturated fractured rock. In *Proceedings of the 2nd Asian Conference on Unsaturated Soils, UNSATASIA2003*, Osaka, Japan, 15–17 April 2003. Edited by D. Karrube, A. Iizuka, S. Kato, K. Kawai, and K. Tateyama. pp. 425-429.
- [11] Abu-Hejleh, A. N., and D. Znidarčić, D. 1995. Desiccation theory for soft cohesive soils. *Journal of Geotechnical Engineering* 121(6):493–502
- [12] Konrad, J. M., Ayad, R. 1997. An idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation, *Canadian Geotechnical Journal*, 34, 477-488.
- [13] Penman H.L., 1948. Natural evaporation from open water bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London. Ser. A* 193,120-146.
- [14] Fredlund, D.G., and Rahardjo, H. 1993. *Soil mechanics for unsaturated soil*. John Wiley & Sons, New York, 560 p.
- [15] Leong E.C., Rahardjo H., 1997. Permeability function for unsaturated soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 123, No. 12, December 1997, pp. 1118-1126
- [16] Wilson G.W., 1990. Soil evaporative fluxes for geotechnical engineering problems. Ph.D Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.
- [17] Van Genuchten M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*44:892-898.

[18]Van de Griend, A.A. and O'Neill, P.E., 1986. Discrimination of soil hydraulic properties by combined thermal infrared and microwave remote sensing, Proceedings of IGARSS'86 Symposium, Zurich, 8-11 September 1986, ESA Publications Division.