



HAL
open science

Exchanges between soil and atmosphere application in the case of draught

Altin Théodore Mantho

► **To cite this version:**

Altin Théodore Mantho. Exchanges between soil and atmosphere application in the case of draught. Sciences of the Universe [physics]. Ecole des Ponts ParisTech, 2005. English. NNT: . pastel-00001808

HAL Id: pastel-00001808

<https://pastel.hal.science/pastel-00001808>

Submitted on 19 Jun 2006

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

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



THESE DE DOCTORAT

Spécialité : **GEOTECHNIQUE**

présentée à

L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

par

Altin Théodore MANTHO

**ECHANGES SOL – ATMOSPHERE
APPLICATION A LA SECHERESSE**

Centre d'Enseignement et de Recherche en Mécanique des Sols (CERMES)
ENPC – LCPC – Institut NAVIER

Soutenu le 08 avril 2005 devant le jury composé de :

Jean-Claude	VERBRUGGE	Rapporteur
Jean-Marie	FLEUREAU	Rapporteur
Marc	VINCENT	Examineur
Martine	AUDIGUIER	Examineur
Roger	COJEAN	Conseiller d'étude
Yu Jun	CUI	Directeur de thèse

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier vivement l'ensemble des personnes qui a contribué au travail de cette thèse.

J'exprime ma reconnaissance à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées qui m'a donné l'opportunité de réaliser ce travail de recherche scientifique. Pendant trois ans passés au sein de cette école, j'ai pu apprendre, comprendre, appliquer et réaliser ce projet.

J'adresse mes vifs remerciements à mon Directeur de thèse, Monsieur Yu Jun CUI, qui m'a accordé sa confiance dans l'élaboration de cette thèse. Ses conseils et ses encouragements ont permis de mener à bien ce travail.

Je tiens à remercier l'équipe technique du laboratoire qui m'a aidé dans la préparation soigneuse de la partie expérimentale.

Je souhaite à remercier respectueusement Monsieur Jean-Marie FLEUREAU, Professeur à l'Ecole Centrale de Paris, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de thèse. Je présente également mes plus sincères remerciements à Monsieur Jean-Claude VERBRUGGE, Professeur à l'Université Libre de Bruxelles, qui a accepté d'être rapporteur de cette thèse. Je remercie au même titre Madame Martine AUDIGUIER, Monsieur Roger COJEAN et Monsieur Marc VINCENT, qui ont participé à l'évaluation de mon travail.

Mes remerciements s'adressent aussi à l'ensemble du CERMES, qui m'a cordialement accueilli. J'ai pu rencontrer des amis et des collègues qui m'ont encouragé au cours de ces trois dernières années. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma gratitude.

Pour finir, je remercie ma famille. Son soutien et son encouragement m'ont permis de surmonter les difficultés pendant les années de doctorat.

SOMMAIRE

1	ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	1
1.1	Effets de la sécheresse sur les constructions, la problématique.....	2
1.1.1	Facteurs intervenant dans les problèmes de sécheresse.....	2
1.1.1.1	Origines des variations de volume du sol	2
1.1.1.1.1	Modification des contraintes externes	2
1.1.1.1.2	Modification des pressions interstitielles	3
1.1.1.1.3	Effet physico-chimique	3
1.1.1.2	Facteurs intervenant dans le retrait – gonflement (d’après BRGM 1998).....	3
1.1.1.2.1	Nature du sol.....	4
1.1.1.2.2	Hydrogéologie	5
1.1.1.2.3	Géomorphologie.....	5
1.1.1.2.4	Climatologie.....	6
1.1.1.2.5	Facteurs anthropiques.....	7
1.1.1.3	Influence de la végétation.....	8
1.1.1.3.1	Actions sur l'eau	8
1.1.1.3.2	Croissance des arbres.....	10
1.1.1.3.3	Profondeur et distance d'action	10
1.1.1.4	Détermination empirique du tassement – gonflement	11
1.1.1.4.1	Formules pour calculer le gonflement.....	12
1.1.1.4.2	Formules pour calculer le tassement	13
1.1.2	Exploitation des guides de prévention.....	14
1.1.2.1	Effets sur les constructions	14
1.1.2.1.1	Aspects météorologiques.....	14
1.1.2.1.2	Résultats d’enquêtes	16
1.1.2.1.3	Chargement	16
1.1.2.1.4	Mécanismes des désordres (d’après Ministère de l’Environnement 1993).....	17
1.1.2.1.5	Manifestation des désordres (d’après Ministère de l’Environnement 1993)	19
1.1.2.2	Déformations des structures selon le type de mouvement de sol.....	20
1.1.2.3	Mouvements différentiels admissibles.....	22
1.1.3	Démarche actuelle suivie par les assureurs	23
1.1.3.1	Regard particulier sur l’environnement (d’après MAIF 2000).....	24
1.1.3.2	Classification du sinistre suivant les désordres constatés (d’après MAIF 2000)	24
1.1.3.3	Opportunité d’un rapport simplifié (d’après MAIF 2000).....	25
1.1.3.4	Opportunité d’un rapport de reconnaissance (d’après MAIF 2000).....	25
1.1.3.5	Différentes mesures adoptées	26
1.1.3.5.1	Investigations in situ (d’après MAIF 2000).....	26
1.1.3.5.2	Mesures conservatoires (d’après MAIF 2000)	26
1.1.3.5.3	Mise en observation de l’immeuble (d’après MAIF 2000).....	26
1.1.3.5.4	Intervention du géotechnicien (d’après MAIF 2000).....	27
1.1.3.6	Détermination des solutions techniques de réparation.....	27
1.2	Minéralogie des argiles et interaction eau – argile.....	28
1.2.1	Minéralogie des argiles.....	28
1.2.1.1	Kaolinite	29
1.2.1.2	Micas	29
1.2.1.3	Illites.....	30
1.2.1.4	Montmorillonite	30

Sommaire

1.2.2	Interactions physico-chimiques entre l'eau et l'argile	31
1.2.2.1	Charge des surfaces argileuses	31
1.2.2.1.1	Mécanismes d'adsorption	32
1.2.2.2	Hydratation des argiles	33
1.2.2.2.1	Théorie de la double couche	33
1.3	Succion et techniques de mesure	35
1.3.1	Succion dans les sols non saturés	35
1.3.1.1	Définition de la succion.....	35
1.3.1.1.1	Succion matricielle	37
1.3.1.1.2	Succion d'adsorption	38
1.3.1.1.3	Succion osmotique.....	38
1.3.2	Techniques de mesures et de contrôle de la succion	38
1.3.2.1	Contrôle par plaque tensiométrique et par translation d'axes	39
1.3.2.2	Technique de contrôle osmotique.....	40
1.3.2.3	Technique de contrôle par phase vapeur	41
1.3.2.4	Méthode du papier filtre.....	42
1.3.2.5	Mesure tensiométrique de la succion	43
1.3.3	Courbe de rétention d'eau.....	44
1.3.3.1	Formulations mathématiques utilisées pour la courbe de rétention	46
1.3.4	Transferts de fluides dans les sols non saturés	47
1.3.4.1	Equations de transfert en phase liquide	47
1.3.4.2	Equations de transfert en phase gazeuse	48
1.3.5	Mesure de perméabilité	49
1.3.5.1	Méthode du profil instantané pour la perméabilité à l'eau	50
1.3.5.2	Différentes formulations pour le coefficient de perméabilité	51
1.4	Tensiomètre	53
1.4.1	Mode de fonctionnement d'un tensiomètre type.....	53
1.4.1.1	Exigences pour construire un tensiomètre fiable	53
1.4.1.1.1	Bon dimensionnement du tensiomètre	53
1.4.1.1.2	Première saturation de la pierre poreuse céramique.....	54
1.4.1.1.3	Respect des procédures d'utilisation.....	55
1.4.1.2	Mesure	55
1.4.1.3	Précision de mesure	56
1.4.1.4	Vérification d'étalonnage.....	56
1.4.1.5	Problèmes constatés au cours du fonctionnement du tensiomètre	57
1.4.2	Conception initiale du tensiomètre d'Imperial College.....	58
1.4.3	Tensiomètre modifié d'Imperial College	59
1.4.4	Tensiomètre de Trento.....	60
1.4.5	Tensiomètre de Saskatchewan.....	61
1.4.6	Tensiomètre du MIT	62
1.5	Phénomène de cavitation.....	64
1.5.1	Eau sous tension.....	65
1.5.2	Phénomènes de surface.....	66
1.5.3	Solutions pour réduire la cavitation.....	67

2	MATERIAUX ETUDIES ET DEVELOPPEMENTS EXPERIMENTAUX.....	71
2.1	Matériaux étudiés.....	73
2.1.1	Argile verte de Romainville.....	73
2.1.1.1	Teneur en eau naturelle	73
2.1.1.2	Analyse granulométrique.....	73
2.1.1.3	Limites d'Atterberg.....	74
2.1.1.3.1	Limite de liquidité W_l	74
2.1.1.3.2	Limite de plasticité W_p	74
2.1.1.3.3	Indice de plasticité I_p	75
2.1.1.4	Calcimétrie de l'argile verte	75
2.1.1.5	Minéralogie des argiles par diffraction aux rayons X.....	75
2.1.1.6	Essai au bleu de méthylène	75
2.1.2	Limon de Boissy le Châtel.....	76
2.1.2.1	Données générales du site de Boissy-le-Châtel.....	76
2.1.2.2	Illustrations de l'emplacement des appareils.....	77
2.1.2.3	Prélèvement du limon.....	78
2.1.2.4	Analyse granulométrique.....	78
2.1.2.5	Limites d'Atterberg.....	79
2.1.2.6	Conductivité thermique.....	79
2.2	Développement du tensiomètre.....	81
2.2.1	Conception du tensiomètre.....	82
2.2.1.1	Taille du réservoir d'eau	83
2.2.1.2	Jeu entre la pierre poreuse et la paroi	83
2.2.1.3	Epaisseur et diamètre du diaphragme	83
2.2.1.4	Choix de la colle.....	85
2.2.1.4.1	Dispositif pour tester la colle	85
2.2.1.4.2	Résultats des tests de la colle.....	86
2.2.2	Cellules de saturation.....	87
2.2.2.1	Petite cellule de saturation.....	87
2.2.2.2	Grande cellule de saturation.....	88
2.2.3	Mode de fonctionnement.....	89
2.2.4	Influence de divers facteurs sur le comportement du tensiomètre.....	90
2.2.4.1	Traitement préliminaire d'un nouveau tensiomètre	91
2.2.4.2	Collage de la pierre poreuse céramique	92
2.2.4.3	1 ^{ère} saturation du capteur tensiométrique	92
2.2.4.4	Effet du temps de saturation et des cycles saturation – cavitation	94
2.2.4.4.1	Saturation de la pierre poreuse du tensiomètre.....	95
2.2.4.4.2	Cavitation du tensiomètre	95
2.2.4.4.3	Réponse du tensiomètre après la cavitation.....	96
2.2.4.4.4	Application du vide.....	97
2.2.4.5	Importance de l'étalonnage	97
2.2.4.6	Effet de la température.....	98
2.2.4.7	Précision de l'acquisition et de l'alimentation	100
2.2.4.8	Temps nécessaire d'application du vide	101
2.2.4.9	Effet de la colle	101
2.2.5	Mesure des tensiomètres dans le temps.....	102
2.2.6	Procédure recommandée pour la mise en service du tensiomètre.....	103

2.3	Dispositif de la mise en place du tensiomètre pour le suivi in situ.....	105
2.3.1	Dispositifs utilisés pour le suivi en place	105
2.3.2	Tests au laboratoire.....	107
2.3.2.1	Fonctionnement du dispositif et résultats des tests.....	107
2.3.2.1.1	Test en modèle réduit	107
2.3.2.1.2	Premiers résultats	108
2.3.2.1.3	Améliorations portées au procédé	109
2.3.2.1.4	Résultats de mesures après les améliorations du procédé.....	110
2.3.2.2	Fonctionnement des appareils de mesure.....	112
2.3.2.2.1	Test des appareils de mesures dans les conditions in situ.....	113
2.3.2.3	Test de récupération des données enregistrées.....	114
2.3.3	Test effectué in situ avec le dispositif.....	114
2.3.3.1	Réalisation du test in situ.....	115
2.3.4	Mise en place du tensiomètre in situ	116
2.3.4.1	Transport du tensiomètre in situ	116
2.3.4.2	Schéma du dispositif mis en place.....	116
2.3.4.3	Etapes de la mise en place in situ du tensiomètre	117
2.3.4.4	Mise en place des sondes de température	119
2.3.4.5	Réalisation d'un planning de mesures des tensiomètres in situ.....	120
2.3.4.6	Récupération des données.....	120
2.4	Développement de la colonne d'infiltration.....	121
2.4.1	Présentation de la colonne d'infiltration et de ses accessoires	121
2.4.2	Préparation des échantillons	122
2.4.2.1	Carottage et introduction dans la colonne d'infiltration	122
2.4.2.2	Découpage des blocs de limon	123
2.4.2.3	Séchage des blocs de limon.....	124
2.4.2.4	Carottage des échantillons de limon.....	125
2.4.3	Mise en place de l'échantillon de sol et des tensiomètres	126
2.4.3.1	Mise en place dans la colonne d'infiltration des échantillons	126
2.4.3.2	Mise en contact tensiomètres - sol dans la colonne d'infiltration	127
2.4.4	Stabilisation des valeurs des tensiomètres et démarrage de l'essai	129
2.5	Dispositif assurant la mesure directe de la succion au laboratoire	130
2.5.1	Système cellule + tensiomètre	130
2.5.2	Préparation des échantillons de sol	130
2.5.3	Réalisation de la mesure de succion avec le dispositif	131
2.6	Dispositif d'imposition de la succion par phase vapeur.....	133
2.7	Dispositif de détermination du volume d'un échantillon de sol.....	134
2.7.1	Procédure de détermination du volume d'un échantillon de sol	134
2.8	Conclusions	136
3	ETUDE EXPERIMENTALE	139
3.1	Détermination des courbes de rétention d'eau	139
3.1.1	Courbe de rétention de l'argile verte	139
3.1.1.1	Courbe de rétention de l'argile verte par la méthode osmotique	139
3.1.1.2	Courbe de rétention de l'argile verte par phase vapeur.....	140
3.1.1.2.1	Réalisation de l'essai.....	140

Sommaire

3.1.1.2.2	Résultats obtenus	141
3.1.1.2.3	Courbe de rétention – échantillons 1 & 2	141
3.1.1.2.4	Variation de l'indice des vides et du degré de saturation – échantillons 1 & 2	142
3.1.1.2.5	Courbe de rétention – échantillons 3 & 4	143
3.1.1.2.6	Variation de l'indice des vides et du degré de saturation – échantillons 3 & 4	144
3.1.1.2.7	Courbe de rétention – échantillons 5 & 6	145
3.1.1.2.8	Variation de l'indice des vides et du degré de saturation – échantillons 5 & 6	145
3.1.1.2.9	Courbe de rétention – échantillons 7, 8 & 9	146
3.1.1.2.10	Variation de l'indice des vides et du degré de saturation – échantillons 7, 8 & 9	147
3.1.2	Courbe de rétention d'eau du limon de Boissy le Châtel.....	149
3.1.2.1	Mesure directe de la succion d'un échantillon de limon	150
3.2	Détermination de la perméabilité du limon de Boissy le Châtel.....	151
3.2.1	Perméabilité du limon à l'état saturé	151
3.2.1.1	Réalisation de l'essai.....	151
3.2.1.2	Résultats des mesures de l'essai de perméabilité saturée.....	151
3.2.2	Perméabilité à l'état non saturé	153
3.2.2.1	Réalisation de l'essai.....	153
3.2.2.2	Interprétation des résultats.....	154
3.2.2.3	Résultats du 1 ^{er} essai.....	155
3.2.2.3.1	Stabilisation des valeurs des tensiomètres	155
3.2.2.3.2	Infiltration.....	155
3.2.2.3.3	Isochrones de succion et de teneur en eau volumique.....	157
3.2.2.3.4	Teneur en eau volumique à l'état initial et final	159
3.2.2.3.5	Détermination des coefficients de perméabilité non saturé.....	160
3.2.2.4	Résultats du 2 ^{ème} essai d'infiltration	162
3.2.2.4.1	Stabilisation des succions initiales.....	162
3.2.2.4.2	Infiltration.....	163
3.2.2.4.3	Isochrones de succion et de teneur en eau volumique.....	164
3.2.2.4.4	Teneur en eau volumique à l'état initial et final	166
3.2.2.4.5	Détermination des coefficients de perméabilité	167
3.2.2.5	Résultats du 3 ^{ème} essai d'infiltration	170
3.2.2.5.1	Stabilisation des valeurs mesurées des tensiomètres	170
3.2.2.5.2	Infiltration.....	170
3.2.2.5.3	Isochrones de succion et de teneur en eau volumique.....	172
3.2.2.5.4	Teneur en eau volumique à l'état initial et final	173
3.2.2.5.5	Détermination des coefficients de perméabilité non saturé.....	174
3.2.2.6	Synthèse des résultats	176
3.3	Mesure directe de la succion in situ	178
3.3.1	Données météorologiques en mai – juin 2004.....	178
3.3.2	Données des paramètres du sol.....	182
3.3.2.1	Teneur en eau volumique	182
3.3.2.2	Température du sol.....	184
3.3.3	Suivi de la succion.....	185
3.3.3.1	Résultats obtenus	185
3.3.3.2	Effet des pluies.....	187
3.4	Conclusions	190

4	APPLICATION D'UN MODELE NUMERIQUE.....	193
4.1	Modélisation des échanges sol – atmosphère	193
4.1.1	Modèle de l'interface sol – atmosphère	193
4.1.1.1	Détermination de l'évaporation – la formule de Penman	195
4.1.1.2	Bilan d'énergie.....	195
4.1.2	Couplage entre le transfert hydraulique et le transfert thermique.....	198
4.1.2.1	Flux d'eau en phase liquide	198
4.1.2.2	Flux d'eau en phase vapeur	199
4.1.2.3	Flux total.....	199
4.1.2.4	Transfert de chaleur dans le sol	200
4.1.2.5	Méthode de résolution.....	201
4.1.3	Détermination des paramètres.....	203
4.1.3.1	Conductivité hydraulique du sol	203
4.1.3.2	Courbe de rétention d'eau du sol.....	204
4.1.3.3	Capacité thermique du sol.....	205
4.1.4	Résolution numérique	205
4.2	Résultats de simulations.....	208
4.2.1	Détermination des paramètres.....	208
4.2.2	Présentation des données d'entrée du modèle	209
4.2.3	Première simulation.....	214
4.2.3.1	Simulation de la courbe de rétention d'eau.....	214
4.2.3.2	Simulation de la courbe $s - k$	215
4.2.4	Résultats obtenus dans la 1 ^{ère} simulation.....	215
4.2.4.1	Variations de la teneur en eau volumique	215
4.2.4.2	Variation de la succion de sol.....	218
4.2.4.3	Variations de la température de sol	220
4.2.5	Deuxième simulation.....	222
4.2.5.1	Simulation de la courbe $s - k$	222
4.2.6	Résultats obtenus dans la 2 ^{ème} simulation.....	223
4.2.6.1	Variation de la teneur en eau volumique.....	223
4.2.6.2	Variation de la succion de sol.....	226
4.2.6.3	Variations de la température de sol	228
4.2.7	Troisième simulation	230
4.2.7.1	Simulation de la courbe de rétention d'eau.....	230
4.2.8	Résultats de simulation obtenus	231
4.2.8.1	Variations de la teneur en eau volumique	231
4.2.8.2	Variations de la succion de sol – 3 ^{ème} simulation.....	234
4.2.8.3	Variations de la température du sol.....	236
4.2.9	Comparaison globale des trois simulations.....	237
	CONCLUSION GENERALE	239
	BIBLIOGRAPHIE.....	243

INTRODUCTION

Certains sols argileux présentent des variations de volume importantes liées à celles de leur teneur en eau, en relation avec les conditions climatiques. Ces variations de volume peuvent avoir de graves conséquences sur les constructions en surface, notamment quand elles provoquent des déformations différentielles. En France, depuis les sécheresses des années 1989 et 1990, qui ont affecté notamment des constructions légères fondées superficiellement dans 216 communes réparties sur 17 départements (Vandangeon 1992), les conséquences de la sécheresse sur l'intégrité des constructions est un objet de préoccupation.

A l'étranger, de nombreuses études consacrées à ce problème ont été réalisées dans les années 80. On cite couramment celles réalisées en Angleterre (Driscoll 1983, Biddle 1983), essentiellement sur l'effet de la végétation sur le bilan hydrique des sols. Les autres continents sont également concernés et le problème a par exemple été étudié en Afrique du Sud, aux Etats-Unis, en Australie et en Chine.

Théoriquement, on peut calculer le tassement d'un massif de sol dû au changement de la teneur en eau ; cela à l'aide des connaissances acquises en mécanique des sols non saturés. En effet, un certain nombre de modèles élastiques (Fredlund & Rahardjo 1993, Matyas & Radhakrishna 1968) ou élasto-plastiques (Alonso et al. 1990, Cui & Delage 1996) existent permettant de déterminer les déformations engendrées à la fois par la contrainte mécanique et la succion. Dans notre étude seule la succion sera prise en compte.

Dans le cadre de cette étude on s'intéresse particulièrement à la mesure de la succion au laboratoire et in – situ à l'aide d'un outil innovant : le tensiomètre. Les mesures au laboratoire permettent de suivre les variations de ce paramètre important (succion) au cours des essais en fonction des propriétés hydrauliques et des propriétés de rétention. La mesure de la succion in – situ permet le suivi dans le temps de son profil en fonction de la profondeur dans le sol.

Dans un deuxième temps pour remplacer les mesures de succion qui sont difficile à obtenir in - situ, on s'intéresse à l'application d'un modèle développé par Cui et al. (2003).

Ce modèle développe une méthode d'évaluation de la succion basée sur les échanges sol – atmosphère. La validation de ce modèle se fait en utilisant les données obtenues in – situ (météorologie et succion notamment) et en laboratoire (paramètres).

Le premier chapitre est consacré à la bibliographie ; on commence par les effets de la sécheresse sur les constructions, la problématique et l'étendue de ce phénomène inquiétant. Suit une description de la minéralogie des argiles ainsi que de l'interaction eau – argile. On présente aussi dans ce chapitre les principales techniques de mesure et de contrôle de succion. On mettra l'accent sur les connaissances actuelles concernant le développement des tensiomètres, appareils de mesures directes de la succion, en discutant sur le phénomène physique de cavitation.

Le deuxième chapitre concerne les développements expérimentaux. On présente d'abord les caractéristiques des matériaux étudiés (argile verte de Romainville et limon des plateaux). Ensuite on aborde le développement du tensiomètre prototype. Ce premier développement était capital, car il a ouvert le chemin des développements suivants. On termine par la présentation du dispositif de la mise en place du tensiomètre pour le suivi de la succion in situ, et du développement de la colonne d'infiltration permettant la réalisation des essais de perméabilité à l'état non saturé. On note que la réalisation d'un système étanche qui a assuré les mesures directes de la succion a permis de déterminer les propriétés de rétention d'eau du matériau (limon de Boissy le Châtel).

Dans le troisième chapitre, on présente les résultats expérimentaux. En premier lieu, les propriétés de rétention d'eau pour les deux matériaux utilisés sont abordées. La courbe de rétention de l'argile verte de Romainville est obtenue en utilisant conjointement la méthode d'imposition de la succion par phase vapeur et la méthode osmotique. Les variations de l'indice des vides et du degré de saturation sont également présentées. La courbe de rétention d'eau du limon de Boissy le Châtel est obtenue en revanche à l'aide de mesures directes de la succion à l'aide du tensiomètre. La détermination de la perméabilité est faite aux deux états différents : saturé et non saturé. La méthode des profils instantanés utilisée a permis de déterminer les coefficients de perméabilité à l'état non saturé à partir des profils de succions et de la teneur en eau. Par la suite on présente les

résultats de la campagne de mesures directes de la succion in - situ. Ces résultats sont mis en rapport avec les données météorologiques et les données du sol.

Le quatrième chapitre permet une comparaison entre les valeurs de la succion mesurées in situ et les valeurs obtenues à l'aide du modèle de Cui et al. (2003), qui prend en compte les échanges sol – atmosphère. Dans les simulations numériques, l'accent est mis sur le choix des paramètres liés à la perméabilité et à la rétention d'eau. Les résultats obtenus permettent d'une part de vérifier la validité de ce modèle et d'autre part d'ouvrir l'horizon vers des améliorations futures du modèle.

1 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

L'étude bibliographique comporte cinq parties principales. Une première partie qui résume d'une part les effets de la sécheresse sur les constructions et les sols concernés, d'autre part la problématique et l'étendue de ce phénomène inquiétant. Cette partie descriptive nous permet de placer notre étude dans l'optique de trouver des solutions adaptées.

La deuxième partie est consacrée à la minéralogie des argiles et l'interaction eau – argile. On s'intéresse aux argiles car ce sont des sols susceptibles de subir les effets directs de la sécheresse entraînant sur les constructions des conséquences non négligeables.

La troisième partie aborde le phénomène de la succion et les techniques de mesure. La succion fait partie des variables les plus importantes dans l'analyse du comportement hydromécanique des sols non saturés. Elle sera effectivement le paramètre qui nous intéressera le plus tout au long de notre étude. Il est indispensable de connaître le phénomène, les différentes techniques de mesures et les propriétés de rétention des sols. Le transfert des fluides et la détermination de la perméabilité compléteront cette partie.

La quatrième partie découvre un outil innovant et prometteur de mesure directe de la succion : le tensiomètre. C'est l'appareil qui se trouve au cœur de notre étude et un recueil bibliographique permet de tracer le chemin de son développement, son fonctionnement détaillé, les problèmes constatés. Une explication des différents types de tensiomètres opérationnels dans différents laboratoires permet de faire le point sur ce qui a été fait et les perspectives futures.

La dernière partie concerne le phénomène de cavitation qui est la source principale empêchant la mesure dans le temps de la succion. On analyse les informations utiles à la compréhension de ce phénomène et on cherche comment obtenir une augmentation de la durée de mesure. On parlera aussi de l'eau sous tension et des phénomènes de surface.

1.1 Effets de la sécheresse sur les constructions, la problématique

On abordera dans cette partie les facteurs qui interviennent dans les problèmes de sécheresse, l'exploitation des guides de prévention et la démarche actuelle suivie par les assureurs. Ceci nous permettra d'avoir un aperçu général pour bien comprendre la problématique qui devient de plus en plus préoccupante. Ce paragraphe est rédigé en prenant appui sur différents documents de synthèse et plus spécialement sur la référence bibliographique Ministère de l'Environnement (1993) : Sécheresse et construction. Guide de prévention.

1.1.1 Facteurs intervenant dans les problèmes de sécheresse

On parlera plus concrètement de la prévision du mouvement d'un terrain suite à une modification hydrique du site, on citera en particulier les causes de la variation de volume du sol, on évaluera les facteurs qui interviennent dans le retrait – gonflement et on parlera de la détermination du retrait – gonflement à l'aide de quelques formules empiriques.

Les principaux facteurs qui interviennent dans les problèmes de sécheresse sont liés soit aux sols soit aux ouvrages.

1.1.1.1 Origines des variations de volume du sol

Les déformations volumiques des sols fins sont généralement dues à trois phénomènes :

- ⇒ la modification des contraintes externes ;
- ⇒ la modification des pressions interstitielles ;
- ⇒ l'effet physico-chimique.

1.1.1.1.1 Modification des contraintes externes

La modification de l'état de contraintes totales dans le sol, du fait par exemple de l'adjonction ou de l'enlèvement de charges ou de surcharges, conduit à terme à une déformation du sol, qui se traduit en général par un déplacement en surface (tassement, soulèvement). Ce déplacement est le résultat de la somme des déformations élémentaires créées en tout point du massif de sol par la modification de l'état de contraintes.

1.1.1.1.2 Modification des pressions interstitielles

Un changement dans l'environnement hydrique du sol conduit à une modification des pressions interstitielles régnant en son sein. La variation du niveau de la nappe phréatique modifie le champ de pression interstitielle aussi bien au-dessous qu'au-dessus du niveau de la nappe. Le niveau de la nappe et l'évolution du champ de pression interstitielle peuvent être déterminés à partir des mesures piézométriques (NF P 94-157-1 et NF P 94-157-2).

1.1.1.1.3 Effet physico-chimique

L'apport d'eau dans le sol et sa fixation au niveau de certaines particules élémentaires ou plaquettes agglomérées en feuillets (dimension 1.10^{-8} à 1.10^{-10} m) constituant l'argile conduisent à des phénomènes d'hydratation de ces particules, entraînant une augmentation de volume. Ce mécanisme d'hydratation est largement conditionné par :

- le type et la nature des minéraux argileux présents et leurs propriétés physico-chimiques,
- la structure du matériau et de ses particules,
- la concentration ionique du fluide interstitiel, y compris l'eau adsorbée,
- l'histoire du matériau et en particulier les phénomènes de cimentation.

L'étude de ces phénomènes d'hydratation au niveau des particules est complexe et on se contente habituellement de quantifier cette hydratation et ses conséquences au niveau macroscopique.

1.1.1.2 Facteurs qui interviennent dans le retrait – gonflement (d'après BRGM 1998)

Les phénomènes de retrait – gonflement des formations argileuses sont dus, pour l'essentiel, à des variations de volume de ce type de formation, sous l'effet de l'évolution des teneurs en eau. Ces variations de volumes se traduisent par des mouvements différentiels du sol, susceptibles de provoquer des désordres au niveau des bâtiments.

« Par définition, l'aléa retrait – gonflement est la probabilité d'occurrence spatiale et temporelle des conditions nécessaires à la réalisation d'un tel phénomène. Parmi les facteurs intervenant, on cite :

⇒ les facteurs de prédisposition, liés à la nature des sols ou du site ;

⇒ les facteurs de déclenchement, liés à des sollicitations (humaines ou naturelles).

Les facteurs de prédisposition sont ceux qui induisent le phénomène de retrait – gonflement, mais dont la seule présence ne suffit pas à le déclencher. Ces facteurs sont fixes ou évoluent très lentement dans le temps. On distingue les facteurs internes qui sont liés à la nature du sol et des facteurs d'environnement qui caractérisent plutôt le site. Les facteurs de prédisposition permanents conditionnent en fait la répartition spatiale du phénomène. Ils permettent de caractériser la susceptibilité du milieu vis-à-vis du phénomène de retrait – gonflement.

Les facteurs de déclenchement sont ceux qui provoquent le phénomène de retrait – gonflement, mais qui n'ont d'effet significatif que s'il existe des facteurs de prédisposition préalables. La connaissance des facteurs de déclenchement permet de déterminer l'occurrence du phénomène (autrement dit l'aléa et non plus seulement la susceptibilité).

Les facteurs les plus importants sont :

- nature du sol
- hydrogéologie,
- géomorphologie,
- climatologie,
- facteurs anthropiques (fuites d'eau, drainages, etc.). »

On explique plus en détail chacun de ces facteurs.

1.1.1.2.1 Nature du sol

La nature lithologique (principalement la proportion des matériaux argileux ou des éléments fins inférieurs à 2 μm) du sol constitue un facteur de prédisposition prédominant dans le mécanisme de retrait - gonflement. La procédure d'étude de la nature lithologique du sol comporte un inventaire des formations affleurantes à sub-affleurantes, puis leur cartographie. On trouve aussi l'influence de la géométrie de la formation, car une formation argileuse sera d'autant plus sensible au retrait – gonflement qu'elle est en position superficielle et qu'elle est épaisse et continue.

Le facteur prédominant, qui caractérise la susceptibilité au retrait – gonflement d'une formation argileuse, est la composition minéralogique. Une formation sera d'autant plus sensible au phénomène que sa fraction argileuse (au sens de la granulométrie) contiendra une forte proportion de minéraux argileux gonflants. En effet, certains de ces matériaux présentent une aptitude supérieure vis-à-vis du phénomène de retrait – gonflement, il s'agit essentiellement des smectites (montmorillonites), de certains minéraux argileux interstratifiés, de la vermiculite et de certaines chlorites. Dans la nature, la composition minéralogique dépend étroitement des conditions de dépôt et d'évolution diagenétique.

1.1.1.2.2 Hydrogéologie

L'hydrogéologie constitue un facteur d'environnement qui règle la présence d'eau et entre dans les facteurs de prédisposition. La présence d'une nappe aquifère rend plus complexe le phénomène de retrait - gonflement.

En effet, les conditions hydrauliques in situ (teneur en eau, degré de saturation) varient dans le temps non seulement en fonction de l'évapotranspiration (dont l'action est prépondérante sur une tranche très superficielle de l'ordre de 1 à 2 m d'épaisseur) mais aussi en fonction des fluctuations de la nappe éventuelle (dont l'action devient prépondérante en profondeur). Ces variations hydriques des sols se traduisent, pour des formations argileuses sensibles, par des variations de leurs caractéristiques mécaniques.

La présence d'une nappe permanente à faible profondeur permet généralement d'éviter la dessiccation de la tranche de sol superficielle. Inversement, un rabattement de cette nappe (sous l'effet d'un abaissement généralisé du niveau ou de pompages) ou le tarissement naturel des circulations d'eau superficielles en période de sécheresse aggrave la dessiccation de la tranche de sol soumise à l'évaporation.

1.1.1.2.3 Géomorphologie

La topographie de surface constitue un facteur permanent de prédisposition et d'environnement qui peut conditionner la répartition spatiale du phénomène de retrait - gonflement. La présence d'une pente favorise le ruissellement et donc le drainage (Figure I - 1 a), tandis qu'une morphologie plate sera plus susceptible de recueillir des eaux stagnantes qui ralentiront la dessiccation du sol. Par ailleurs, un terrain en pente exposé au sud sera

plus sensible à l'évaporation du fait de l'ensoleillement, qu'un terrain plat ou exposé différemment. En outre, dans le cas des pentes lorsque des formations argileuses et marneuses affleurent sur le flanc des vallées, localement, un fluage lent du versant peut être observé.

D'autre part il arrive souvent qu'une maison construite sur un terrain en pente soit plus sensible au problème de retrait – gonflement, en raison d'une dissymétrie des fondations lorsque celles-ci sont descendues partout à la même cote. Le bâtiment se trouve alors enterré plus profondément du côté amont (Figure I - 1 b). De ce fait, les fondations situées à l'aval subiront des mouvements plus importants car le sol, étant en position plus superficielle, est davantage soumis à l'évaporation (et par ailleurs, souvent plus altéré et donc plus sensible aux variations de teneur en eau).

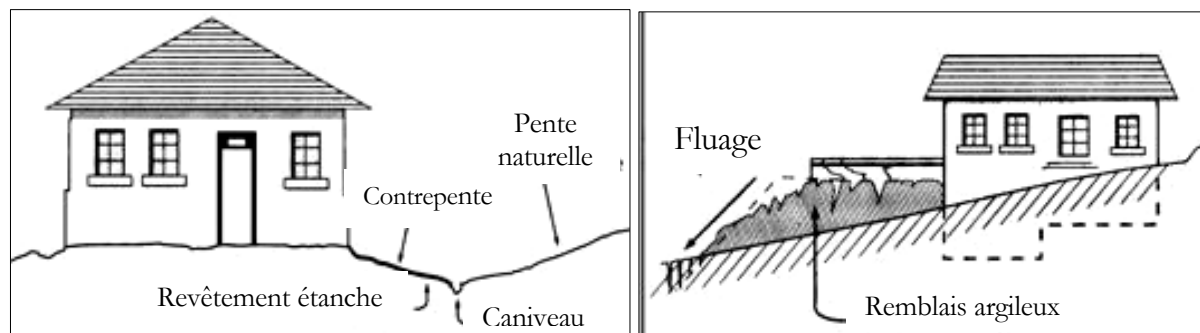


Figure I - 1. a) Présence de pente à côté de la maison Source : Ministère d'Environnement 1993 ; b) Maison construite en pente Source : Ministère d'Environnement 1993 d'après CEBTP 1991

Inversement, les zones de plateau peuvent être soumises à des phénomènes de karstification qui se traduisent par l'apparition de cavités karstiques dans les formations calcaires et remplies d'argiles d'altération sensibles au phénomène de retrait – gonflement.

1.1.1.2.4 Climatologie

Les phénomènes météorologiques exceptionnels constituent le principal facteur de déclenchement du phénomène de retrait - gonflement. Les variations de teneur en eau du sol sont dues à des variations climatiques saisonnières. La profondeur de terrain affectée par les variations saisonnières de teneur en eau ne dépasse guère 1 à 2 m sous des climats tempérés, mais peut atteindre 3 à 5 m lors d'une sécheresse exceptionnelle, ou dans un environnement défavorable (végétation proche).

Les deux paramètres importants sont les précipitations et l'évapotranspiration. En absence de nappe phréatique, ces deux paramètres contrôlent en effet les variations de teneur en eau dans la zone superficielle des sols. L'évapotranspiration est la somme de l'évaporation (liée aux conditions de température, de vent et d'ensoleillement) et de la transpiration (eau absorbée par la végétation). Ce paramètre est mesuré dans les stations météorologiques mais sa répartition spatiale n'est pas connue car sa valeur dépend étroitement des conditions locales de végétation. On raisonne en général sur les hauteurs de pluies effectives qui correspondent aux précipitations diminuées de l'évapotranspiration.

Malheureusement, il est difficile de relier la répartition, dans le temps, des hauteurs de pluies effectives à l'évolution des teneurs en eau dans le sol. Après une période de sécheresse prolongée on observe que la teneur en eau dans la zone superficielle de sol a tendance à diminuer, et ceci d'autant plus que cette période se prolonge. On peut établir des bilans hydriques en prenant en compte la quantité d'eau réellement infiltrée, ce qui suppose d'estimer, non seulement l'évapotranspiration, mais aussi le ruissellement. Mais toute la difficulté est de connaître la réserve utile des sols, c'est-à-dire leur capacité d'emmagasiner de l'eau et de la restituer ensuite (par l'évapotranspiration ou en la transférant à la végétation par son système racinaire). Le volume de cette réserve utile n'est généralement connu que ponctuellement et l'état de son remplissage ne peut être estimé que moyennant certaines hypothèses (on considère généralement qu'elle est pleine en fin d'hiver), ce qui rend extrêmement délicate toute analyse de ce paramètre à une grande échelle (ex. départementale).

1.1.1.2.5 Facteurs anthropiques

C'est un facteur de déclenchement, qui n'est pas lié à un phénomène climatique, par nature imprévisible, mais à une action humaine. En effet, les travaux d'aménagement, en modifiant la répartition des écoulements superficiels et souterrains, ainsi que les possibilités d'évaporation naturelle, sont susceptibles d'entraîner des modifications dans l'évolution des teneurs en eau de la zone superficielle de sol. En particulier, des travaux de drainage réalisés à proximité immédiate d'une maison peuvent provoquer des mouvements différentiels du terrain dans le voisinage. Inversement, une fuite dans un réseau enterré peut entraîner un gonflement des argiles hôtes.

Par ailleurs la présence de sources de chaleur en sous-sol (four ou chaudière) près d'un mur peut dans certains cas aggraver voire déclencher la dessiccation du sol à proximité.

1.1.1.3 Influence de la végétation

La végétation joue un rôle important à travers son action sur l'eau. L'effet de la végétation dépend de sa vitesse de croissance et de sa dimension d'influence (profondeur et distance horizontale).

1.1.1.3.1 Actions sur l'eau

Les plantes utilisent l'eau dans des réactions biochimiques, comme un solvant et pour maintenir la pression osmotique, mais la plupart de l'eau prise par les plantes est redonnée à l'atmosphère par le phénomène de transpiration. Généralement, les plantes réutilisent plus de la moitié des précipitations ($\sim 110\,000\text{ km}^3/\text{année}$) qui tombent sur la terre chaque année. L'eau de transpiration se déplace du sol à la plante et à l'atmosphère le long d'un continuum de potentiel de plus en plus important.

Les mesures directes du flux d'eau, attiré par des racines, par des jauges de flux (Figure I - 2 a) et d'autres techniques ouvrent de nouvelles possibilités de compréhension des phénomènes d'assimilation de l'eau et de sa redistribution en profondeur. De telles études illustrent la contribution des racines profondes à l'utilisation de l'eau de la plante entière et mettent en évidence le besoin d'intégrer des limites physiologiques le long du chemin de flux entier de la plante.

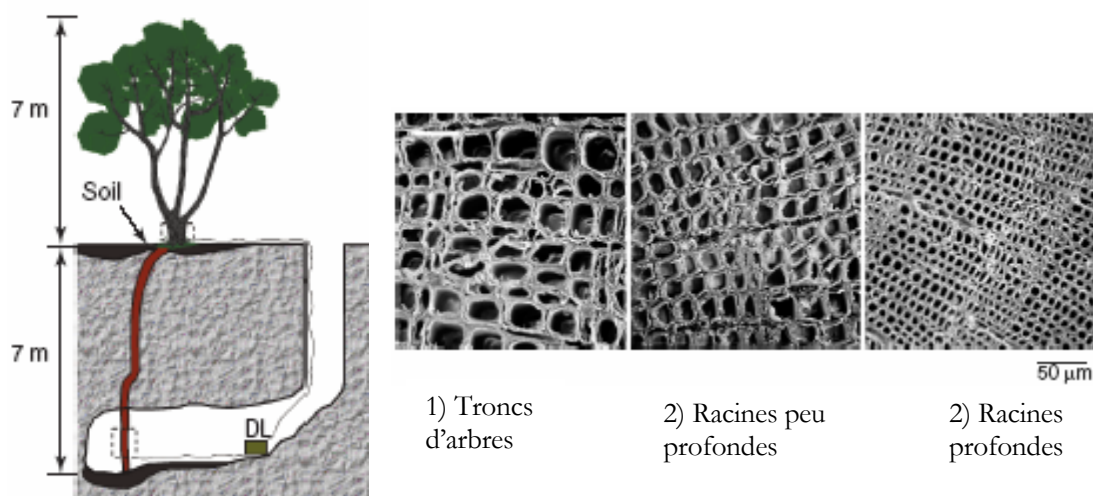


Figure I - 2. a) Mesure directe de flux d'eau par les racines, b) Observation de sections prises dans les différents éléments constituant un arbre (Pockman & al. 1999 d'après Jackson, Sperry & Dawson 2000)

Les résultats soulignent aussi l'importance de l'architecture hydraulique de la racine pour assurer les besoins en eau de la plante. La Figure I - 2 b représente les résultats d'observation au microscope électronique à balayage de sections d'arbres à différents endroits et de diamètre similaire (5-8 mm) : 1) troncs d'arbre, 2) racines peu profondes, 3) racines profondes. Les diamètres moyens des pores étant respectivement de 21.8 μm , 15.8 μm et 5.2 μm (Pockman et al. 1999). En considérant la loi de Jurin, on conclut que la succion augmente avec la profondeur, ce qui signifie que les plantes ont développé un système de capillarité leur permettant d'assurer l'approvisionnement d'eau à différentes profondeurs.

La succion qui se développe ainsi, dans le sol, augmente avec la diminution de la teneur en eau. Si la succion est supérieure à la capacité de succion de l'arbre, celui-ci ne peut plus tirer d'eau du sol. Le point de flétrissement est atteint. « L'eau absorbée par les végétaux crée dans le sol une dépression locale. Il existe donc un gradient qui permet un rééquilibrage des teneurs en eau. Ce rééquilibrage sera d'autant plus facile que le sol est perméable et humide. Dans le cas d'une argile très peu perméable, ce rééquilibrage peut être très lent et on constatera ainsi des variations de teneur en eau saisonnières, importantes et progressives. » (d'après Ministère de l'Environnement 1993).

En considérant qu'un arbre constitue un centre de prélèvement d'eau durant les périodes de bilan hydrique négatif (prélèvement par l'arbre supérieur aux apports par transfert) :

- le sol tassera suivant une cuvette centrée sur l'arbre ;
- il se produira un certain tassement localisé du sol autour de l'arbre.

On considère en général que l'influence d'un arbre adulte se fait sentir jusqu'à une distance de une fois et demie sa hauteur. Une fondation, située dans le domaine d'influence de l'arbre, subira donc une double distorsion: verticale et horizontale. On le voit mieux dans le cas d'une semelle filante (Figure I - 3) :

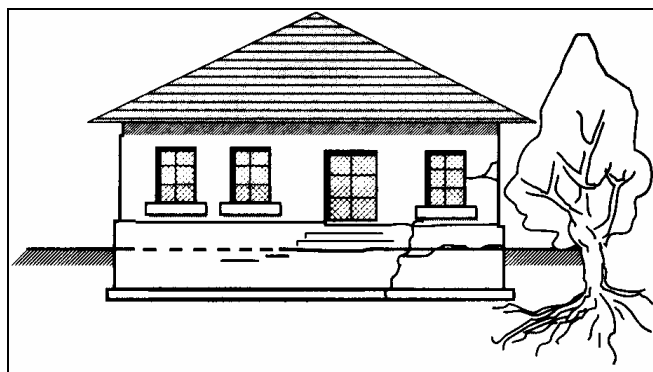


Figure I - 3. Désordres partiels dus à l'action localisée d'un arbre (Source : Ministère de l'Environnement d'après CEBTP 1991)

1.1.1.3.2 Croissance des arbres

Il paraît indispensable de considérer les divers stades de croissance et de vieillissement des arbres (Building Research Establishment, 1990) Un arbre jeune a ses racines concentrées dans un petit volume, son action est donc très locale.

«Au cours de sa croissance, il va étaler ses racines pour agrandir le domaine dans lequel il va prélever l'eau et les sels minéraux. En sol homogène, cette croissance serait axisymétrique mais des hétérogénéités auront une action répulsive (sol rocheux, sol sec) ou au contraire, attractive. Parmi ces anomalies attractives, il faut bien entendu citer les fuites des réseaux d'assainissement mais aussi les zones plus humides existant sous les constructions par suite d'une limitation de l'évapotranspiration.» (d'après Ministère de l'Environnement 1993).

Les racines d'un arbre en croissance seront donc fortement attirées par ces zones humides. Donc les racines seront naturellement incitées à se développer en direction de la maison, puisque celle-ci s'oppose à l'évaporation et qu'elle maintient une zone de sol plus humide sous sa surface. Contrairement au processus d'évaporation, qui affecte surtout la zone superficielle des deux premiers mètres, les racines d'arbres ont une influence jusqu'à 4 m, voire 5 m de profondeur. Le phénomène sera d'autant plus important que l'arbre est en pleine croissance et qu'il a davantage besoin d'eau. Les arbres considérés comme les plus dangereux sont : les chênes, les peupliers, les saules et les cèdres. A titre d'exemple un saule adulte a besoin de 300 litres d'eau par jour en été. Tout le volume concerné par les nouvelles racines verra sa teneur en eau baisser ; c'est pendant cette période que les désordres par tassement seront les plus marqués.

1.1.1.3.3 Profondeur et distance d'action

En Grande-Bretagne les observations ont montrées que les variations saisonnières de teneur en eau, en présence d'arbres, n'affecteraient pas les sols au-delà de 3 m de profondeur (Biddle, 1984).

Ceci reste peut-être vrai en période climatique normale, mais un certain nombre de sinistres observés à la suite des sécheresses de 1989 à 1992 en France montrent que cette action peut se manifester à des profondeurs supérieures (CEBT 1993). Des bâtiments sinistrés, fondés vers 3 m de profondeur, présentaient sous leurs fondations, des racines importantes ; les tassements constatés correspondaient à une diminution de teneur en eau sur une épaisseur de terrain de 1 à 2 m sous les fondations. Donc on peut considérer que l'influence des arbres peut se faire sentir jusqu'à une profondeur de 4 à 5 m.

« On considère généralement que les racines peuvent s'étendre jusqu'à 1 à 1,5 fois la hauteur de l'arbre. Dans les études détaillées de Cutler et Richardson (1989) les principales essences font l'objet de fiches indiquant les hauteurs maximales atteintes en zone urbaine et la distance maximale à laquelle des désordres ont été observés. » (d'après Ministère de l'Environnement 1993).

Dans le Tableau I - 1 on a présenté quelques données qui montrent l'influence des arbres en fonction de leur hauteur, distance des désordres etc.

Essence	chêne	peuplier	frêne	faux acacia	marronnier	tilleul	saule	aubépine	hêtre
Hauteur h (m) maximale en zone urbaine	16-23	25-28	14-23	18-20	12-15	16-24	15-25	10	20
Distance maximale du désordre (m)	30	30	21	12,4	23	20	40	11,5	15
Distance en dessous de laquelle 50% des désordres ont été constatés (m)	9,5	11	6	7	7,5	6	7	5	6
% de désordres liés à l'essence considérée (1)	11,5	8,7	7,5	3	3	8,2	5,7	4,6	1
% de l'essence dans la population (2)	2,1	3	3	1,8	2,2	6,4	4,5	3,5	1
Coefficient d'agressivité (3) = (1)/(2)	5,5	2,9	2,5	1,7	1,4	1,3	1,3	1,3	1

Tableau I - 1. Statistiques anglaises relatives aux désordres, dus aux arbres, sur les bâtiments. Source : synthèse des données extraites de "Tree roots & buildings" - Cutler & Richardson 1989.

1.1.1.4 *Détermination empirique du tassement – gonflement*

Les changements périodiques de volume des sols gonflants suite aux changements saisonniers climatiques conditionnent en quelque sorte la conception et la construction des fondations. Tout particulièrement sont touchées les régions arides et semi - aride, où on observe une grande variation saisonnière de l'humidité et des précipitations. Les structures légères et en particulier celles conçues sur des fondations peu profondes et posées sur des sols gonflants sont soumises périodiquement aux mouvements causés par le phénomène de retrait – gonflement. Le résultat est la fissuration qui résulte du gonflement, du retrait différentiel ou la combinaison de ces deux facteurs.

Il y a plusieurs méthodes qui évaluent l'effet de ces phénomènes, on se contentera d'exposer seulement les méthodes qui prennent en compte directement la succion du sol pour évaluer le gonflement dû à l'humidification ou le tassement dû à la dessiccation.

1.1.1.4.1 Formules pour calculer le gonflement

La méthode proposée par Brackley 1980 (d'après Cui et Delage, 2003) requiert seulement la connaissance de l'indice de plasticité et la succion du sol. Dans ce cas on calcule le gonflement tout simplement :

$$\text{gonflement}(\%) = \frac{I_p - 10}{10} \lg\left(\frac{s}{\sigma_v}\right) \quad (\text{I} - 1)$$

Où :

I_p : l'indice de plasticité

s : la succion du sol (kPa)

σ_v : la contrainte verticale incluant le sol sus-jacent et les surcharges (kPa)

La méthode dite de Michell (Snethen et Huang, 1992) prend en considération l'hypothèse que la déformation volumique est directement proportionnelle à la succion. La formule de gonflement prend la forme suivante :

$$\Delta H = \sum_i (I_{pt} \Delta s H_i) \quad (\text{I} - 2)$$

Où :

I_{pt} : l'index d'instabilité, qui est déterminé expérimentalement à partir des relations entre la déformation volumique et la teneur en eau massique

$(\varepsilon_v/\Delta w)$, et entre la teneur en eau massique et la succion ($c=\Delta w/\Delta s$). On calcule I_{pt} en multipliant la pente $(\Delta\varepsilon_v/\Delta w)$ par le rapport c .

Δs : le changement de la succion

H_i : hauteur initiale de la couche i

1.1.1.4.2 Formules pour calculer le tassement

La méthode proposée par Wang et al. (1998) considère que la succion est une variable (équation I-3). Cette méthode du calcul du tassement peut être appliquée aussi au calcul du gonflement à condition de déterminer alors, les paramètres avec des essais d'humidification.

$$\Delta e = C_m \Delta s \quad \text{et} \quad \Delta b_i = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_v} \right) b_i \quad (\text{I} - 3)$$

Où :

Δe : la variation de l'indice des vides due à la variation de succion Δs

C_m : l'indice de dessiccation, qui n'est pas constant sur une large gamme de succion (Cui et Delage, 2003), est déterminé expérimentalement

Δh_i : tassement ou gonflement de la couche de hauteur h_i

$\varepsilon_1/\varepsilon_v$: rapport entre la déformation verticale et la déformation volumique, on le détermine de manière expérimentale

Une relation empirique proposée par Philipponnat (1991) permet de calculer l'amplitude du tassement d'un sol au passage d'un état de teneur en eau $w_1(z)$ à un état de teneur en eau $w_2(z)$:

$$\delta H = \int_0^{z_{\max}} -R_1 (w_1(z) - w_f(z)) dz \quad (\text{I} - 4)$$

Où :

δH : le tassement dû au retrait ;

z_{\max} : la profondeur maximale de la zone active ;

w_f : étant le maximum du (w_2, w_{re}) ; où w_{re} est la limite de retrait effectif ;

R_1 : la pente de la courbe de retrait linéaire [diagramme $(\Delta H/H)$ - teneur en eau].

Le retrait linéaire en fonction de la variation volumique $(\Delta V/V)$ s'exprime de la façon suivante :

$$\left(1 - \frac{\Delta H}{H}\right) = \left(1 - \frac{\Delta V}{V_0}\right)^{1/3} \quad (\text{I} - 5)$$

H, V : hauteur et volume de l'échantillon à une teneur en eau définie w

H_0, V_0 : hauteur initiale et volume initial de l'échantillon

La méthode de Richards et al (1983) permet le calcul du tassement ou du gonflement en fonction du changement de la succion du sol :

$$\delta = \sum_{n=0}^m \frac{\partial \varepsilon}{\partial \lg(s)} \Delta \lg(s) \Delta z_n \quad (\text{I} - 6)$$

Où :

δ : le tassement ou le gonflement

ε : la déformation verticale du sol

$\Delta \lg(s)$: le changement de la succion totale

Δz_n : la hauteur de la $n^{\text{ème}}$ couche

m : le nombre de couches prises en compte

Une fois que le profil de succion dans le massif est établi, on peut évaluer le tassement (et de même la profondeur des fissures qui se développe lors du retrait des sols) ou le gonflement à l'aide des méthodes présentées précédemment.

1.1.2 Exploitation des guides de prévention

Les guides de prévention fournissent une bonne synthèse des effets de la sécheresse sur les constructions, les déformations des structures selon le type de mouvement de sol, et les mouvements différentiels admissibles dans des cas particuliers.

Dans cette partie, on essaiera de mieux comprendre les phénomènes liés à la sécheresse à l'aide des guides de prévention :

- ⇒ pour la végétation : l'abattage des arbres diminue la succion et le tassement se stabilise ;
- ⇒ pour les constructions : le choix de fondations adaptées pour minimiser les tassements différentiels.

1.1.2.1 *Effets sur les constructions*

On s'intéressera dans cette partie aux aspects météorologiques qui influencent particulièrement les constructions, à quelques résultats d'enquête en vue de définir un exemple type de la construction sinistrée, à l'influence du chargement, aux principaux mécanismes des désordres, à la période de retour des précipitations et à la pathologie des désordres.

1.1.2.1.1 Aspects météorologiques

La France a connu une sécheresse exceptionnelle (1989 – 1992) pour deux raisons :

- ⇒ l'importance du déficit pluviométrique par rapport aux moyennes de référence ;
- ⇒ la longue durée.

Comparativement, la sécheresse de 1976 a entraîné beaucoup moins de dommages aux constructions, grâce à sa durée moins longue.

« Les pluies de printemps et d'été sont en majeure partie consommées par la végétation, ou bien s'évaporent ; le stock d'humidité des sols superficiels diminue. En ce qui concerne les périodes de 1989 à 1992, elles ont presque partout été marquées par des températures et des taux d'ensoleillement particulièrement élevés, ce qui a accentué les effets des déficits pluviométriques sur les sols.

C'est pendant les mois d'automne et d'hiver que, du fait de la disparition quasi-complète de l'évapotranspiration (évaporation et consommation par la végétation), les précipitations peuvent reconstituer le stock d'humidité des sols, et réalimenter les nappes phréatiques souterraines et les cours d'eau (« pluviométrie efficace »).

Même si cette notion de « pluviométrie efficace » ne prend pas en compte stricto sensu la part des pluies infiltrées permettant de reconstituer le stock d'humidité des sols, l'analyse de sa répartition mensuelle apparaît mieux adaptée que celle de « pluviométrie totale » pour caractériser une période de sécheresse et ses effets sur les sols et les constructions.

Au cours des années 1989 à 1992, dans de nombreuses régions, les pluies efficaces ont été très inférieures aux normales.

Les désordres constatés en 1989 et 1990 se sont amplifiés au cours de l'année 1991 et des constructions, mêmes anciennes, se sont fissurées pour la première fois. La carte (Figure I -

4) représente un bilan des communes déclarées sinistrées du fait des conséquences de la sécheresse des années 1989 – 1992. » (d'après Ministère de l'Environnement 1993)

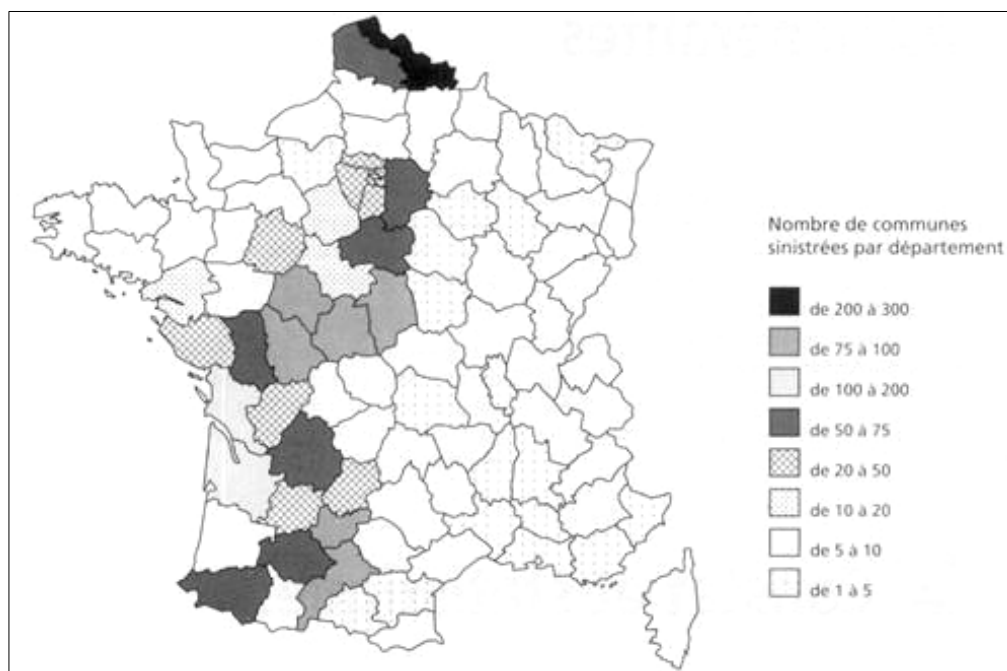


Figure I - 4. Bilan des communes déclarées sinistrées sur l'habitat pendant la sécheresse des années 1989 à 1992. (Caisse centrale de réassurance 1992).

1.1.2.1.2 Résultats d'enquêtes

Des enquêtes réalisées par l'Agence Qualité Construction (1990) et le CEBTP (1991) ont respectivement porté sur 356 et 412 bâtiments sinistrés que l'on peut considérer comme représentatifs. Ces résultats montrent que les constructions les plus touchées (d'après Ministère de l'Environnement 1993) sont :

- ⇒ des maisons individuelles ;
- ⇒ des bâtiments à simple rez-de-chaussée et avec dallage sur terre-plein ;
- ⇒ des maisons fondées sur des semelles continues, peu ou non armées, peu profondes (de 40 à 80 cm) et reposant sur un sol argileux ;
- ⇒ des bâtiments avec une structure en maçonnerie, sans chaînage horizontal.

1.1.2.1.3 Chargement

Son importance peut être révélée à l'occasion d'une sécheresse exceptionnelle et qui se traduit par une aggravation des désordres occasionnés à la construction. L'influence de ce facteur avait déjà été mise en évidence par les études menées dès 1990 par l'Agence Qualité

Construction et en 1991 par le CEBTP, lesquelles montraient que la plupart des sinistres concernaient des maisons individuelles dépourvues de chaînage horizontal et fondées sur semelles continues peu ou non armées et peu profondes (40 à 80 cm).

Les types de charges appliquées peuvent être classés en deux groupes :

- ⇒ Charge uniforme ;
- ⇒ Charge hétérogène.

L'examen de nombreux dossiers d'expertise réalisés dans plusieurs départements confirme qu'une grande majorité de maisons déclarées sinistrées présente en réalité des défauts de conception ou de réalisation des fondations (souvent très superficielles, hétérogènes ou fondées dans des niveaux différents). Il n'est pas exclu que des phénomènes de retrait - gonflement aient pu se produire dans le sol d'assise et contribuer à l'apparition des désordres constatés. Toutefois, il est probable que des fondations réalisées dans les règles de l'art auraient pu, dans de tels cas, suffire à éviter l'apparition de ces désordres.

1.1.2.1.4 Mécanismes des désordres (d'après Ministère de l'Environnement 1993)

Les mécanismes principaux sont :

1. Pendant la sécheresse

« Les mouvements du sol qui sont à l'origine des désordres aux constructions pendant une sécheresse intense sont dus essentiellement aux diminutions de teneur en eau. Ce sont les tassements différentiels du sol qui les provoquent. En effet, les variations de teneur en eau ne sont pas uniformes à l'ensemble des fondations pour diverses raisons :

- la présence du bâtiment constitue un écran à l'évaporation et modifie les conditions d'équilibre hydrique des sols, entre la partie centrale (teneur en eau qui reste sensiblement constante) et la périphérie du bâtiment, notamment les angles saillants ;
- les hétérogénéités diverses (nature des sols, géométrie des couches (Figure I - 5)) ;
- la topographie ;
- la végétation ;

- la circulation des nappes d'eau souterraines, les drains ou fossés, les fuites de réseaux etc.

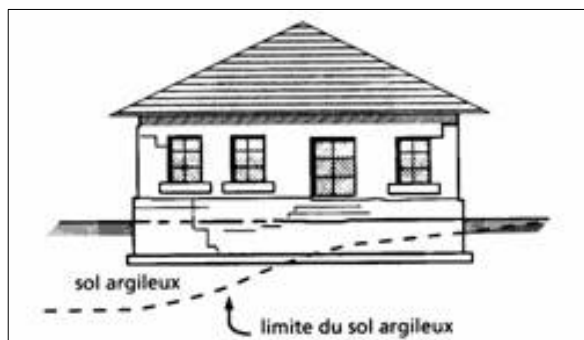


Figure I - 5. Désordres partiels dus à la variation d'épaisseur du sol argileux sensible (Source : Ministère de l'Environnement d'après CEBTP 1991)

Les tassements différentiels peuvent atteindre plusieurs centimètres. D'autre part, le retrait des sols peut supprimer localement le contact entre la fondation et le terrain d'assise et entraîner l'apparition de vides, ce qui provoque des concentrations de contraintes et des efforts parasites. Face à ces tassements différentiels, le comportement de la structure dépend des possibilités de déformation. Il existe deux cas particuliers de structure capable de supporter des traitements différentiels sans dommage :

- ⇒ Une structure très souple et déformable, sans matériau de remplissage, peut suivre sans dommage les déformations du sol ;
- ⇒ Une structure parfaitement rigide, avec des éléments horizontaux et verticaux en béton armé suffisamment ferrailés, peut résister sans dommage aux mouvements du sol, grâce à une nouvelle répartition des efforts.

Dans la majorité des cas de bâtiments courants (murs en maçonnerie porteurs ou de remplissage, murs en béton non armé, poutres ou poteaux en béton armé) la structure ne peut accepter sans désordre les mouvements différentiels des sols de fondation et les flexions parasites, que jusqu'à un certain seuil : distorsion en général de l'ordre de 1/500 à 1/1000.

2. Au retour de précipitations

Lorsque les sols se réhumidifient, ils ne retrouvent généralement pas complètement leur volume antérieur et les fissures des bâtiments ne se referment pas tout à fait. Dans le cas

des sols argileux particulièrement gonflants, l'amplitude du gonflement par réhumidification peut être supérieure à celle du retrait antérieur et entraîner de nouveaux désordres.

Comme dans le cas du retrait, les déformations dues au gonflement du sol ne sont pas uniformes (gonflements différentiels) et peuvent engendrer des désordres de même type. »

1.1.2.1.5 Manifestation des désordres (d'après Ministère de l'Environnement 1993)

« On peut distinguer trois parties :

1. Gros – œuvre

- La fissuration des structures (enterrées ou aériennes) : elle peut être verticale, horizontale ou inclinée à 45°. Cette fissuration recoupe systématiquement les points faibles que constituent les ouvertures situées dans les murs, les cloisons, les planchers ou les plafonds (Figure I - 6 a) ;
- Le déversement des structures : il affecte les parties fondées à des niveaux différents (Figure I - 6 b).
-

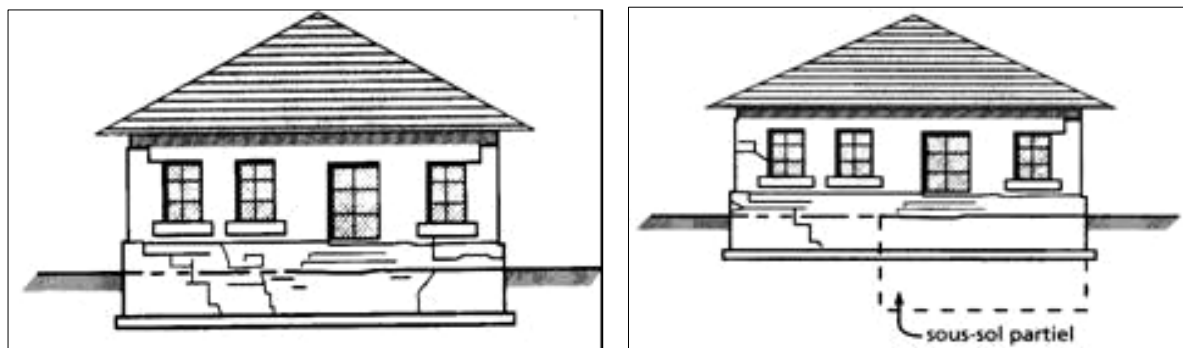


Figure I - 6. Désordres concernant le gros - œuvre a) Désordres à l'ensemble du soubassement et de l'ossature; b) Désordres partiels dus à l'existence d'un sous-sol partiel Source : Ministère de l'Environnement d'après CEBTP 1991

2. Second – œuvre

- La distorsion des ouvertures : elle gêne, voire empêche le bon fonctionnement des portes et fenêtres ;
- Le décollement de tous les éléments composites (matériaux différents assemblés par superposition) enduits et placages de revêtement sur les murs, carrelages sur dallages ou planchers, soumis à une flexion ou à une compression selon le plan d'assemblage ;

- L'étirement, la mise en compression ou la rupture des tuyauteries et canalisations : eau potable, eaux usées, gaz, chauffage central, gouttières.

3. Aménagements extérieurs

Ils subissent des désordres (Figure I - 7) du même type que le gros – œuvre et le second – œuvre et parmi eux on peut citer :

- Les murs de soutènement (ex. descente de garage) ;
- Les conduites de raccordement des réseaux de distribution, entre le bâtiment et le collecteur extérieur. »

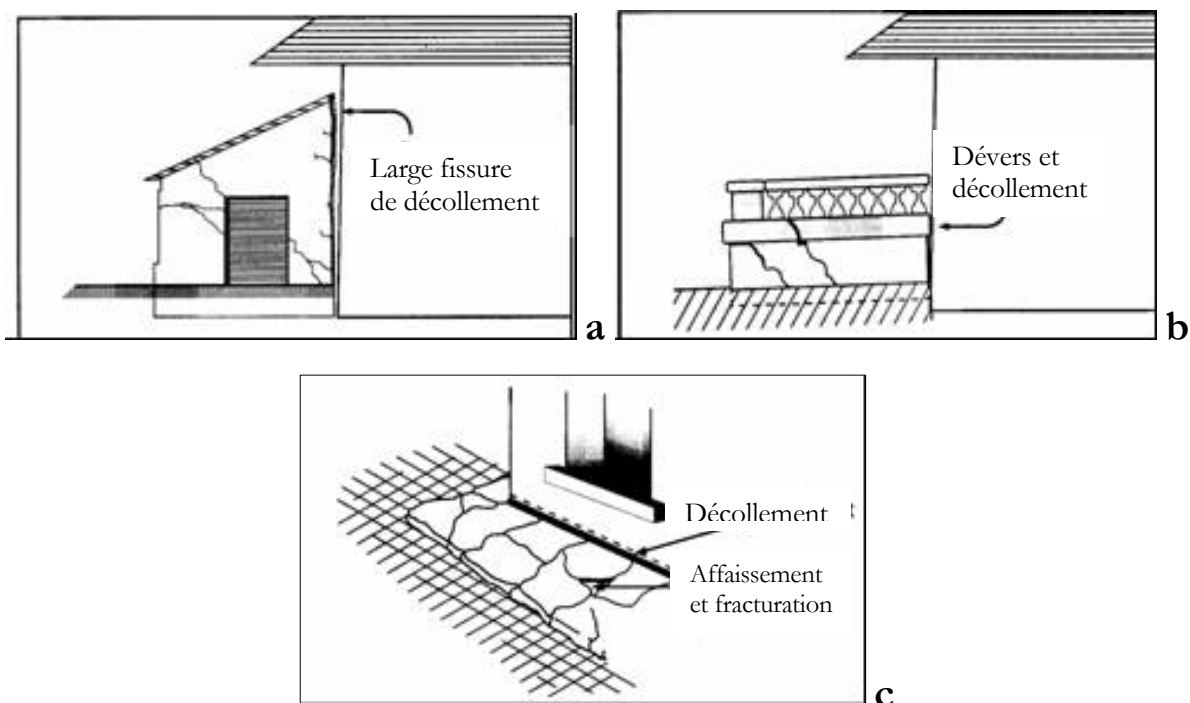


Figure I - 7. Désordres affectant a) un appentis, b) une terrasse et c) les dallages extérieurs

Source : Ministère de l'Environnement d'après CEBTP 1991

1.1.2.2 Déformations des structures selon le type de mouvement de sol

Que ce soit un gonflement ou un tassement, la déformation du sol de fondation, principalement en fonction de la rigidité de la structure portée, peut prendre deux aspects (d'après Mouroux 1988) :

- ⇒ déformation par flexion ;
- ⇒ déformation par cisaillement.

Dans le premier cas (flexion), tout comme une poutre sur deux appuis, une face va être comprimée et l'autre face sera tendue et parcourue en conséquence de fissures de traction subverticales, alors que dans le second cas (cisaillement) les fissures vont être générales dans toute la section de la poutre et orientée à 45°. Quelques exemples qui illustrent la forme et les directions des fissures sont présentés dans la Figure I - 8 :

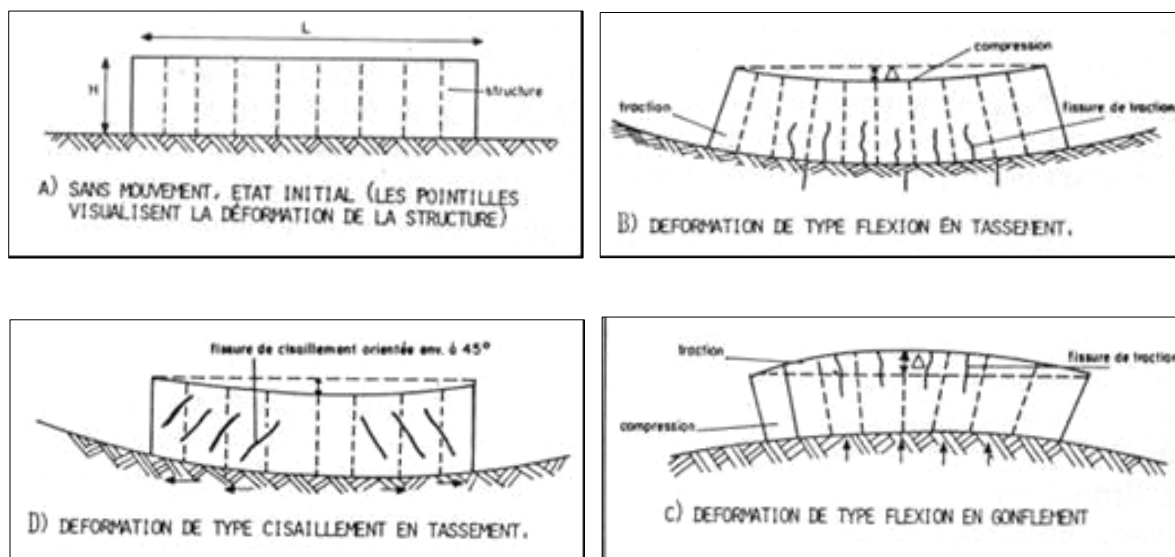
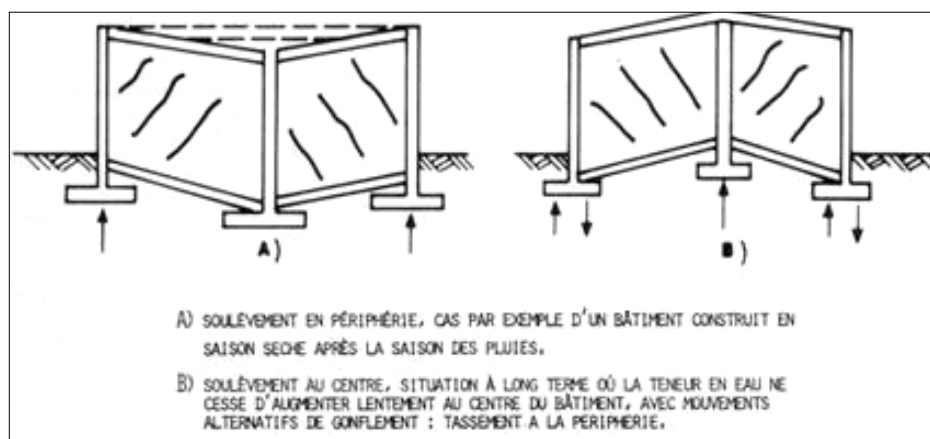


Figure I - 8. Formes et directions des fissures selon le type de déformation Source Mouroux P., Margron P. et Pinte J.C. édit. BRGM 1988

Dans une structure réelle, on trouvera à la fois des fissures de cisaillement et de traction par flexion selon les points faibles de bâtiment et selon l'évolution des mouvements. Ces fissures passeront par les points faibles du bâtiment, c'est-à-dire les angles des ouvertures telles que les portes et les fenêtres (d'après Mouroux 1988).

On présente sur la Figure I - 9 quelques exemples de structures différentes qui illustrent ces types de déformations.



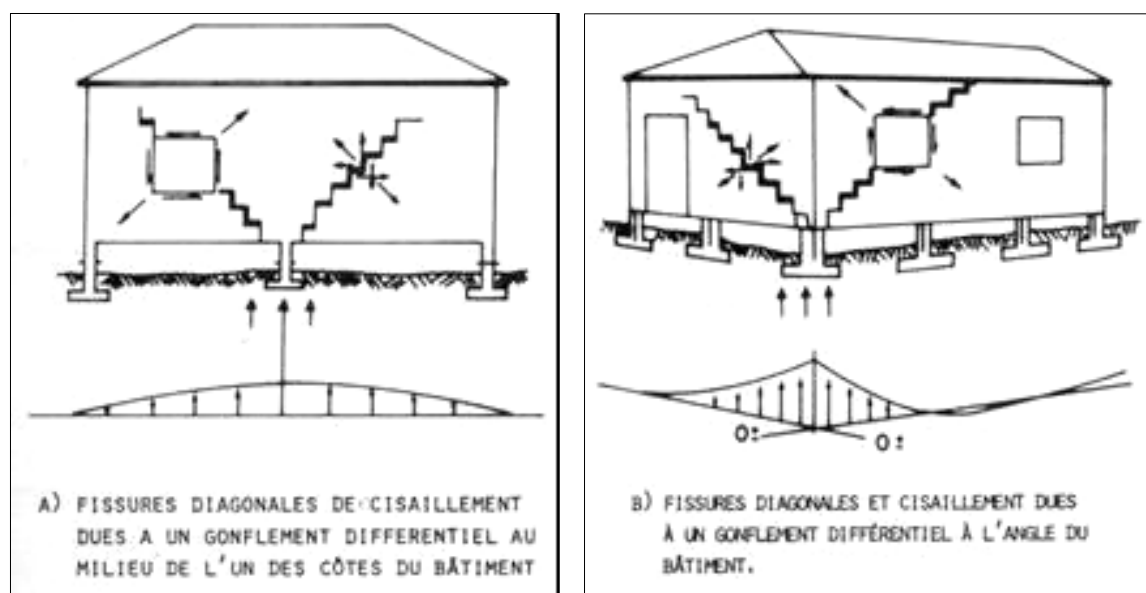


Figure I - 9. Types de déformations sur différentes structures Source Mouroux P., Margron P. et Pinte J.C. édit. BRGM 1988

1.1.2.3 Mouvements différentiels admissibles

Les désordres sont le résultat des mouvements du sol de fondation, tassements ou gonflements qui prennent un caractère différentiel d'un point à l'autre du bâtiment. C'est la différence de mouvement entre deux points rapprochés de la structure qui va conduire à des efforts importants dans cette structure, puis à sa fissuration ou sa rupture après le dépassement d'un certain seuil.

Si le tassement ou le gonflement était le même en tout point, quelle que soit l'amplitude de ce mouvement, théoriquement il n'y aurait aucun désordre grave (sauf réseaux associés). Donc certaines solutions consisteront plus à homogénéiser les mouvements qu'à les supprimer. Il y a deux raisons à l'origine des tassements et gonflements différentiels des sols naturels :

- ⇒ les sols sont toujours hétérogènes, même dans l'emprise limitée d'un bâtiment, qu'il s'agisse de leurs caractéristiques mécaniques, de leur nature ou de leur épaisseur ;
- ⇒ l'action du bâtiment sur le sol n'est jamais homogène, qu'il s'agisse des contraintes apportées au sol, du volume de sol concerné par les contraintes ou des perturbations hydriques liées à la présence du bâtiment.

Cette double hétérogénéité de l'interaction sol – structure n'est généralement pas correctement quantifiable et, dans la pratique courante des fondations, on ne considère que le mouvement différentiel probable, c'est-à-dire celui qui va influencer la sécurité ou la stabilité du bâtiment. Ce mouvement représente environ la moitié du mouvement total maximal qui peut être calculé en un point selon les différentes théories.

Les différents seuils s'expriment en terme de mouvements différentiels et quasi exclusivement en terme de tassements, car toute fondation s'accompagne toujours d'un tassement. Il n'y a pas de contraintes sans déformation. Les mouvements différentiels sont exprimés en fraction, comme le rapport du mouvement différentiel unitaire sur la distance entre les deux points d'appuis où s'appliquent ces mouvements. Un mouvement différentiel correspond à une différence de mouvement entre deux points, indépendamment de l'amplitude du mouvement en chaque point.

Le Tableau I - 2 montre la relation qui existe entre les mouvements unitaires et les désordres constatés.

Valeur du mouvement différentiel unitaire	Désordres constatés
1/1000	Fissuration des plâtres.
1/600	Seuil de fissuration dans les structures constituées de cadre béton armé avec entretoise (structures hyperstatiques de types portiques).
1/500	Limite pour les bâtiments où une fissuration n'est pas admissible
1/300	Limite à partir de laquelle il faut s'attendre à une fissuration des murs porteurs sur semelles filantes (semelles continues sous les murs).
1/250	Fissuration des murs porteurs sur semelles continues, les poutres entre les poteaux qui reposent sur semelles isolées commencent à perdre leur portance.
1/150	Fissuration importante dans les murs porteurs et dans les murs de remplissage en briques entre poteaux. Les poutres entre poteaux perdent une grande part de leur portance. Les structures hyperstatiques se sont souvent rompues. Limite à partir de laquelle les dommages de structure deviennent très grave et peuvent parfois conduire à l'instabilité générale du bâtiment par rupture ou déboîtement de ses éléments porteurs.

Tableau I - 2. Relation entre les mouvements différentiels unitaires et désordres constatés Source Mouroux P., Margron P. et Pinte J.C. édit. BRGM 1988

1.1.3 Démarche actuelle suivie par les assureurs

L'analyse de la démarche suivie par des assureurs permet d'avoir un regard particulier sur l'environnement de façon à mieux comprendre le phénomène, l'origine et les causes. Elle permet surtout de faire une classification du sinistre en tenant compte des désordres constatés et de trouver des solutions techniques de réparation appropriée. *Ce paragraphe est rédigé en prenant appui sur MAIF (2000) La méthodologie de l'expertise sécheresse.*

Quelles que soient la nature et l'importance des désordres signalés par le sociétaire dans sa déclaration de sinistre, l'expert de l'assurance doit inscrire sa mission dans un schéma type qu'il est présumé connaître afin d'établir :

- ⇒ un rapport simplifié ;
- ⇒ un rapport de reconnaissance ;
- ⇒ un/des rapport(s) partiel(s) ;
- ⇒ un rapport type.

1.1.3.1 Regard particulier sur l'environnement (d'après MAIF 2000)

« L'observation de l'environnement permet de mieux comprendre le phénomène de sécheresse, d'en déterminer éventuellement l'origine, la ou les causes aggravantes. Elle aide aussi à écarter l'existence d'un lien de causalité. On prend en compte les éléments d'appréciation suivants :

- la topographie du terrain (pente et orientation) ;
- la nature des sols ;
- l'existence de cours d'eau, nappes phréatiques, sources, puits... ;
- la zone d'implantation de l'immeuble (urbaine, rurale) ;
- l'assise de l'immeuble (remblais) ;
- la végétation située à proximité (arbres de hautes tiges, essences, distances de plantation par rapport à l'immeuble, localisation sur la parcelle ou chez le voisin...) ;
- la collecte des eaux à l'aide de canalisations étanches ou non étanches... ;
- la réalisation récente de travaux d'infrastructures (route, drainage, irrigation...) ;
- l'existence à proximité, de constructions de même type, sinistrées ;
- l'existence d'ouvrages maçonnés sinistrés (murs de soutènement, allées, clôtures...) ;

- la pluviométrie enregistrée par la station météo la plus proche au cours de la période visée. »

1.1.3.2 *Classification du sinistre suivant les désordres constatés (d'après MAIF 2000)*

« Le fascicule "sécheresse" prévoit la classification des désordres en 5 catégories:

- ⇒ Cat.1 : Désordres non imputables à la sécheresse ;
- ⇒ Cat.2 : Traitement des fissures ;
- ⇒ Cat.3 : Nécessité de réparer des fondations et/ou des structures aériennes ;
- ⇒ Cat.4 : Nécessité de créer des fondations spéciales ou de mettre en œuvre tout autre moyen permettant de stabiliser le sol ;
- ⇒ Cat.5 : Sinistre total : Bâtiment économiquement irréparable.

Cette classification résulte de l'observation des sinistres "sécheresse" enregistrés au cours des dernières années.

Elle permet :

- d'asseoir le diagnostic sur l'imputabilité ou non des désordres à la sécheresse ;
- de quantifier le degré de gravité, en fonction des mesures à adopter ;
- d'orienter le règlement des dommages vers le mode de réparation.

Pour les assureurs:

- de prendre position sur l'octroi et la mise en œuvre de la garantie ;
- d'orienter la gestion du dossier ;
- d'ajuster l'évaluation selon le coût prévisionnel des dommages. »

1.1.3.3 *Opportunité d'un rapport simplifié (d'après MAIF 2000)*

« Ce rapport doit être établi dès la première visite. Il faut noter toutes les précisions utiles à l'appréciation des dommages (origine, nature, importance, remèdes...) pour permettre éventuellement de donner une autre direction au dossier (quand les conséquences dommageables sont mineures et n'entrent pas dans le champ conventionnel et quand les causes et les circonstances du sinistre déclaré sont indépendantes de celles visées par l'arrêté "CAT-NAT". »

1.1.3.4 *Opportunité d'un rapport de reconnaissance (d'après MAIF 2000)*

« Le rapport de reconnaissance apporte une première information sur la nature et la gravité du sinistre sécheresse lorsque des investigations complémentaires se justifieront ultérieurement. Il doit contenir tous les éléments de réponse à :

- ⇒ la description du risque ;
- ⇒ la nature et la localisation des désordres ;
- ⇒ l'imputabilité à la sécheresse ;
- ⇒ le degré de gravité. »

1.1.3.5 *Différentes mesures adoptées*

Ces mesures peuvent être soit conservatoires, soit préventives en passant aussi par l'intervention du géotechnicien qui peut éclaircir les faits en faisant des investigations in situ.

1.1.3.5.1 Investigations in situ (d'après MAIF 2000)

« Une vérification des réseaux (alimentation, eaux usées, vannes d'eau, eaux pluviales...), doit être menée afin de mettre en évidence un dysfonctionnement éventuel qui peut être mis en relation avec le sinistre. Il faut vérifier attentivement les évacuations, l'étanchéité des regards, le système éventuel de drainage, arrosage automatique ou autres. Faire aussi une reconnaissance des fondations, qui permettra de constater la géométrie de la semelle, la nature du sol d'assise et l'existence éventuelle de racines. »

1.1.3.5.2 Mesures conservatoires (d'après MAIF 2000)

« Ce sont toutes mesures de nature à éviter une aggravation des désordres sécheresse et/ou prévenir tout autre dommage relatif aux biens et aux personnes. A titre indicatif on peut citer :

- abattage des arbres si nécessaire ;
- bouchage des fissures en cas de risques d'infiltrations ;
- réparation des canalisations et/ou regards non étanches ;
- préservation du clos et du couvert. »

1.1.3.5.3 Mise en observation de l'immeuble (d'après MAIF 2000)

« Cette mesure est retenue dans les situations où les désordres sont réputés évolutifs. La période d'observation doit couvrir un cycle de saisons. La constatation d'une évolution significative fait l'objet du dépôt d'un rapport partiel. Cela dépend aussi du bon fonctionnement des appareils de mesures mis en place et aussi de la volonté et de la fiabilité de la personne (le propriétaire) qui relève les mesures pendant ce temps d'observation. »

1.1.3.5.4 Intervention du géotechnicien (d'après MAIF 2000)

« Le rapport du géotechnicien doit être la synthèse des résultats des sondages réalisés in situ, ainsi que des essais opérés en laboratoire. Il ne doit pas comporter de préconisations sur la nature et l'étendue des modes de réparation, car c'est l'expert qui reste le maître du dossier.

1.1.3.6 *Détermination des solutions techniques de réparation*

Après que les données techniques soient collectées et analysées, il faut proposer les solutions les plus adaptées aux cas à résoudre avec les prises de risques nécessaires qui peuvent en découler. Les conséquences éventuelles sont assumées en accord avec le propriétaire.

Les solutions consistent selon le cas en :

- ⇒ un traitement des conséquences dommageables ;
- ⇒ un renforcement des superstructures (chaînages, raidisseurs, joints de rupture) ;
- ⇒ une reprise en sous-œuvre de l'infrastructure (plots en béton, micro pieux,...) ;
- ⇒ une maîtrise de l'environnement avec :
 - suppression de végétations ;
 - trottoirs périphériques ;
 - étanchéité des réseaux souterrains, drains ;
 - géomembranes et tranchées drainantes. »

1.2 Minéralogie des argiles et interaction eau – argile

Etant donné que les dégâts imputables à la sécheresse sont essentiellement dues au phénomène de retrait – gonflement des argiles, il apparaît nécessaire d'examiner la minéralogie de ces dernières ainsi que les interactions eau – argile.

1.2.1 Minéralogie des argiles

Parmi les groupes de minéraux argileux on distingue : le groupe de la kaolinite, le groupe des micas, le groupe de la montmorillonite, le groupe des chlorites, le groupe des vermiculites, les minéraux argileux interstratifiés. Les minéraux argileux sont des phyllosilicates, c'est-à-dire des silicates en feuilles. Chaque feuille est composée d'un empilement de feuillets. L'étude du feuillet définit le minéral. On distingue 4 niveaux d'organisation :

- ⇒ les plans sont constitués par les atomes ;
- ⇒ les feuillets, tétraédriques (Figure I - 10 a) ou octaédriques (Figure I - 10 b), sont formés par une combinaison de plans (Figure I - 10 c) ;
- ⇒ les couches correspondent à des combinaisons de feuillets (Figure I - 10 d) ;
- ⇒ le cristal résulte de l'empilement de plusieurs couches.

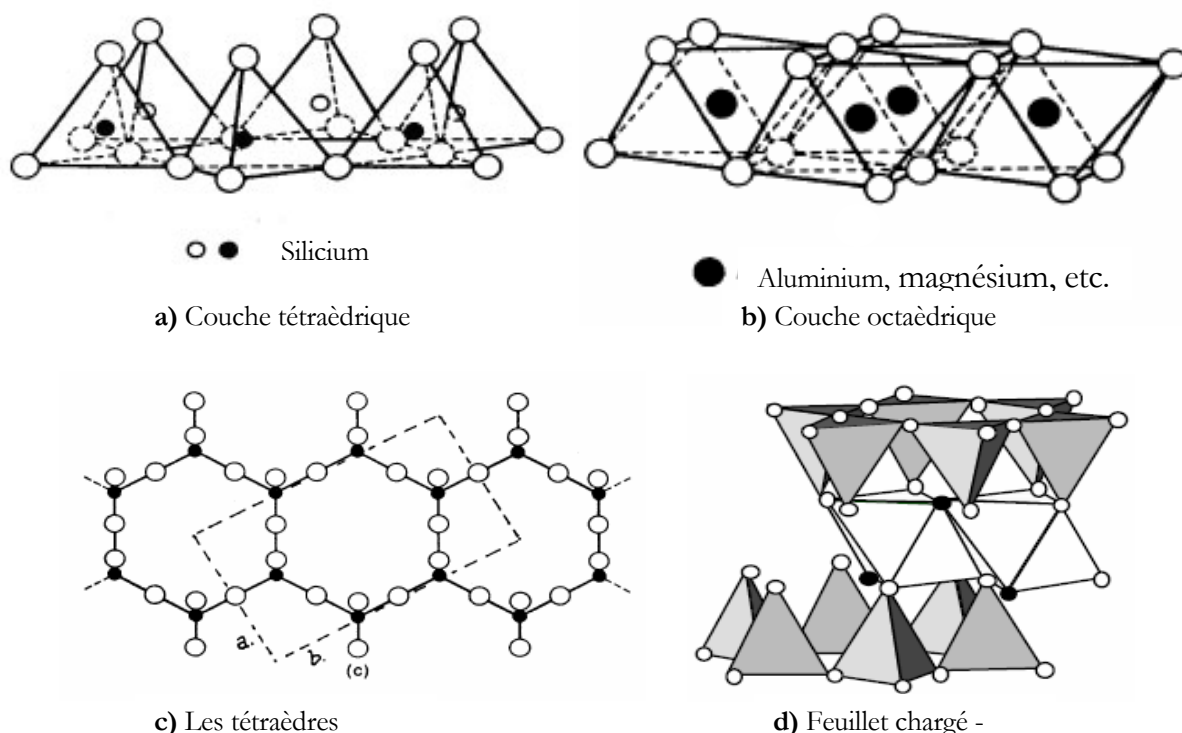


Figure I - 10. a) Couches tétraédriques ; b) Couches octaédriques typiques des argiles lamellaires ; c) Plan des tétraèdres ; d) Feuillet chargé (Eslinger & Peaver, 1988)

Dans les paragraphes qui suivent on a fait une explication plus détaillée sur les groupes les plus importants de ces minéraux.

1.2.1.1 *Kaolinite*

Le mot kaolin vient du nom d'une colline chinoise où ce produit fut extrait au long des siècles. Le nom de kaolinite est utilisé pour la première fois dans le vocabulaire scientifique par Johnson et Blake (1867) (d'après Grim 1968). La structure de la kaolinite a été établie par Gruner (1932) et révisée par Brindley et Robinson (1946) (d'après Grim 1968). Chaque feuillet de la kaolinite est composé de l'association de deux couches différentes, nommées couche tétraédrique et couche octaédrique.

- La couche tétraédrique est ainsi nommée parce qu'elle est formée de l'association de tétraèdres, liés entre eux, en couche plane. Chaque tétraèdre a ses quatre sommets occupés par des oxygènes et son centre occupé par un silicium qui partage ses quatre charges positives avec les quatre oxygènes des sommets.
- La couche octaédrique est formée d'octaèdres, liés entre eux, en couche plane. Ces octaèdres ont leurs six sommets occupés par des oxygènes ou des oxhydroyles. Le cœur des octaèdres est occupé par un aluminium.

Associons une couche tétraédrique siliceuse à une couche octaédrique alumineuse nous obtenons le feuillet de la kaolinite qui est électriquement neutre. La formule structurale de la kaolinite est la suivante :



L'empilement régulier de ces feuillets définit la kaolinite et la périodicité de cet empilement est de 7 Å environ.

1.2.1.2 *Micas*

La structure des micas a été établie par Mauguin (1928) et Pauling (1930) (d'après Grim 1968). Une couche octaédrique est comprise entre deux couches tétraédriques ; La couche octaédrique est garnie par des ions hexacoordonnés de nature variable qui détermine la variété des micas ; Les tétraèdres de la couche tétraédrique sont occupés trois fois sur quatre par Si et une fois sur quatre par Al. Ceci crée un déficit de charge pour cette couche ; ce déficit est comblé par de gros ions, généralement des ions potassium, qui sont situés

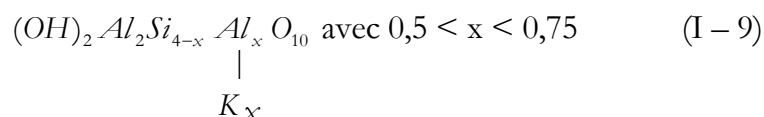
entre les feuillets et assurent la liaison de ceux-ci. Ces feuillets sont tenus entre eux par des ions K et ne peuvent glisser les uns sur les autres.



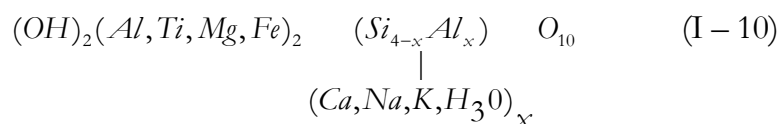
1.2.1.3 Illites

Le terme illite a été proposé (Grim, Bray et Bradley, 1937) comme nom d'après le nom de l'état d'Illinois, USA. Les illites sont les plus répandues des minéraux argileux dans la nature. Les analyses chimiques ont montré dès le début que moins d'un silicium sur quatre était remplacé par un aluminium, ce qui diminue d'autant la quantité d'alcalins entre les feuillets. Un remplacement partiel des ions Al octaédriques par des ions Mg, Fe²⁺ et Fe³⁺ est fréquent.

La formule structurale est variable selon le modèle suivant :



Mais on peut obtenir une formule plus générale :



Dans l'ensemble, les illites sont à considérer comme des micas de très petite taille, où les ions potassium sont en déficit et remplacés par l'eau.

1.2.1.4 Montmorillonite

Le terme de montmorillonite a été proposé par Damour et Salvétat (1847) (d'après Grim 1968) d'après le nom de Montmorillon (Vienne, France). Les montmorillonites sont des minéraux voisins des micas, mais les liaisons entre les feuillets sont affaiblies, si bien que de l'eau se glisse entre ces feuillets en quantité variable, ce qui donne à la périodicité de l'empilement une valeur également variable, souvent voisine de 14 Å. Dans le « pôle » montmorillonite, il n'y a pas de remplacement du silicium des tétraèdres par l'aluminium, mais remplacement partiel de l'aluminium des octaèdres par du magnésium ; ceci crée un

déficit de charge compensé par des ions, situés entre les feuillets et qui sont échangeables, fréquemment représentés dans la nature par Na et Ca.



On présente dans le Tableau I - 3 la surface spécifique de quelques minéraux argileux :

Minéral	Surface interne (m ² /g)	Surface externe (m ² /g)	Surface totale (m ² /g)	C.E.C. (Capacité d'Echange Cationique) (milliéquivalent/100g)
kaolinite	0	10 - 30	10 - 30	5 - 15
illite	20 - 55	80 - 120	100 - 175	10 - 40
montmorillonite	600 - 700	80	700 - 800	80 - 150
vermiculite	700	40 - 70	760	100 - 150
chlorite	---	100 - 175	100 - 175	10 - 40

Tableau I - 3. Surface spécifique et C.E.C. de quelques minéraux argileux (Morel 1996)

1.2.2 Interactions physico-chimiques entre l'eau et l'argile

On parlera des interactions physico-chimiques entre eau et argile en abordant la charge des surfaces argileuses et l'hydratation des argiles.

1.2.2.1 Charge des surfaces argileuses

Les minéraux argileux ont une surface électrique non neutre (Figure I - 11 a, b) et il existe deux types de charge (d'après Schroeder 2002) :

- une charge permanente ou structurelle liée aux substitutions ioniques (Al³⁺ pour Si⁴⁺ dans T, Mg²⁺ ou Fe²⁺ pour Al³⁺ dans O), de signe négatif ;
- une charge de surface variable selon le pH du milieu, liée aux réactions chimiques qui se produisent à la surface des minéraux ou suite à l'adsorption de surfactants, de signe + ou -.

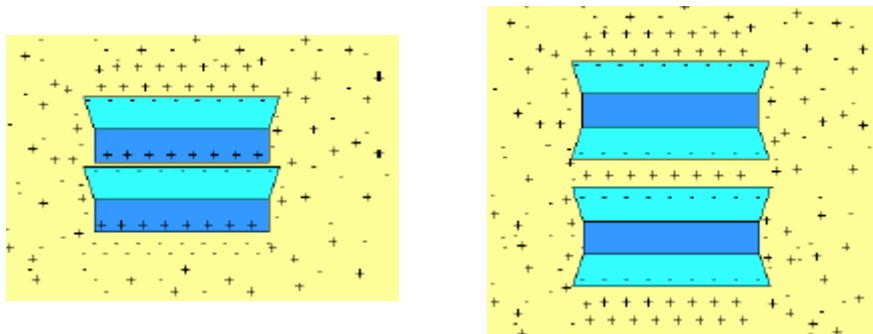


Figure I - 11. Adsorption à l'équilibre : a) Kaolinite : b) Vermiculite (Schroeder, 2002)

La charge de surface est liée à l'hydrolyse de liens rompus Si-O et Al-OH le long des surfaces (Figure I - 12). A faible pH, l'argile se caractérise par une capacité d'échange anionique : H^+ se lie davantage par rapport à OH^- , une charge positive se développe. A fort pH, une capacité d'échange cationique (CEC) se développe : Les OH^- se lient davantage que H^+ et une charge négative apparaît.

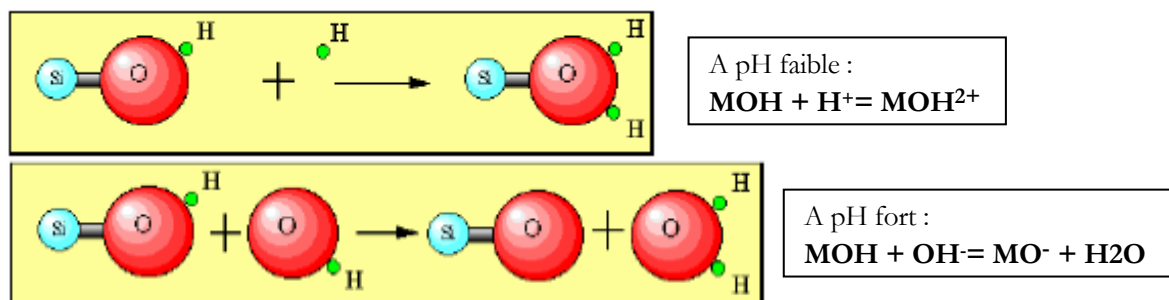


Figure I - 12. Echange ionique (Schroeder, 2002)

1.2.2.1.1 Mécanismes d'adsorption

Dans les argiles l'action d'attraction de l'eau par le sol n'est pas seulement due à la capillarité, mais aussi aux actions d'adsorption physico – chimique. Mitchell (1993) a proposé quelques mécanismes possibles engendrant cette adsorption :

- ⇒ les liaisons hydrogène qui se développent entre les molécules d'eau et les atomes d'oxygène ou d'hydroxyde situé sur la surface du feuillet argileux (Figure I - 13 a)
- ⇒ l'eau nécessaire à l'hydratation des cations attirés électriquement par les défauts de charge du feuillet (Figure I - 13 b)
- ⇒ l'eau attirée par l'attraction osmotique créée par la concentration de cations au voisinage des feuillets (Figure I - 13 c)
- ⇒ le dipôle de la molécule d'eau est attiré électriquement par les feuillets argileux qui sont chargés négativement (Figure I - 13 d)

⇒ les molécules d'eau peuvent être liées à la surface argileuse par des forces de type Van der Waals

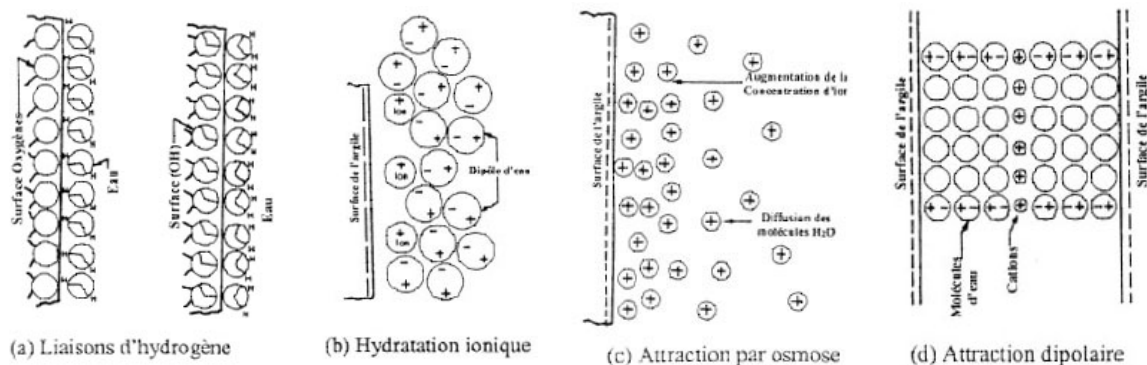


Figure I - 13. a), b), c), d) Interaction eau- argile, (d'après Mitchell, 1993)

1.2.2.2 Hydratation des argiles

Le degré d'hydratation varie d'une famille argileuse à une autre. Certains minéraux argileux ont la capacité d'incorporer dans leur structure des molécules d'eau, qui modifient la dimension de la couche en provoquant son gonflement. Ces argiles sont appelées argiles gonflantes. Les smectites, vermiculites et les minéraux interstratifiés offrent des capacités d'expansion beaucoup plus importantes que celles des autres minéraux argileux.

L'incorporation d'eau est réversible à la pression atmosphérique et dépend de la température et de la pression de vapeur. Plus l'air est humide, plus l'argile pourra incorporer de l'eau. Cette hydratation conduit à une augmentation de volume pouvant atteindre 95%. Dans un climat tempéré, la présence de smectites conduit à une déstructuration du sol (Figure I - 14) : en hiver les smectites gonflent ; en été les smectites se déshydratent et entraînent la formation de larges fissures.

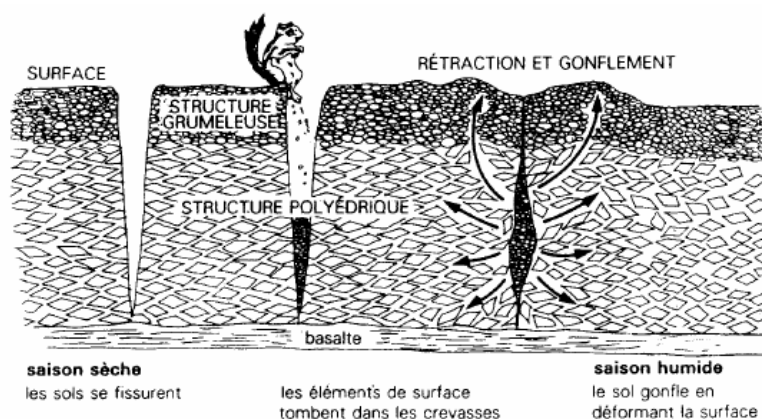


Figure I - 14. Déstructuration d'un sol à cause du gonflement des argiles (La Nature, 1981).

1.2.2.2.1 Théorie de la double couche

L'étude de la distribution des cations à la surface des particules argileuses est modélisée par la théorie de la double couche. Le modèle de Gouy-Chapman permet le calcul de la distribution des cations dissous à proximité d'une plaquette argileuse sous l'effet du champ électrique en fonction de la distance. Dans ce modèle des smectites sont mises en solution. Si la concentration en smectite est faible, les smectites vont se disperser, l'eau va se troubler et il y aura peu de sédimentation. On obtient une solution colloïdale.

Sans eau, les couches T-O-T sont liées par des forces électrostatiques mais en présence d'eau les couches T-O-T sont isolées. Etant donnée la surface négative des argiles, les cations de la solution vont être attirés par la surface des particules argileuses pour atteindre un nouvel équilibre. La concentration en cation sera plus grande à proximité de la surface des argiles. Un gradient va s'établir et les cations vont avoir tendance à diffuser vers la solution. On atteint une situation d'équilibre dans laquelle la concentration en cation diminue avec la distance jusqu'à ce que la concentration égale celle de la solution. On peut distinguer deux couches :

- une couche négative à la surface des argiles ;
- une couche positive juste à côté, d'où la notion de « double couche ».

L'épaisseur de la double couche dépend de la charge de la surface argileuse et de la salinité. Si on augmente la concentration en smectites, la diffusion des cations vers la solution est moins prononcée. La couche de Gouy est comprimée et les argiles se rapprochent davantage. L'expression suivante permet une expression de l'épaisseur de la double couche :

$$x = \sqrt{\frac{DkT}{8\pi n_0 \varepsilon v^2}} \quad (I - 12)$$

D la permittivité relative (constante diélectrique) du milieu ;

k la constante de Boltzmann ($k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$) ;

T la température thermodynamique ;

n_0 une concentration ionique de référence, en un point loin de l'argile ;

ε la charge électronique élémentaire ($\varepsilon = 1.6 \times 10^{-19} \text{ }^\circ\text{C}$) ;

v la valence des cations.

1.3 Succion et techniques de mesure

Cette partie est consacrée à la description des variables importantes du comportement hydromécanique de sols non saturés. La succion est une variable clé dans l'analyse de ce comportement et sa mesure expérimentalement est un aspect fondamental dans la mécanique des sols non saturés. On abordera des techniques de mesures et de contrôle de la succion, ainsi que les propriétés de rétention des sols. On s'intéressera aussi au transfert des fluides et à la détermination de la perméabilité qui représente un paramètre primordial pour cette étude.

1.3.1 Succion dans les sols non saturés

Observant les sols non saturés, la première remarque est que le sol se trouve dans un état triphasique : la phase solide, la phase liquide et la phase gazeuse, contrairement aux sols saturés où le sol est un matériau biphasique eau – solide.

Dans un milieu poreux l'existence conjointe d'une phase gazeuse et d'une phase liquide provoque le développement de ménisques capillaires air – eau. Dans ce cas la pression de l'eau est négative, du fait de la tension gravitaire exercée sur l'eau, ce qui donne des différences significatives par rapport aux sols saturés où la pression interstitielle est positive.

Donc on estime que le développement de ménisques capillaires dans la structure du sol, est la caractéristique principale de non saturation (Delage, 1988). La pression négative de l'eau est appelée la succion. La succion indique un déficit de pression de l'eau du sol par rapport à la pression d'air. La valeur de la succion peut varier dans un intervalle très large, entre 0 et plusieurs centaines de MPa et on peut distinguer différentes composantes de la succion.

1.3.1.1 Définition de la succion

«La succion dans les sols a été définie en géotechnique en 1965, dans un contexte thermodynamique, comme une énergie potentielle comparable à la charge hydraulique dans les sols saturés. Pour amener, à l'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 ; il s'ensuit, par définition, que la valeur du potentiel capillaire ou matriciel est négative. Ce potentiel est égal

à "la quantité de travail par unité de volume d'eau pure, nécessaire pour transporter de façon réversible, isotherme, à l'altitude constante et à la pression atmosphérique, une quantité infinitésimale d'eau depuis un état d'eau pure loin du sol, à celui d'eau interstitielle dans le sol non saturé". » (d'après Delage & Cui 2000).

Les différentes composantes du potentiel de l'eau d'un sol non saturé comprennent, comme pour la charge hydraulique des sols saturés, les potentiels de pression externe (s_p), gravitaire (s_g), les termes de potentiels capillaire et d'adsorption (dont la somme forme le potentiel matriciel (s_m)), et le potentiel osmotique (s_o). On a par définition :

$$s = s_p + s_g + s_m + s_o \quad (\text{I} - 13)$$

On peut exprimer la succion soit en unité de pression soit en hauteur d'eau. Dans cette étude on a gardé le même symbole s pour la succion.

On peut exprimer en conditions atmosphériques une autre définition de la succion totale à partir cette fois de la thermodynamique en utilisant l'expression donnée par la loi de Kelvin qui définit la relation entre la pression de vapeur d'eau de la phase gazeuse P_v au voisinage du ménisque eau – air et la succion :

$$s = \frac{RT}{gM} \ln\left(\frac{P_v}{P_{vs}}\right) \quad (\text{I} - 14)$$

Où :

- s : la succion totale (kPa)
- R : la constante des gaz parfaits ($R= 8,3143 \text{ J/mol}^\circ\text{K}$)
- T : la température absolue ($^\circ\text{K}$)
- M : la masse molaire de l'eau ($M=18,016 \text{ g/mol}$)
- g : l'accélération de la pesanteur ($g= 9,81 \text{ m/s}^2$)
- P_{vs} : la pression de vapeur saturante à la température T (kPa)
- P_v : la pression partielle de vapeur (kPa)

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

On passe maintenant à une explication plus détaillée des composantes de la succion.

1.3.1.1.1 Succion matricielle

On observe le phénomène de tension de surface au moment du contact entre l'eau et l'air, du à l'action des forces intermoléculaires, sur les molécules d'eau à l'interface air – eau. Une molécule d'eau à l'interface air – eau est soumise à une force résultante non nulle dirigée vers l'intérieur du liquide (Figure I - 15), car la molécule d'eau est attirée par les molécules de sa propre phase par une force plus grande que celles qui l'attirent vers l'air ; en contrepartie afin de maintenir un équilibre, l'interface génère une tension de surface sur sa longueur. Cette tension agit tangentiellment à la surface et sa grandeur est une fonction de la température (Fredlund & Rahardjo 1993).

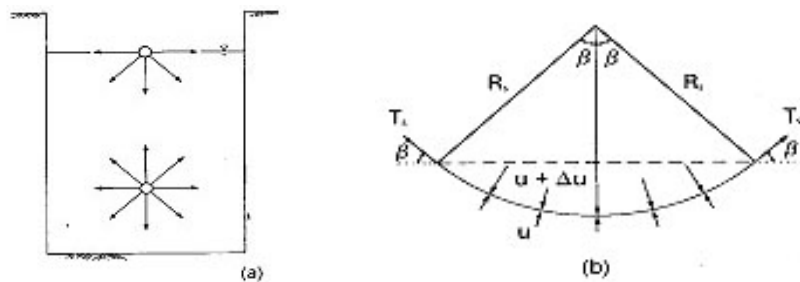


Figure I - 15. Tension de surface a) Forces intermoléculaires sur l'interface et dans l'eau; b) Pressions et tension de surface agissant à l'interface (Fredlund & Rahardjo, 1993)

La propriété de tension de surface permet donc d'expliquer le phénomène d'ascension capillaire. Le mécanisme est généralement représenté par le schéma de la Figure I - 16, décrivant la remontée de l'eau dans un tube de rayon r petit. Dans l'hypothèse de pores cylindriques, la loi de Jurin donne la relation entre le rayon du ménisque dans le tube et la différence de pression entre les phases gazeuses et aqueuses (ou la succion matricielle) :

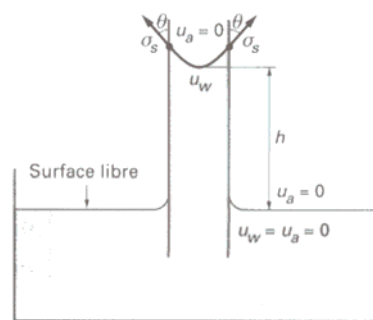


Figure I - 16. Remontée capillaire dans un tube, (Delage et Cui, 2000)

$$u_a - u_w = \frac{2\sigma_s \cos \theta}{r} \quad (I - 15)$$

Où :

- u_a, u_w : respectivement les pressions de la phase gazeuse et de la phase aqueuse
 σ_s : la tension de surface eau – air qui vaut 0,073N/m pour l'eau
 r : le rayon du tube
 θ : l'angle de raccordement entre le ménisque et le solide qui est pris souvent égal à zéro pour l'eau

Cette relation montre que plus le rayon de courbure est petit, plus la pression capillaire (ou succion) est élevée.

1.3.1.1.2 Succion d'adsorption

Dans les sols fins non saturés, contrairement aux sols grenus, l'action d'attraction de l'eau par le sol n'est pas seulement due à la capillarité, mais aussi aux actions d'adsorption physico – chimique. Pour les sols fins, le terme du potentiel de l'eau correspond à l'action combinée de la capillarité et de l'adsorption sous le terme potentiel matriciel.

1.3.1.1.3 Succion osmotique

Dans le cas de l'eau interstitielle contenant du sel, il peut exister également un potentiel osmotique dû à la tendance des ions à s'hydrater et à l'existence de différences de concentration entre différents points du sol. En géotechnique elle n'est en général pas pris en compte, car son influence serait négligeable (Fredlund & Rahardjo 1993 ; Delage 1999).

1.3.2 Techniques de mesures et de contrôle de la succion

La succion est une grandeur physique difficile à mesurer. Elle nécessite diverses techniques de façon à couvrir toute la gamme des succions rencontrées dans les sols (Delage & Cui 2000). Parmi elles on peut citer la tensiométrie (Ridley 1993) et la psychrométrie (Verbrugge 1974). Ces succions peuvent atteindre plusieurs centaines de méga pascals. On utilise souvent des pierres poreuses céramiques de très fine porosité. L'avantage de ces pierres est qu'elles ne peuvent être désaturées que sous des succions beaucoup plus fortes que celles appliquées aux sols : de ce fait, ces pierres restent donc toujours saturées, mêmes lorsqu'elles sont soumises à des fortes pressions d'air. Elles assurent ainsi la continuité de l'eau entre le système de contrôle ou de mesure, et le sol.

1.3.2.1 *Contrôle par plaque tensiométrique et par translation d'axes*

Dans sa forme la plus simple le système de mesure de la technique de contrôle par plaque tensiométrique consiste en une pierre poreuse céramique saturée, un réservoir d'eau, un manomètre et l'échantillon de sol en contact avec la pierre poreuse céramique. L'échantillon de sol à cause de sa succion (qui se traduit par un déficit d'eau) absorbera de l'eau de la pierre poreuse. Cette absorption causera ainsi une baisse de la pression d'eau dans le réservoir, qui peut être mesurée à l'aide du manomètre. Quand l'équilibre est atteint, on aura ainsi la valeur de la succion. L'entrée d'air dans le réservoir empêche de mesurer la succion au-delà des valeurs d'1 atm. Ce système permettait la mesure de très faibles succions entre 0 et 10 kPa. Schofield (1935) a proposé l'extension de la gamme de mesure en enfermant l'échantillon de sol dans une chambre et en appliquant une pression d'air dans la chambre.

L'appareillage nécessaire pour la réalisation de cette technique consiste en une surface plane, une pierre poreuse placée au même niveau que cette surface, un réservoir d'eau (qui est placé au-dessous de la pierre céramique) connecté à un système de mesure, un système de drainage et une chambre hermétique qui se met en contact avec la surface plane et permet l'application et la garde des pressions d'air (Figure I - 17). Le point d'entrée d'air de la pierre poreuse céramique doit être supérieur à la valeur de succion mesurée (en général 500 kPa, mais il y a aussi des céramiques de 1500 kPa).

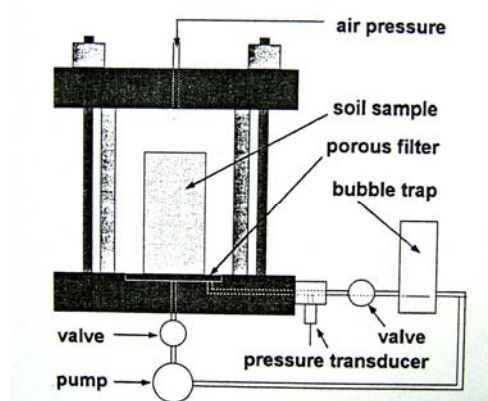


Figure I - 17. Appareil typique de plaque tensiométrique (Ridley & Wray 1995)

On place l'échantillon de sol sous pression et on attend qu'il se mette à l'équilibre. Des mouvements d'eau entre le réservoir d'eau et l'échantillon de sol sont possibles, ce qui entraîne une légère variation de la valeur de succion de l'échantillon de sol. La valeur de la succion est déduite de la différence entre la pression d'air dans l'enceinte et la pression d'eau

dans le réservoir. Si le réservoir d'eau est placé toujours sous pression atmosphérique la valeur de la succion de l'échantillon de sol est égale à la valeur de pression d'air appliquée.

Quand l'équilibre est atteint, on arrête et on remet à zéro la pression, on sort l'échantillon de l'enceinte pour déterminer sa teneur en eau. Le temps d'équilibrage dépend de la taille de l'échantillon, des dimensions de l'enceinte, et des perméabilités du sol et de la pierre poreuse céramique. Si la valeur de pression d'air appliquée est inférieure à la valeur du point d'entrée d'air de la céramique, l'air ne peut pas pénétrer dans la pierre céramique. Cependant pour de longues périodes de mesures et une différence de pression importante entre l'enceinte et le réservoir d'eau, il est possible que l'air arrive dans le réservoir d'eau par un phénomène de diffusion.

L'utilisation de l'air comprimé pour amener la pression négative de pores à une valeur au-dessus de la pression atmosphérique est connue comme "la technique de translation des axes". Cette méthode comporte quelques limites. D'abord, c'est une méthode indirecte et sa validité n'a pas encore été évaluée d'une manière satisfaisante. L'évaporation de l'eau de sol tout au long de la surface de l'échantillon, sous pression atmosphérique, peut mener à des résultats imprécis (Romero 2001). Cette méthode de translation d'axe est difficile à utiliser pour les argiles limoneuses et les argiles. De plus, l'expérimentation dans la gamme de degrés de saturation élevés est problématique, car la phase air est discontinue dans l'espace poreux du sol (Tarantino 2003).

1.3.2.2 Technique de contrôle osmotique

La technique osmotique provient de la biologie, où elle est utilisée en particulier pour les dialyses. Développé au Cermes depuis plusieurs années (Delage 1991), elle est basée sur l'utilisation de membranes (de dialyse) semi-perméables et d'une solution aqueuse de molécules organiques de polyéthylène glycol (PEG) de grande taille, constituées de longues chaînes de radicaux éthyle (C_2H_4), ce qui leur confèrent une masse molaire considérable (pouvant aller de 1000 à 20000).

Comme l'eau peut traverser la membrane alors que les molécules de PEG en solution ne le peuvent pas du fait de leur grande taille, un échantillon mis au contact d'une membrane

semi-perméable derrière laquelle circule une solution de PEG, est soumis à une succion osmotique d'autant plus forte que la concentration en PEG est élevée. Le graphique de la Figure I - 18 a regroupe les essais effectués par divers chercheurs sur des PEG de 6000 à 20000, et les essais d'extension à forte succion (12 MPa) sur des PEG de 1500, 4000, 6000 et 20000.

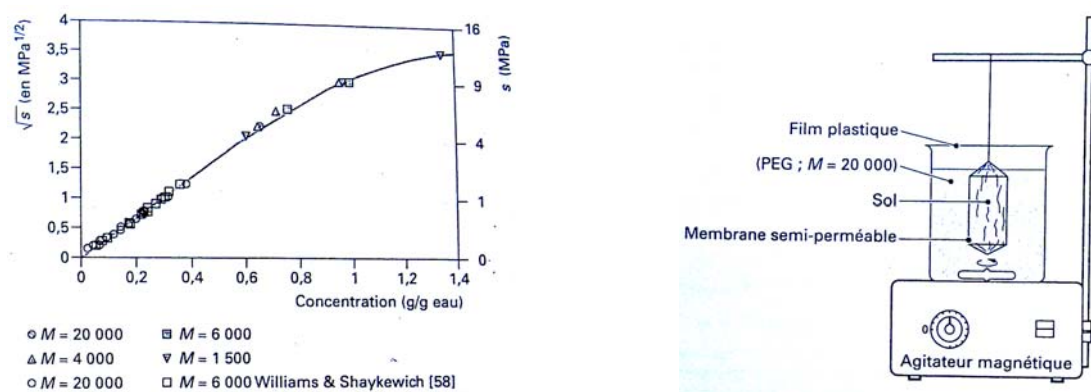


Figure I - 18. a) Relation succion – concentration ; b) Mise en œuvre de la technique osmotique (Delage & Cui 2000)

On observe une excellente compatibilité entre toutes les données et une relation unique qui est indépendante de la masse molaire, entre la concentration et la succion. Pour les succions inférieures à 6,25 MPa ($\sqrt{s} < 2,5$), la relation est linéaire et prend la forme simple suivante :

$$s = 11 c^2 \quad (I - 16)$$

L'échantillon entouré d'une membrane osmotique cylindrique est placé dans un bain de solution de PEG posé sur un agitateur magnétique (Figure I - 18 b). Des élastiques placés autour de l'échantillon de sol assurent un bon contact entre le sol et la membrane. Les transferts d'eau se font au travers de la membrane.

Le temps d'équilibrage dépend du type de sol, de la concentration et de la taille de l'échantillon. Une fois l'équilibre atteint, on extrait l'échantillon pour le peser et en déterminer la teneur en eau. On répète la procédure en passant au palier de succion appliquée suivant. On fait attention de maintenir la concentration constante au cours des échanges, car elle peut varier légèrement (évaporation, pertes). Avec cette technique on génère directement une succion positive et la pression d'air reste égale à la pression atmosphérique.

1.3.2.3 *Technique de contrôle par phase vapeur*

Cette technique basée sur la loi de Kelvin, qui consiste à placer un échantillon dans une atmosphère confinée à humidité contrôlée dans un dessiccateur. Les transferts d'eau s'effectuent sous phase vapeur jusqu'à l'équilibre, ce qui est assez long. Elle dépend de la taille de l'échantillon et de la valeur de la succion imposée (trois semaines en moyenne pour des échantillons d'argile verte). On peut faire avancer les échanges par phase vapeur en utilisant une pompe pneumatique qui fait circuler plus rapidement l'air dans l'atmosphère confinée. L'humidité relative peut être imposée en plaçant dans le dessiccateur une solution d'acide sulfurique à concentration donnée, ou une solution saline saturée (Figure I - 19).

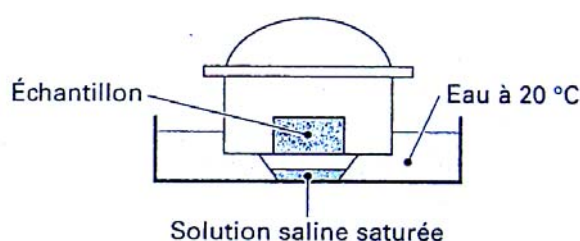


Figure I - 19. Contrôle de succion par phase vapeur (Delage & Cui 2000)

Il est préférable d'utiliser cette technique en conditions de température contrôlée à 20 °C. Pour cette raison on place souvent l'ensemble dessiccateur et la solution saline saturée dans un bain qui reste à une température constante de 20°C. L'inconvénient principal est la lenteur des échanges par phase vapeur, même avec l'aide d'une pompe pneumatique. Il faut éliminer la condensation de gouttes d'eau se formant sur les parois du dessiccateur car elles peuvent tomber sur les échantillons retardant de cette façon l'état d'équilibre. On trouve dans le Tableau I - 4 la valeur de succion obtenue avec différents sels (Delage & Cui 2000).

Sel	Succion (MPa)	Humidité relative (%)
K ₂ SO ₄	4,2	97
ZnSO ₄ , 7H ₂ O	12,6	91,3
(NH ₄) ₂ SO ₄	29	81
NaCl	37,8	76
NaNO ₂	57,3	66
Mg(NO ₃) ₂	82,4	55
K ₂ CO ₃	137,8	44
KCH ₃ CO ₂	182,1	20
KOH	331,9	9

Tableau I - 4. Relation humidité relative - succion (Delage & Cui 2000)

1.3.2.4 *Méthode du papier filtre*

Cette méthode permet d’obtenir une relation succion – teneur en eau semblable à celle de la courbe de rétention. La méthode a été réalisée d’abord par Gardner (1937) et en 1993 elle a été acceptée par ASTM comme une méthode standard de mesure de la succion du sol. Il existe deux types de papier filtre : Whatman n°42 et Schleicher and Schuell n°589. La calibration de ces papiers filtres (mesure de la quantité d’eau absorbée) se fait en utilisant une autre technique connue comme celle du contrôle de la succion par phase vapeur ou par plaque tensiométrique. La relation succion – teneur en eau du papier filtre est bilinéaire avec un changement de pente à une teneur en eau proche de 47% pour le papier filtre Whatman n°42 et de 54% pour ce de Schleicher & Schuell n°589 (Figure I - 20).

Le papier filtre (de triple épaisseur), mis au milieu d’un échantillon de sol, absorbe l’humidité jusqu’à l’équilibre. Durant cette période l’échantillon est placé dans une atmosphère hermétique afin d’empêcher toute évaporation possible. Une moyenne des valeurs sur plusieurs échantillons permet d’affiner et de s’assurer des résultats obtenus. La quantité d’eau absorbée par le papier filtre doit être très petite afin qu’il n’y ait pas d’influence sur la succion de l’échantillon de sol. La connaissance de la teneur en eau et de la courbe de rétention d’eau permet d’accéder à la succion du papier-filtre et donc à celle du sol.

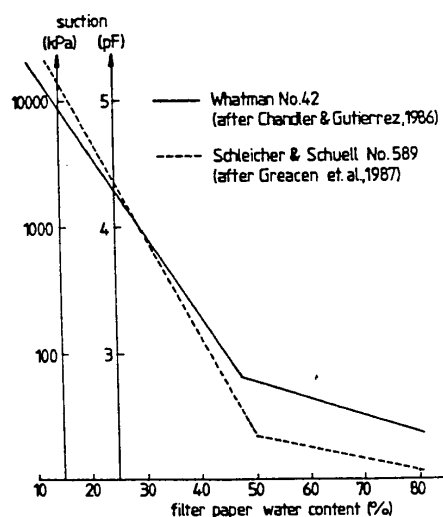


Figure I - 20. Courbes détalonnage des papiers filtre Whatman n°42 et Schleicher & Schuell n°589

1.3.2.5 *Mesure tensiométrique de la succion*

C'est la technique la plus simple et la plus répandue présentée dans la Figure I - 21 a :

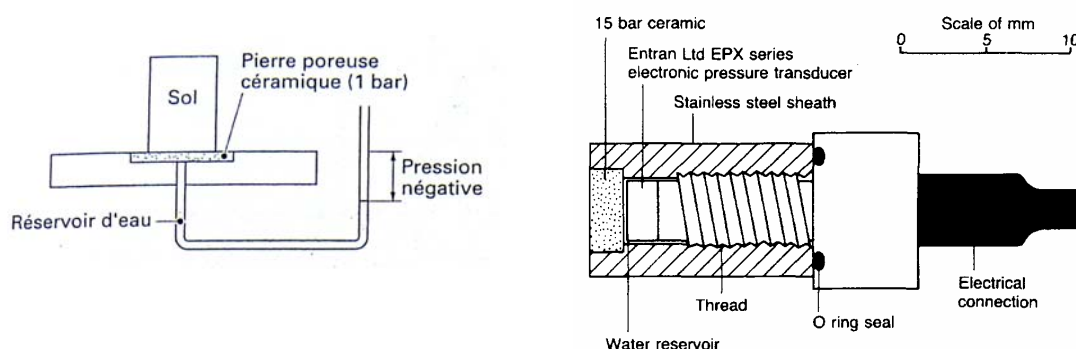


Figure I - 21. a) Mesure de la succion par tensiométrie (Delage & Cui 2000) ; b) Tensiomètre IC (Ridley & Burland 1993)

C'est une mesure de la pression négative de l'eau sous tension, analogue, dans son principe, à celle des pressions positives ; on utilise une pierre poreuse céramique fine, qui reste saturée à tout niveau de succion, et qui assure la continuité de l'eau entre le sol non saturé et la chambre du capteur, qui doit rester pleine d'eau. La parfaite saturation de la pierre céramique par de l'eau désaérée est une condition essentielle au bon fonctionnement d'un tensiomètre. Dans le cas d'un capteur de pression électronique, la déformation du diaphragme se fera vers l'extérieur. Il existe des tensiomètres à jauges de pression mécaniques avec cadran visuels, qui sont couramment employés pour la mesure de succions in situ inférieures à 80 kPa.

Cette limite classique de 80 kPa, due à l'apparition de la cavitation, a pu être repoussée à une valeur élevée de 1500 kPa dans le nouveau système tensiométrique (Figure I - 21 b) présenté par Ridley et Burland (1995). Le principe de ce capteur est de réduire l'épaisseur de la chambre d'eau à une valeur proche du millimètre ; cette petite épaisseur d'eau joue un rôle important en réduisant la probabilité de trouver un noyau d'air permettant l'initiation de la cavitation. L'intérêt majeur de cette extension est de permettre la mesure des succions dans l'intervalle entre la tensiométrie classique (0 – 80 kPa) et la psychrométrie (> 1 MPa). La partie 1.4 (Tensiomètre) est consacré à une explication plus détaillée des différents types de tensiomètres existant ainsi que leur mode de fonctionnement.

1.3.3 Courbe de rétention d'eau

Cette grandeur macroscopique demeure fondamentale car elle représente l'influence de la structure et de la porosité du sol à travers l'état de l'eau. Les variations de la succion en fonction de la teneur en eau sont représentées à l'aide d'une courbe appelée courbe de rétention d'eau (Figure I - 22). Cette courbe exprime la capacité du sol à attirer et/ou retenir l'eau en fonction de la succion exercée. Dans la nature les sols non saturés sont soumis au séchage et au remouillage, phénomènes qui se succèdent en fonction des conditions climatiques. Le séchage a pour effet de diminuer la teneur en eau et par conséquent d'augmenter la succion. Le remouillage, en revanche, entraîne une augmentation de la teneur en eau ou une diminution de la succion.

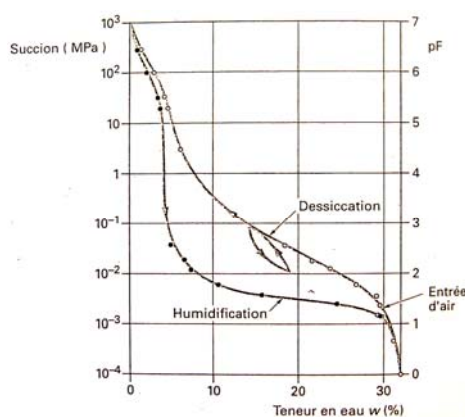


Figure I - 22. Courbe de rétention d'eau d'un sable argileux (Cronney 1952, d'après Delage & Cui 2002)

On obtient cette courbe de rétention de l'eau du sol soit par drainage dans le cas où on sèche progressivement un sol qui est initialement dans un état saturé, soit par mouillage dans le cas où on humidifie un sol qui est initialement dans un état sec. La première est appelée courbe de dessiccation et la deuxième courbe d'humidification. Dans un graphique ($s-\theta$, θ est la teneur en eau volumique du sol) la courbe de dessiccation se trouve au-dessus de la courbe d'humidification. La notion de courbe de rétention est liée au fait qu'on peut avoir plusieurs courbes de rétention. Tout dépend de la manière dont on obtient la courbe de rétention donc du chemin parcouru (mouillage ou humidification) et de l'état initial. Le phénomène d'hystérésis est lié à la morphologie du réseau des pores et à une variation de l'angle de mouillage en fonction du processus d'humidification ou de dessiccation.

L'hystérésis des courbes de rétention d'eau fait qu'il n'existe pas de relation biunivoque entre la succion et la teneur en eau d'un sol non saturé (Delage & Cui 2000). La zone comprise entre les deux courbes de séchage et de remouillage peut être atteinte en appliquant, par exemple, une diminution de succion, à partir d'un point de la courbe de séchage, ou une augmentation de succion à partir de la courbe de remouillage. Ces situations sont très fréquentes à l'état naturel pour des massifs soumis aux cycles d'humidité climatiques, avec un ensemble de points localisés quelque part entre les deux courbes.

1.3.3.1 Formulations mathématiques utilisées pour la courbe de rétention

On trouve différentes expressions mathématiques de la courbe de rétention qui aident dans le processus des modélisations numériques. Il faut bien garder à l'esprit que ces expressions qui sont utilisées dans des codes de calcul sont souvent liées au contexte ou à une courbe particulière qu'on cherche à modéliser. Actuellement il existe de nombreux modèles du comportement hydrique des sols non saturés. Leong et Rahardjo (1997) les ont divisées en trois catégories (Tableau I - 5).

Equations avec deux paramètres (a et b)	
$\ln s = a + b \ln \theta_w$	Williams et al. (1983)
Equations avec trois paramètres (a, b, c ou θ_r)	
$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + a s^b}$	Gardner (1958)
$\theta_w = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{a}{s}\right)^b$	Brooks & Corey (1964)
$\theta_w = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \exp\left(-\frac{a-s}{b}\right)$	McKee & Bumb (1984)
$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \exp\left(\frac{s-a}{b}\right)}$	McKee & Bumb (1987)
$\theta_w = \frac{\theta_s}{[\ln(e + (\frac{s}{a})^b)]^c}$	Fredlund & Xing (1994)

Equations avec 4 paramètres (a, b, c et θ_r)	
$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + as^b)^c}$	Van Genuchten (1980)
$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[\ln(e + (\frac{s}{a})^b)]^c}$	Fredlund & Xing (1994)
Où s est la succion ; a , b , et c , sont les paramètres liés aux propriétés du sol, θ_s est la teneur en eau saturée et θ_r est la teneur en eau résiduelle, e = exp. (1)	

Tableau I - 5. Différentes expressions de la courbe de rétention (Leong & Rahardjo 1997)

1.3.4 Transferts de fluides dans les sols non saturés

On aborde dans cette partie des transferts en phase liquide et en phase vapeur en donnant quelques définitions et quelques équations de bases utilisées dans les deux cas.

1.3.4.1 Equations de transfert en phase liquide

Dans le sol en tant que système poreux, l'eau s'écoule sous l'effet du gradient hydraulique. On peut définir la perméabilité comme l'aptitude que possède un sol à laisser passer l'eau.

La loi de Darcy s'applique aux milieux poreux non saturés indéformables pour les transferts en phase liquide, en prenant en compte un coefficient de perméabilité **k**, variable en fonction de la teneur en eau volumique θ (Delage et Cui, 2000) :

$$\vec{v} = -k(\theta) \vec{grad} h \quad (I - 17)$$

Où **h** la charge hydraulique est donnée en fonction du potentiel d'eau par l'expression :

$$h = \frac{-s}{\gamma_w} + z \quad (I - 18)$$

Où **s** est la succion non osmotique.

A la différence des sols saturés, dans les sols non saturés indéformables il peut y avoir un changement de teneur en eau locale par infiltration ou séchage, et donc inégalité des quantités d'eau entrantes et sortantes. Dans ce cas l'équation de continuité s'écrit :

$$\operatorname{div} \vec{v} = - \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (\text{I} - 19)$$

Où le terme $\partial\theta/\partial t$ décrit les variations locales de la teneur en eau en fonction du temps que ce soit pendant le drainage ou l'infiltration.

En reportant l'expression de la vitesse d'écoulement de Darcy dans l'équation de continuité, on obtient l'équation de Richards qui décrit les écoulements dans un milieu non saturé :

$$\operatorname{div}[-k(\theta) \vec{\operatorname{grad}} h] = - \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (\text{I} - 20)$$

Ce qui donne après transformations :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \operatorname{div}[k(\theta) \vec{\operatorname{grad}} \theta] + \frac{\partial k(\theta)}{\partial z} \quad (\text{I} - 21)$$

Cette équation est non linéaire car k est fonction de la teneur en eau. Elle montre que l'écoulement dans un milieu non saturé dépend des variations de la perméabilité en fonction de la teneur en eau et de la courbe de rétention d'eau car $\partial h/\partial \theta$ est la pente de cette courbe à une teneur en eau θ donnée.

Les propriétés de transfert en phase liquide des sols non saturés sont définies par un paramètre global – la diffusivité $D(\theta)$ – qui est fonction de la perméabilité et des propriétés de rétention d'eau :

$$D(\theta) = k(\theta) \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (\text{I} - 22)$$

Dans ce cas l'équation de Richards prend sa forme la plus courante :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \operatorname{div}[D(\theta) \vec{\operatorname{grad}} \theta] + \frac{\partial k(\theta)}{\partial z} \quad (\text{I} - 23)$$

1.3.4.2 Equations de transfert en phase gazeuse

La diffusion de la vapeur dans l'air libre est décrite par la loi de Fick. Le coefficient de diffusion est proportionnel à la vitesse moyenne des molécules et à leur libre parcours moyen. Il dépend donc de la température et de la pression totale. En milieu poreux, la diffusion est affectée par la section de passage disponible et par les effets de tortuosité.

Le transfert de la vapeur dans un sol non saturé peut être décrit par l'équation suivante (Delage et Cui 2000) :

$$q_v = -D_o \nu \alpha a \nabla \rho_v \quad (\text{I} - 24)$$

Où :

- q_v : le flux de la vapeur d'eau (kg/(m²s)) ;
- D_o : la diffusivité moléculaire de la vapeur d'eau dans l'air (m²/s) ;
- ν : le facteur d'écoulement de masse : $\nu = P_g / (P_g - P_v)$;
- P_g, P_v : respectivement la pression de gaz et la pression partielle de la vapeur d'eau ;
- a : la porosité pour l'air : $a = n (1 - S_r)$;
- α : la tortuosité ;
- ρ_v : la masse volumique de la vapeur d'eau.

Pour D_o on utilise l'expression proposée par Kricher et al. (1940) :

$$D_o = \frac{2,44 \times 10^{-5}}{P_g} \left(\frac{T}{273} \right)^{2,3} \quad (\text{I} - 25)$$

T : la température thermodynamique

En condition isotherme, la masse volumique de la vapeur est définie par l'humidité relative h qui est fonction de la teneur en eau volumique θ :

$$\rho_v = \rho_0 h(\theta) \quad (\text{I} - 26)$$

ρ : la masse volumique de la vapeur d'eau saturante ($h = 100\%$)

En reportant l'expression proposée par Kricher dans l'équation du transfert de la vapeur dans un sol non saturé on obtient :

$$q_v = -D_o \nu \alpha a \frac{\partial h}{\partial \theta} \nabla \theta \quad (\text{I} - 27)$$

Cette équation exprimée en vitesse d'écoulement v prend la forme :

$$v = \frac{q_v}{\rho_w} = \frac{D_o}{\rho_w} \nu \alpha a \frac{dh}{d\theta} \nabla \theta \quad (\text{I} - 28)$$

1.3.5 Mesure de perméabilité

Les mesures de perméabilité hydraulique de sols non saturés sont délicates et peu répandues. On peut distinguer trois type de méthodes existantes (Delage, 1988, 1999, Delage et Cui, 2000). La première méthode consiste (en régime permanent, pour la

perméabilité à l'eau et à l'air) à imposer un gradient constant dans un échantillon où une valeur connue et tenue constante de la succion est appliquée. Le travail consiste à mesurer le débit d'eau traversant l'échantillon. La mise en œuvre de cette méthode est difficile, car la mesure est sensible aux fuites et aux variations de la température.

La méthode de Gardner (pour la perméabilité à l'eau) est basée sur la cellule de Richards. Les valeurs de perméabilité sont déduites des variations de la quantité d'eau sortant de l'appareil lorsqu'on applique une augmentation de la pression d'air.

La méthode du profil instantané consiste à suivre l'évolution de la succion au sein d'une colonne de sol. On présente plus en détail cette méthode dans le paragraphe 1.3.5.1.

1.3.5.1 Méthode du profil instantané pour la perméabilité à l'eau

Cette méthode consiste à suivre les variations de la succion lors d'une infiltration dans une colonne (Delage & Cui 2000). La succion peut être mesurée soit en utilisant des tensiomètres soit des psychromètres. La détermination des courbes de rétention d'eau permet de déduire les profils de teneur en eau. La Figure I - 23 a, b présente des isochrones de succion et de teneur en eau, obtenues avec une infiltration à débit injecté constant (Daniel 1982).

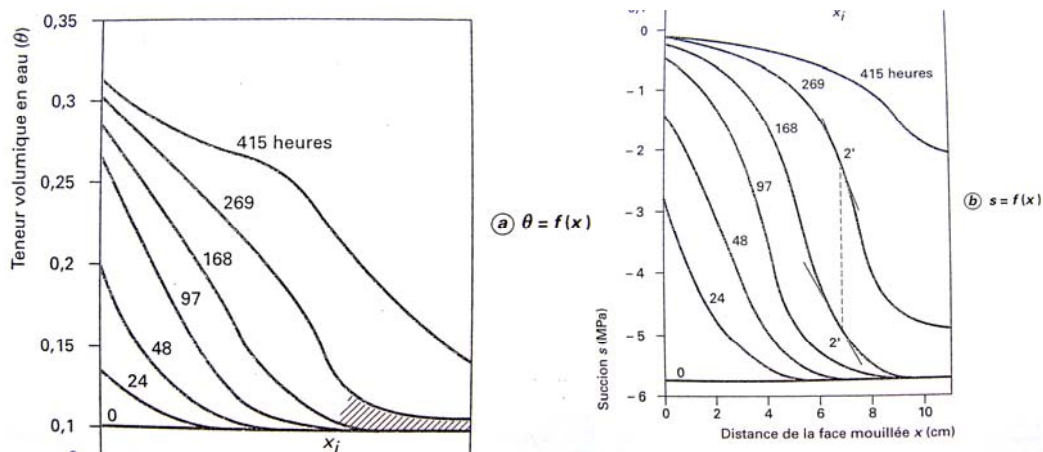


Figure I - 23. a) Isochrones de la succion ; b) Isochrones de la teneur en eau au cours de l'infiltration (Daniel 1982, d'après Delage & Cui 2000)

Pour un temps t donné, la détermination de la tangente d'une isochrone de succion (Figure I - 23 b) donne en chaque point le gradient hydraulique $i = \partial s / \partial x$.

Le volume d'eau passé entre deux instants en un point donné est déduit de la différence entre les isochrones de teneur en eau correspondant à ces deux instants, représentée par la zone hachurée sur la Figure I - 23 a. On exprime le volume d'eau V passé à une distance x_i du point d'injection au travers de la surface A de la colonne, entre les instants t et $t + \Delta t$:

$$V = A \left(\int_{x_i}^L \theta_{t+\Delta t} dx - \int_{x_i}^L \theta_t dx \right) \quad (\text{I} - 29)$$

Le débit q entre les instants de temps t et $t + \Delta t$ est calculé par :

$$q = A \frac{\int_{x_i}^L \theta_{t+\Delta t} dx - \int_{x_i}^L \theta_t dx}{\Delta t} \quad (\text{I} - 30)$$

La perméabilité est déduite du rapport entre le débit et le gradient (on considère une valeur moyenne du gradient entre deux instants pris en compte) :

$$k = \frac{1}{A} \frac{q}{0,5(i_t + i_{t+\Delta t})} \quad (\text{I} - 31)$$

La difficulté de cette méthode est liée à la mesure de la succion par psychrométrie, dans le cas des argiles. D'où l'intérêt d'utiliser des capteurs tensiométriques fiables qui mesurent directement la succion et qui peuvent fournir à tout instant une information complète et un suivi continu dans le temps. Il est important de noter que leur mise en place doit être effectuée avec beaucoup de précautions de façon à éviter les problèmes de cavitation. L'avantage de ces capteurs est qu'une fois mis en place leur réponse est instantanée et ils ne demandent pas de précautions particulières.

1.3.5.2 Différentes formulations pour le coefficient de perméabilité

La connaissance de la dépendance du coefficient de perméabilité de sol vis-à-vis de sa teneur en eau volumique (θ) et de sa succion (s) est nécessaire de façon à pouvoir résoudre les équations de transfert. Les données nécessaires pour représenter les propriétés hydrauliques et leur variation spatio-temporelle dans un site quelconque sont nombreuses et il est difficile voire impossible de les acquérir toutes expérimentalement. De ce fait on a intérêt d'utiliser soit des relations empiriques, soit des modèles macroscopiques et statistiques décrivant la variation de la perméabilité à l'eau avec la succion ou la teneur en eau. On présente dans le Tableau I - 6 les différentes fonctions proposées par plusieurs auteurs :

Equations	Paramètres	Auteur concerné
$k(s) = k_s \cdot \exp(\alpha s)$ $k(s) = \frac{a}{(b + s^m)}$ $k(s) = \frac{k_s}{(1 + s/s_m)}$	α : constante, dépend de la nature du sol ; a, b et m : constantes empiriques s_m : succion matricielle pour laquelle $k=0,5k_s$	Gardner (1958) Gardner (1970)
$k(\theta) = k_s \cdot \sqrt{\Theta} [1 - (1 - \Theta^{1/m})^m]^2$ avec $\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$	m : est une constante empirique	Van Genuchten & Mualem (1980)
$k(\theta) = k_s \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\beta$	β : paramètre d'ajustement	Campbell & Brooks & Corey (1980)
$k_w = k_s [(S - S_r)/(1 - S_r)]^3$ $k_w = k_s [(S - S_r)/(1 - S_r)]^4$	S : degré de saturation S_r : degré de saturation résiduelle	Irmay (1954) Corey (1957)
$k_w = k_s [1 - n(1 - S_r)]$	n : porosité	Scott (1963)
$k_w = k_s (S_r)^n$	n : constant	Brutsaert (1968)
$k_w = k_s (S_e)^n [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2$	n, m : des constantes S_e : saturation effective	Nielsen et al (1986)
Où : s est la succion, θ_s est la teneur en eau dans les conditions saturées et θ_r est la teneur en eau résiduelle, k_s est la perméabilité dans les conditions saturées		

Tableau I - 6. Expressions mathématiques du coefficient de perméabilité (Cui 1996)

1.4 Tensiomètre

La succion matricielle est une variable clef dans l'analyse du comportement hydromécanique des sols non saturés. Sa mesure expérimentalement représente un aspect fondamental de la mécanique des sols non saturés. Dans le laboratoire, la succion est souvent mesurée par les méthodes décrites dans la partie 1.3.2 parmi lesquelles la technique tensiométrique semble être la plus prometteuse en raison de sa facilité de mise en place.

Les tensiomètres haute succion ont été d'abord développés par Ridley & Burland (1993, 1995). Ces types de capteurs ont été utilisés aussi bien au laboratoire qu'in situ (Dineen & Burland 1995, Ridley & Burland 1996, Ridley et al. 1997, Dineen et al. 1999, Tarantino et al. 2000, Tarantino & Mongiovi 2000 et 2002). D'autres tensiomètres ont été aussi développés à l'Université de Saskatchewan (Guan & Fredlund 1997), au M.I.T de Boston (Sjoblom 2000, Toker et al. 2003).

1.4.1 Mode de fonctionnement d'un tensiomètre type

On mesure avec cette technique la succion en utilisant une pierre poreuse céramique fine. Cette pierre poreuse doit rester impérativement saturée pour toute valeur mesurée de succion (jusqu'à la valeur d'entrée d'air dans la pierre poreuse céramique) et assurer ainsi la continuité de l'eau entre l'échantillon et la minuscule chambre d'eau du capteur (qui est toujours pleine d'eau au cours des mesures). Un élément essentiel du bon fonctionnement de tensiomètre est la bonne saturation de la pierre poreuse céramique avec de l'eau désaérée et déminéralisée.

1.4.1.1 Exigences pour construire un tensiomètre fiable

Le bon fonctionnement d'un tensiomètre exige :

- ⇒ le bon dimensionnement du tensiomètre ;
- ⇒ une bonne première saturation de la pierre poreuse céramique ;
- ⇒ le respect des procédures d'utilisation.

1.4.1.1.1 Bon dimensionnement du tensiomètre

Le bon fonctionnement d'un tensiomètre dépend de quelques éléments clés tels que : le corps du tensiomètre ; la taille du réservoir d'eau ; l'épaisseur du diaphragme ; la colle utilisée.

Il est préférable de réaliser le corps du tensiomètre sous forme d'un monobloc afin d'assurer une meilleure rigidité de l'appareil et aussi une meilleure performance mécanique pour le diaphragme qui joue le rôle principal dans la mesure (Ridley & Burland 1999).

Selon Ridley & Burland l'un des éléments clefs dans la performance du tensiomètre est le réservoir d'eau d'une dimension réduite. La réduction de la masse d'eau libre dans l'instrument réduirait le nombre de noyaux d'air dans le réservoir d'eau et donc la probabilité de cavitation. De ce fait il est préférable d'avoir des tensiomètres de petites dimensions. Récemment d'autres auteurs ont supposé que la cavitation a lieu dans la pierre poreuse céramique plutôt que dans le réservoir d'eau (Tarantino & Mongiovì 2001). S'il en est ainsi la taille du réservoir d'eau ne serait pas un facteur critique. Néanmoins, il est commode et souhaitable de tenir le réservoir d'eau le plus petit possible.

Concernant l'épaisseur du diaphragme, il doit assurer une élasticité parfaite de façon à éliminer les déformations irréversibles, qui peuvent mettre en cause le bon fonctionnement du tensiomètre. La colle est aussi un facteur important ; elle doit assurer l'étanchéité de l'appareil à long terme dans un environnement humide.

1.4.1.1.2 Première saturation de la pierre poreuse céramique

La première saturation joue un rôle important pour le fonctionnement d'un tensiomètre. La pierre céramique est d'abord assemblée et collée à sec dans la section supérieure. Elle est ensuite mise sous vide, inondée progressivement sous l'effet du vide avec de l'eau désaérée et déminéralisée. La saturation est finalement complétée en appliquant une pression de 4 MPa pendant au moins 24 h.

Il est préférable de faire quelques cycles cavitation – saturation au début de l'utilisation du tensiomètre. Un tel cycle dure au minimum 24 heures entre la saturation, la mesure qui peut

prendre quelques heures et l'application du vide qui prend aussi quelques heures. Il semble que ces cycles augment sensiblement la performance du tensiomètre et augmentent la durée de vie du tensiomètre. Une mauvaise saturation signifie par la suite une perte sensible de la performance. Une fois saturé, le tensiomètre est prêt pour l'utilisation.

1.4.1.1.3 Respect des procédures d'utilisation

Pour chaque utilisation du tensiomètre les procédures expérimentales demandent un suivi à la lettre. Une mauvaise manipulation du tensiomètre par l'utilisateur pourrait entraîner une perte partielle de sa performance et cette perte est irréversible. On est obligé alors de recommencer la procédure par la première saturation. Une mauvaise saturation peut amener à des résultats imprécis qui pourraient être difficiles à détecter.

1.4.1.2 *Mesure*

Quand la pierre poreuse céramique est placée en contact avec le sol non saturé, l'eau est tirée du réservoir et le diaphragme de mesure se courbe vers la pierre céramique (Figure I - 24). La contrainte (la pression négative ou la succion du sol) appliquée au diaphragme par l'eau du sol est mesurée à l'aide des jauges de déformation collées derrière le diaphragme. L'eau dans le réservoir et la céramique peut rester sous tension à cause du ménisque qui se forme à l'interface céramique – sol (Figure I - 24). Celui-ci supporte la différence entre la pression atmosphérique et la pression négative d'eau du réservoir.

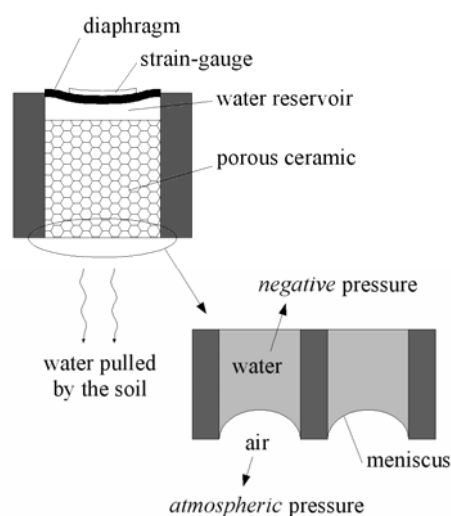


Figure I - 24. Mesure de la succion de sol (Tarantino 2003)

La valeur de pression stable la plus élevée dépend de la courbure maximale du ménisque, qui dépend à son tour de la taille des pores de la pierre céramique. La valeur maximale de pression stable est connue comme la valeur d'entrée d'air de la céramique et elle limite la valeur maximale de la succion qu'on peut mesurer.

Des valeurs de succion inférieures à la valeur d'entrée d'air peuvent être supportées par la céramique, mais pas infiniment dans le temps (Figure I - 25). L'eau sous tension est dans un état métastable et la cavitation arrivera inévitablement après un certain temps. Donc le problème clef de ce type de mesure n'est pas d'en empêcher mais de retarder la cavitation.

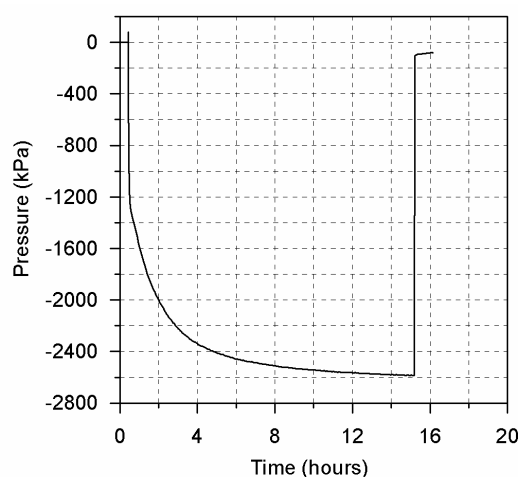


Figure I - 25. Graphique-type de mesure de succion (Tarantino 2003)

1.4.1.3 Précision de mesure

Une étude sur la précision de mesure et les procédures expérimentales a été aussi réalisée par Tarantino & Mongiovi 2001 en utilisant des tensiomètres développés à l'Impérial Collège. Elle a montré une performance excellente du capteur, qui atteste d'une bonne saturation. La précision de mesure est de ± 5 kPa, la durée de mesure généralement de plusieurs jours pour des tensions d'eau de moins de 1,5 MPa.

Concernant la gamme de mesure, le tensiomètre pourrait mesurer des tensions d'eau plus grandes que 1,5 MPa, mais pendant des périodes courtes. La valeur maximale de la succion enregistrée par le tensiomètre est d'environ 3 MPa. On peut ainsi conclure que le tensiomètre d'IC peut servir comme référence dans la conception et la fabrication d'un tensiomètre à la fois fiable et capable de mesurer des succions comprises entre 0 et 1,5 MPa.

1.4.1.4 Vérification d'étalonnage

La plus grande limitation des tensiomètres présentés dans la littérature est l'étalonnage. Normalement il est effectué dans la gamme positive et extrapolé dans la gamme négative en supposant une réponse symétrique du diaphragme de mesure. Cette supposition peut être une source d'inexactitude de mesure.

Une étude récente à l'Université de Trento (Tarantino 2003) a permis de faire un étalonnage direct dans la gamme négative. Le tensiomètre de Trento permet l'étalonnage direct dans la gamme des valeurs négatives de pression d'eau. Cet étalonnage est réalisé en augmentant la pression d'air à l'arrière du diaphragme du tensiomètre en tenant le front du diaphragme à la pression atmosphérique. On montre une vue schématique du dispositif d'étalonnage dans la Figure I - 26.

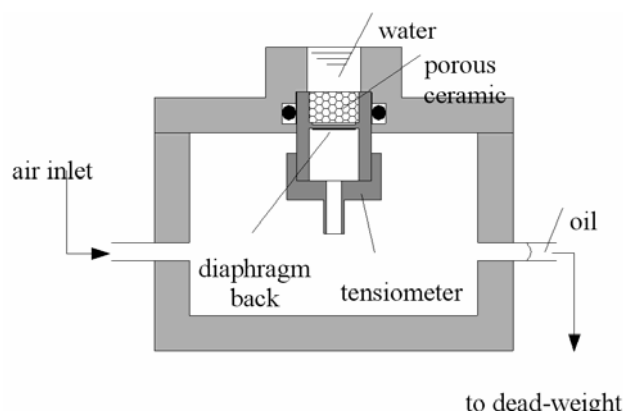


Figure I - 26. Etalonnage du tensiomètre dans la gamme négative (Tarantino 2003)

Le tensiomètre est placé dans la chambre de sorte que le dos de son diaphragme soit soumis à la même pression d'air que dans la chambre. Le tensiomètre est déchargé de son câble électrique. Quand la pression d'air dans la chambre est augmentée, le diaphragme est déformé dans la gamme "négative". La chambre est connectée à un dispositif d'étalonnage qui permet d'établir une relation entre les pressions d'air appliquées dans la chambre et la déformation du diaphragme.

La différence de mesure entre cette méthode et l'extrapolation est relativement petite donc il semble justifié d'utiliser la méthode d'étalonnage par extrapolation.

1.4.1.5 Problèmes constatés au cours du fonctionnement du tensiomètre

L'inconvénient principal de ces tensiomètres est la cavitation d'eau. Une conception spéciale et des procédures expérimentales exigeantes sont alors élaborées pour étendre la gamme de mesure au-delà de 100 kPa. Des problèmes peuvent résulter aussi de l'interface (la pierre poreuse céramique) qui a un point d'entrée d'air élevé de 1,5 MPa, empêchant l'air d'entrer à l'intérieur du tensiomètre et permettant à l'eau de supporter des tensions élevées (jusqu'à 1,5 MPa). Si la pierre céramique n'est pas bien saturée, elle peut mener à des résultats imprécis. On présente dans les paragraphes suivants les différents types de tensiomètres avec leurs principales caractéristiques et leurs particularités.

1.4.2 Conception initiale du tensiomètre d'Imperial College

Sur la Figure I - 27 on montre la conception initiale du tensiomètre développé à l'Imperial College par Ridley & Burland en 1993. Il consiste en un capteur de pression miniature qui est capable de supporter des hautes pressions négatives, une entrée d'air de la pierre poreuse de 1,5 MPa et une pièce adaptée autour du capteur qui porte la pierre. Un petit volume d'eau de 3 mm³ a été laissé entre la pierre et le diaphragme du capteur.

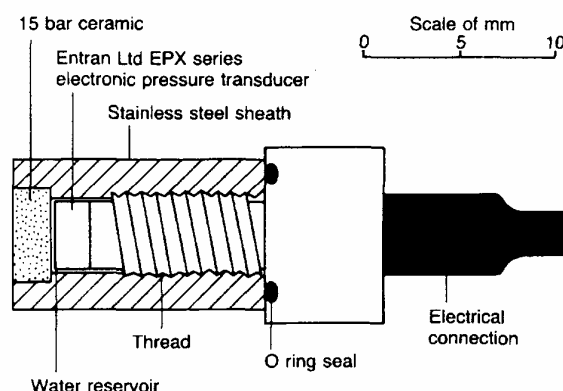


Figure I - 27. Conception initiale du tensiomètre d'Imperial College (Ridley & Burland 1993)

Ridley & Burland (1993) ont supposé que le vide entre la pierre poreuse et le diaphragme et la saturation de la pierre poreuse sous hautes pressions positives étaient les deux facteurs clés pour le bon fonctionnement du capteur. Ils ont laissé un vide de 0,25 mm entre la céramique et le diaphragme et ils ont saturé la pierre poreuse, initialement assemblée dans des conditions sèches en appliquant une pression d'environ 3,5 MPa. Cette valeur choisie est bien supérieure à la valeur d'entrée d'air de la pierre poreuse céramique.

Pour ce tensiomètre, la stabilité des mesures est maintenue sur une durée de 24 h maximum pour une valeur de succion d'environ 700 kPa. La valeur maximale de la succion enregistrée par ce premier tensiomètre était d'environ 1500 kPa. Cette conception a été abandonnée principalement à cause de la taille du réservoir d'eau qui ne permettait pas à la tension d'eau d'être maintenue sur un temps long.

1.4.3 Tensiomètre modifié d'Imperial College

Un nouveau tensiomètre a été conçu et fabriqué à l'Imperial College pour surmonter les problèmes constatés dans la première conception (Ridley & Burland 1995). Le corps du tensiomètre est formé de deux sections d'acier inoxydable (Figure I - 28). La section supérieure est usinée avec un diaphragme plat dans laquelle des jauges de déformation sont collées. Une pierre poreuse céramique de 1,5 MPa de point d'entrée d'air est collée dans la section supérieure et une petite dent d'acier assure un vide de 0,1 mm d'épaisseur entre la pierre et le diaphragme. Les performances mécaniques du diaphragme dans le nouveau montage ont permis de réduire davantage la taille du réservoir d'eau.

Dans la nouvelle conception, Ridley & Burland 1999 ont adopté une procédure différente pour la saturation initiale du tensiomètre. La pierre céramique initialement assemblée à sec dans la section supérieure a été d'abord mise sous vide et ensuite immergée progressivement dans de l'eau désaérée.

Avant de faire une mesure de succion, le tensiomètre a été saturé en appliquant une pression positive de 4 MPa pendant au moins 24 heures. Durant la mesure, une pâte saturée a été utilisée pour assurer un bon contact entre la pierre et le sol.

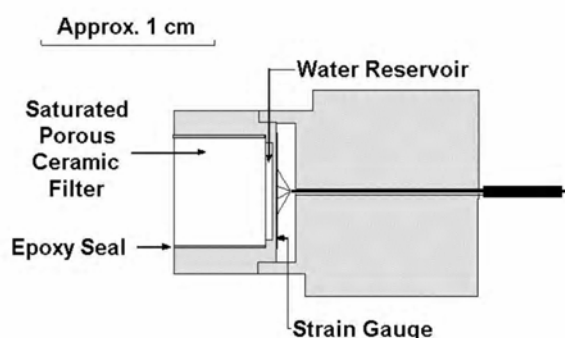


Figure I - 28. Version améliorée du tensiomètre d'Imperial College (Ridley & Burland 1995)

La nouvelle conception et la procédure de saturation initiale ont permis d'une part de mesurer de hautes succions durant un temps plus long et d'autre part, la valeur mesurée de la succion peut être supérieure au point d'entrée d'air de la pierre poreuse céramique.

La mesure peut durer plusieurs semaines pour des valeurs de succion au-dessous de 1000 – 1200 kPa (Ridley & Burland 1999, Tarantino & Mongiovi 2001). La tension durable maximale peut généralement dépasser 2000 kPa (Tarantino & Mongiovi 2001).

Avec un tensiomètre IC modifié, il a été possible de mesurer une valeur de tension d'eau jusqu'à environ 3000 kPa (Tarantino & Mongiovi 2002).

1.4.4 *Tensiomètre de Trento*

Le tensiomètre développé à l'Université de Trento (Tarantino & Mongiovi 2002) est très proche du tensiomètre de l'IC bien que quelques modifications aient été apportées à la conception (Figure I - 29). La section supérieure du tensiomètre a été prolongée afin que le diaphragme soit placé au milieu de la hauteur du corps d'acier inoxydable.

Cela assure une géométrie quasi-symétrique, qui peut être commode si l'étalonnage est exécuté dans la gamme positive et extrapolé dans la gamme négative. De plus, elle permet l'étalonnage direct dans la gamme négative. L'inconvénient d'une telle conception réside dans l'entreposage des jauges de déformation sur le diaphragme en bas du trou.

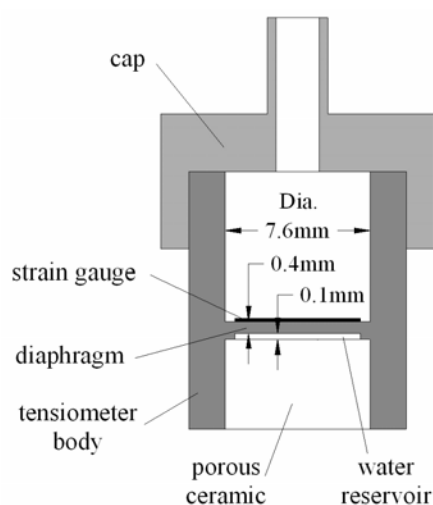


Figure I - 29. *Tensiomètre de Trento (Tarantino & Mongiovi 2002)*

La pièce inférieure est vissée et non collée sur la section supérieure pour donner une meilleure résistance à l'instrument de mesure. La performance du tensiomètre de TN (Trento) s'est révélée identique à celle du tensiomètre d'IC, ce qui n'est pas surprenant, car la conception est très proche.

Concernant la première saturation, la procédure est la même que celle utilisée pour le tensiomètre d'IC. La pierre poreuse céramique du tensiomètre est laissée sous vide pendant un certain temps et puis immergée progressivement dans de l'eau toujours sous vide. Le tensiomètre est saturé dans une chambre de saturation pendant au moins 24 heures.

1.4.5 Tensiomètre de Saskatchewan

Le tensiomètre développé à l'Université de Saskatchewan (Guan & Fredlund 1997) est similaire dans sa conception au premier prototype de l'Imperial College (Figure I - 30). Il consiste en un capteur de pression dans une gamme de valeurs élevées (c'est-à-dire 15 MPa) entouré d'une pièce d'acier inoxydable qui porte une pierre poreuse céramique (point d'entrée d'air de 1,5 MPa).

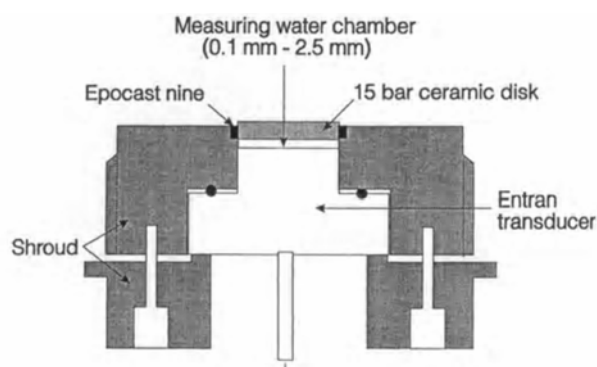


Figure I - 30. Tensiomètre de Saskatchewan (Guan & Fredlund 1997)

Les procédures de saturation initiale se différencient de manière nette de celles adoptées par Ridley & Burland (1999). La pierre poreuse céramique a été d'abord saturée avec de l'eau désaérée et montée ensuite sur le capteur en restant sous l'eau. La saturation a été obtenue en appliquant six cycles qui comprenaient l'application d'une pression positive de 12 MPa pour 1 heure, suivie d'une application d'une pression négative de -85 kPa pour 1 heure. Cette procédure a été définie sur la base d'une étude spécifique (Guan et al. 1998).

Avec ce tensiomètre, des durées de mesures relativement longues (environ 3 jours) ont été obtenues pour la succion au-dessous de 700 kPa. La valeur de succion maximale mesurée était 1200–1250 kPa. Cette performance ne diffère pas significativement de celle montrée par le premier prototype de l'Imperial College. C'est surtout sa conception basée sur une pièce scellée sur un capteur commercial qui ne semble pas être optimale.

La particularité du tensiomètre de Saskatchewan est que la valeur maximale de la tension d'eau enregistrée était bien au-dessous de la valeur d'entrée d'air de la pierre céramique, contrairement au premier tensiomètre IC avec lequel une valeur de tension d'eau supérieure à 1500 kPa pourrait être enregistrée. Cela pourrait être dû à une saturation inadéquate de la pierre poreuse céramique. La procédure qui consistait dans des cycles de pressions positifs et négatifs qui étaient maintenus pendant 1 h chacun ne semble pas être très efficace pour la suppression des noyaux d'air dans le tensiomètre.

1.4.6 Tensiomètre du MIT

Quelques tensiomètres ont été développés au MIT ces dernières années. On montre sur la Figure I - 31 le tensiomètre développé par Toker et al. (2003). Il est similaire au premier tensiomètre de l'Imperial College, avec une pièce d'acier qui embrasse un capteur de pression commercial. Un joint de cuivre a été utilisé pour fixer la pièce sur le capteur.

Le tensiomètre ne porte pas de céramique poreuse commerciale, mais une pierre fabriquée dans un laboratoire de recherche. La céramique montée sur le tensiomètre du MIT a une distribution de pores plus fine et une meilleure inter connectivité. L'avantage de cette céramique consiste en ce qu'elle n'exige pas de pressions de saturation élevées pour assurer des valeurs élevées de la succion mesurée.

Un tel tensiomètre équipé de cette céramique est capable de mesurer une valeur de tension d'eau jusqu'à 2200 kPa (Sjoblom 2000). L'inconvénient principal de cette céramique est sa courte durée de vie, car elle peut commencer à se rompre après un certain nombre d'essais. De plus elle présente une variabilité extrême de ces caractéristiques. Le tensiomètre montré

sur la Figure I - 31 peut mesurer une valeur de tension maximale d'eau d'environ 1300 kPa. Aucune mesure à long terme à forte succion n'a été présentée.

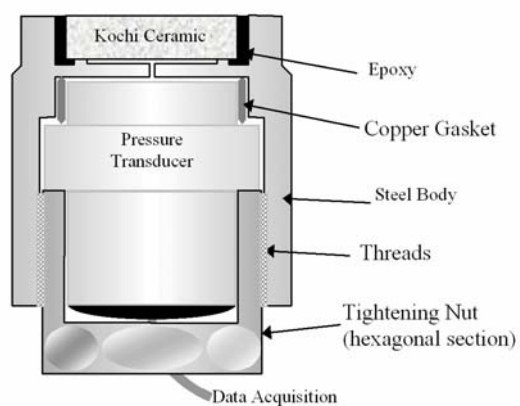


Figure I - 31. Tensiomètre du MIT (Toker et al. 2003)

1.5 Phénomène de cavitation

De nombreux auteurs mentionnent l'impossibilité de mesurer la pression au-dessous d'une atmosphère (Bishop & Blight, 1963 ; Bocking & Fredlund, 1980 ; Delage & Suraj de Silva, 1992 ; Fredlund & Rahardjo, 1993). On considère toujours que l'eau est le responsable de cet échec, puisque la cavitation est observée dans le système. Cette supposition est incorrecte, puisqu'il n'est pas généralement pris en compte que l'eau, ou des liquides en général, dans des conditions appropriées peuvent supporter de hautes pressions négatives.

La capacité des liquides de résister à la tension a été prouvée par la mesure directe de la tension (Meyer, 1911 ; Chapman et al, 1975, d'après Marinho & Chandler 1995). Cependant, la valeur théorique de la tension d'eau est très supérieure aux valeurs observées expérimentalement. Harvey et al. 1944 ont développé une théorie dans laquelle ils montrent que la cavitation se produit seulement quand des noyaux importants d'air ou du gaz sont présents. Autrement dit, la cavitation ne peut pas arriver si le système est sans noyau. Dans des applications de la mécanique de sol, il a été remarqué que l'eau interstitielle a la capacité de résister aux hautes pressions négatives (Skemton 1961 ; Bishop et al. 1975, d'après Marinho et Chandler 1995).

Quand une bulle (ou une cavité) est présente dans un liquide il y a deux modes d'expansion : lentement ou brusquement. L'agrandissement lent peut résulter de la diffusion de gaz dissous dans la cavité existante ; l'expansion brusque du gaz peut être due à l'élévation de température ou à la réduction de pression. Quand l'agrandissement de la cavité est brusque on a soit le phénomène de bouillonnement (élévation de température) soit le phénomène de cavitation (réduction de pression) (Knapp et al. 1970).

Pour les applications à la mécanique des sols, l'eau dont la tension doit être mesurée est dans les pores du sol. Cette situation exige l'utilisation d'une interface entre le système de mesure et l'eau de sol. Normalement l'interface utilisée est une pierre poreuse, qui peut faciliter les mesures de pression d'eau aussi bien positives que négatives.

Les tensiomètres d'Imperial College (Ridley & Burland 1993, 1995) ont permis d'élargir la gamme de mesure jusqu'à une valeur de succion proche de 2 MPa. On estime que le petit volume d'eau et la taille réduite du réservoir d'eau joue un rôle essentiel (1.4.1.1.1).

1.5.1 Eau sous tension

La mesure de succion du sol avec un tensiomètre exige que l'eau à l'intérieur du système de mesure soit à la même valeur de pression que l'eau des pores de sol et cela peut inciter la cavitation à l'intérieur du système. Pendant la mesure de succion du sol, la cavitation est le résultat de la réduction de pression. L'effet immédiat est que, après l'arrivée de la cavitation, la pression mesurée sera approximativement égale à la pression du gaz dans le système. C'est probablement ce constat qui a conduit à dire qu'il est impossible de mesurer des succions plus grandes que 1 atm.

La cavitation dans un liquide métastable peut résulter de deux types de nucléation : la nucléation dans le liquide pur et la nucléation causée par les impuretés dans le liquide. Les impuretés peuvent être d'autres substances pures, des impuretés solides, ou même la radiation agissant sur le liquide. La nucléation dans un liquide pur est appelée nucléation "homogène" et la nucléation en raison des impuretés est appelé nucléation "hétérogène". C'est la nucléation hétérogène qui est la plus connue comme agent responsable de la cavitation (Marinho & Chandler 1995).

La différence entre les valeurs théoriques de la force de tension d'eau et les valeurs mesurées a conduit au développement du modèle de crevasse (Harvey et al. 1944). Cette théorie montre que la cavitation est déclenchée au niveau de la paroi du réservoir (la perte d'adhérence) et pas dans le corps du liquide (la perte de cohésion).

Si la cavitation provient d'une bulle macroscopique d'air, on dit que cette bulle est "stabilisée". La stabilisation empêche la bulle de se déplacer ou de se dissoudre en raison de la tension superficielle. Le gaz ou des bulles de vapeur peuvent être stabilisés dans un liquide seulement dans des conditions très spéciales. La bulle stabilisée est appelée un noyau de cavitation.

On peut citer quatre théories qui permettent d'expliquer la présence des noyaux de cavitation dans un système qui contient de l'eau (d'après Marinho & Chandler 1995) :

1. Il peut y avoir des particules solides dans l'eau avec, le gaz pris au piège dans des crevasses contenues dans ces particules (Apfel 1970) ;

2. Le gaz peut être pris au piège dans des crevasses minuscules sur la paroi du réservoir (Harvey et al. 1944) ;
3. Les bulles d'air peuvent être stabilisées par une « peau » ionique qui existe entre le gaz et le liquide (Akulichev 1966) ;
4. Les bulles peuvent être couvertes par des substances de surfaces actives et sont ainsi préservées de la dissolution (Yount 1979). On considère que les noyaux dans ce cas sont assez petits pour rester en suspension.

1.5.2 Phénomènes de surface

Quand une goutte d'eau est placée sur une surface solide un angle se forme entre la surface solide et le liquide. La Figure I - 32 montre une interface liquide – gaz en contact avec une surface solide. L'angle θ est appelé l'angle de mouillage. Si $\theta = 0^\circ$, on dit que la surface est hydrophile avec un mouillage parfait. Quand $\theta > 0^\circ$ la surface est hydrophobe et on observe un mouillage imparfait. L'angle de mouillage varie, dépendant du mouvement du liquide ; ce phénomène est important pour la saturation d'un tensiomètre.

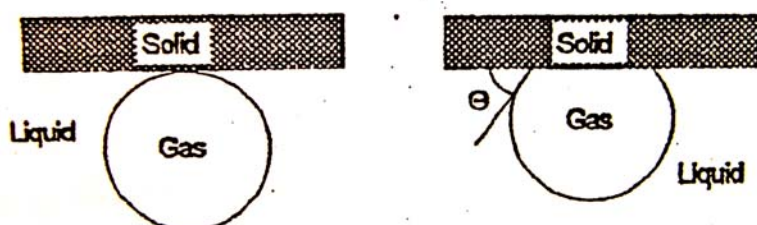


Figure I - 32. Angle de mouillage à l'interface gaz – liquide (Marinho & Chandler 1995)

Les mesures de l'angle de mouillage indiquent qu'aucun liquide mouille parfaitement un solide mais que tous les liquides mouillent les solides dans une certaine mesure (Adam 1941, Bikerman 1958). Une observation intéressante consiste en ce que les liquides pour lesquels l'angle de mouillage est moins de 90° (par exemple l'eau) monteront dans un tube capillaire immergé dans les mêmes liquides, tandis que le mercure, qui a un angle $\theta > 90^\circ$, descendra dans le tube.

Le modèle le plus courant concernant la stabilisation de noyaux est le modèle de crevasse. Harvey et al. (1944) ont proposé que des noyaux de gaz non dissous puissent exister

comme des bulles macroscopiques dans des fentes hydrophobes et des interstices dans les parois de la cellule. La tension de surface dans ces conditions a tendance à diminuer plus que n'augmente la pression du gaz et le gaz alors, ne se dissout pas forcément. La Figure I - 33 montre la cavitation résultant de noyaux de gaz dans une crevasse contenue dans une surface solide. Harvey et al. (1944) ont observé que des noyaux stabilisés pouvaient être forcés à se dissoudre si une haute pression est appliquée. La haute pression réduit la taille de bulle et augmente sa solubilité. On peut montrer (Knapp et al. 1970) que si la crevasse forme un angle aigu, avec le rayon de courbure zéro, une pression infinie est exigée pour dissoudre la bulle. Dans ce cas la stabilisation serait permanente et il serait impossible d'éviter la cavitation quand la tension est appliquée. Cependant, si la crevasse est arrondie, une pression finie est exigée pour dissoudre la bulle.

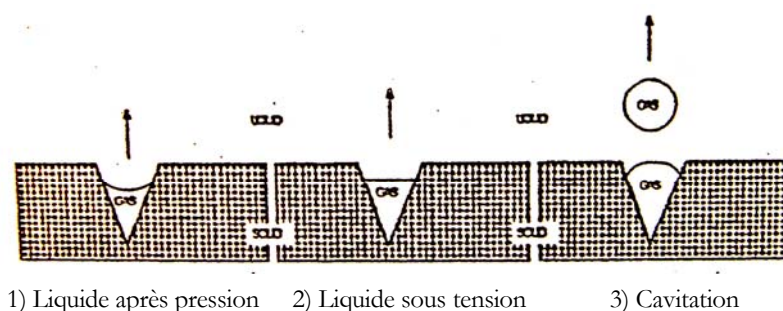


Figure I - 33. Formation de bulles d'un noyau stabilisé de cavitation (Knapp et al. 1970)

La mouillabilité de la pierre poreuse utilisée comme interface entre le système de mesure et le sol a un rôle important sur la stabilité du système de mesure. La cavitation peut arriver plus facilement à l'intérieur de la pierre, puisqu'il est difficile d'éliminer les noyaux de cavitation.

Le travail à l'Université de Saskatchewan (Guan 1994) (d'après Marinho & Chandler 1995) semble indiquer que quand on réalise une série de cavitations, la pierre poreuse devient "douce", probablement en raison de la dissipation d'énergie pendant la cavitation. Ohde et al. (1992) ont démontré l'effet avantageux de traitement superficiel, montrant que le polissage d'une surface usinée peut réduire la probabilité de cavitation en réduisant la taille et le nombre des crevasses.

1.5.3 Solutions pour réduire la cavitation

Le gaz non dissous est à l'origine de la différence entre la force de tension mesurée et la valeur théorique. Comme un système de mesure de succion de sol est constitué d'un capteur, d'une pierre poreuse et de l'eau pour éviter la cavitation, il ne doit pas y avoir d'air non dissous dans le système. En pratique, il est très difficile de remplir le système sans piéger de l'air dans des crevasses microscopiques. Pour réduire la probabilité de piégeage d'air on doit considérer les solutions suivantes (Marinho & Chandler 1995) :

- ⇒ l'utilisation de l'eau désaérée est importante ;
- ⇒ l'eau et toutes les surfaces dans le système de mesure doivent être extrêmement pures et propres ;
- ⇒ les surfaces de contact avec l'eau doivent être aussi lisses que possibles afin de réduire le nombre et la taille de crevasses. On peut éviter plus facilement la cavitation dans le cas de petites surfaces ;
- ⇒ avant toute utilisation le système devra être désaéré de l'air par l'application du vide ;
- ⇒ le système doit être soumis à des cycles de pressions positives (ou négatives). Cela peut permettre la dissolution de bulles persistantes (Chapman et al. 1975, Richards & Trevena 1976) ;
- ⇒ la saturation du système à hautes pressions est recommandée (Harvey et al. 1944).

On souligne que la cavitation peut être retardée si les noyaux sont stabilisés sous la tension. Les procédures ci-dessus permettent seulement de stabiliser les noyaux puisqu'on ne peut pas éviter l'apparition de la cavitation.

Bien que le processus de cavitation reste encore à explorer, sa connaissance actuelle permet de la retarder et ainsi d'étendre la gamme de succions mesurées par tensiométrie. L'utilisation d'un petit volume d'eau dans le système de mesure de succion est préconisée. Cependant, le volume minimal possible est limité par le déplacement du diaphragme du capteur. Etant donné que la cavitation ne se produira pas si le système est sans noyaux de cavitation, il est important d'assurer les meilleures caractéristiques de l'interface entre le sol et le système de mesure.

De plus les facteurs comme la valeur d'entrée d'air des matériaux poreux doivent également être bien pris en considération.

Un commentaire, qui résume bien le travail fait et ce qui reste encore à faire, est celui donné par Yount (1988, d'après Marinho & Chandler 1995) :

... le sujet de formation de bulle est associé à : « *amusement, beauty, mystery and surprise* », « ... In spite of the great effort and great progress that has been made in recent years, these basic elements have not changed. There are still mysteries to be solved, and no doubt there are still many surprises just over horizon. Above all, there is beauty and delight awaiting those who venture forth. »

2 MATERIAUX ETUDIES ET DEVELOPPEMENTS EXPERIMENTAUX

Cette partie concerne les différents développements réalisés aussi bien pour les essais au laboratoire que pour le suivi in situ. On commence par présenter les caractéristiques des matériaux utilisés. On aborde ensuite les conceptions, les difficultés rencontrées, le mode de fonctionnement et les tests effectués. Quelques perspectives en termes d'améliorations possibles dans des développements futurs sont également présentées.

Au cours de nos essais on a utilisé deux matériaux : l'argile verte de Romainville et le limon de Boissy le Châtel. On présente ici leurs principales caractéristiques obtenues à l'aide d'essais d'identification. Le site expérimental de Boissy le Châtel sera également présenté ici.

Le « cœur » de ces développements est le tensiomètre, car la plupart des essais étaient concernés par la mesure directe de la succion. Dans un premier temps il a fallu effectuer une série de tests sur le tensiomètre, qui a servi à s'assurer de son bon fonctionnement, ainsi que d'autres tests concernant son aptitude à mesurer la succion dans le temps (durée de mesure suffisamment longue d'au moins deux semaines). Les résultats satisfaisants obtenus sur le tensiomètre ont permis de lancer d'autres développements concernant les essais hydro-mécaniques.

Ces nouveaux développements ont nécessité 24 mois de recherche, car on a dû procéder par pas successifs dans la conception comme dans la définition des modes opératoires. Il a fallu tester minutieusement et résoudre au fur et à mesure les difficultés rencontrées au cours de leur mise en place et les problèmes observés pendant le déroulement des tests.

Le dispositif nouveau de mise en place in situ du tensiomètre a demandé une attention particulière. Ce dispositif a permis de faire une mesure directe de la succion en condition réelles in situ. Des tests préalables effectués au laboratoire ont soulevé quelques difficultés de mise en place, qui ont pu être écartées en prenant en compte des précautions adaptées. La réussite des tests au laboratoire a permis le passage à l'étape suivante : le test in situ. Ce

test s'est révélé utile et indispensable, car il a permis de lever les derniers soucis concernant la mise en place du tensiomètre.

La colonne d'infiltration a été un autre développement important. Elle comprend un tube métallique et deux embases oedométriques. Les difficultés venaient surtout du carottage des échantillons intacts de sol à l'aide d'un carottier. L'échantillon devait être le moins perturbé possible. Suivait une opération difficile : c'est l'introduction de l'échantillon carotté dans la colonne. Pendant cette opération il faut que l'échantillon de sol ne subisse pas d'efforts importants de compression, afin d'éviter qu'il se densifie et perde son état naturel. On a procédé avec précaution en utilisant une presse manuelle permettant une vitesse d'enfoncement maintenue constante.

Un dispositif permettant la mesure directe de la succion sur des échantillons de sols au laboratoire a également été mis en œuvre. Il s'agit d'une embase oedométrique modifiée avec un trou au milieu équipé d'un système de fixation du tensiomètre. Elle permet la mise en place de la pierre céramique du tensiomètre au même niveau que l'embase. On place l'échantillon de sol sur le dispositif ainsi conçu et on isole le système de l'atmosphère à l'aide d'une membrane néoprène. Les résultats obtenus ont servi à déterminer la courbe de rétention d'eau du sol étudié.

2.1 Matériaux étudiés

On a étudié deux matériaux : l'argile verte de Romainville prélevée à Champs sur Marne et le limon de Boissy le Châtel.

2.1.1 *Argile verte de Romainville*

On exposera dans cette partie les résultats des différents essais d'identification de l'argile verte qui ont été réalisés : la teneur en eau naturelle, l'analyse granulométrique, la calcimétrie, les limites d'Atterberg, la diffraction aux rayons X, l'essai au bleu de méthylène. On exposera brièvement le mode opératoire de quelques essais.

2.1.1.1 *Teneur en eau naturelle*

Exprimée en pourcent la teneur en eau naturelle est le rapport du poids d'eau contenu dans un sol humide au poids du sol sec (séchage jusqu'à poids constant à l'étuve à 105°C). On a mesuré une teneur en eau moyenne à partir de 3 échantillons, sa valeur est de 38.6%.

2.1.1.2 *Analyse granulométrique*

Pour les éléments de dimension supérieure ou égale à 80 μm , on procède par tamisage et on pèse le refus obtenu sur chaque tamis. Pour les éléments inférieurs à 80 μm , on procède par sédimentométrie. Cette méthode est basée sur la loi de Stokes qui donne la vitesse limite d'une particule tombant sous l'action de la pesanteur dans un liquide visqueux.

La Figure II - 1 présente la courbe granulométrique de l'argile verte. Le pourcentage inférieur à 80 μm est de 92%. En se basant sur des critères granulométriques on classera l'argile verte dans les sols fins.

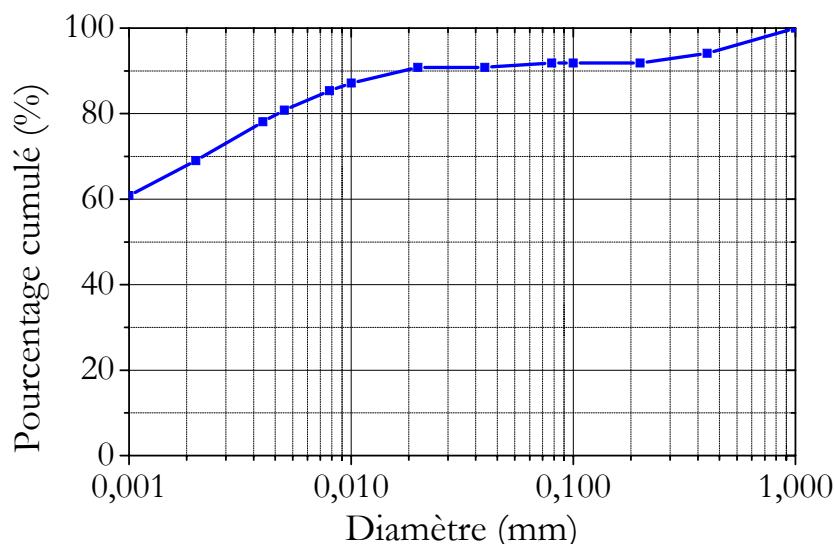


Figure II - 1. Granulométrie de l'argile verte

2.1.1.3 Limites d'Atterberg

On peut distinguer quatre états du sol en fonction de la teneur en eau : liquide, plastique, solide avec retrait et solide sans retrait. Les limites d'Atterberg, qui sont des teneurs en eau, permettent de définir conventionnellement les frontières entre les états. La détermination des limites d'Atterberg permet de qualifier le sol étudié (l'argile verte) et de la placer dans le diagramme de plasticité de Casagrande. Les essais ont été effectués sur la fraction du matériau passant au tamis de 0,4 mm.

2.1.1.3.1 Limite de liquidité W_L

C'est la limite entre l'état liquide et l'état plastique. On l'a déterminée à l'aide de l'appareil de Casagrande. On a effectué cinq tests afin d'obtenir une moyenne des résultats. La limite de liquidité obtenue est de 94,9 %.

2.1.1.3.2 Limite de plasticité W_p

Cette limite se place entre l'état plastique et l'état solide avec retrait. On la définit comme étant la teneur en eau au-dessous de laquelle il n'est plus possible de confectionner des rouleaux de 3 mm de diamètre avec le sol sans qu'ils se rompent. La limite de plasticité de l'argile verte est de 41,3 %.

2.1.1.3.3 Indice de plasticité I_p

Différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité, I_p donne l'étendue, en teneur en eau, de la plage de plasticité du sol. Pour l'argile verte, $I_p = 53,6$.

Dans le diagramme de Casagrande, le sol étudié se place dans la zone des argiles de forte plasticité. Cette argile peut être qualifiée donc de très plastique ($I_p > 40$).

2.1.1.4 *Calcimétrie de l'argile verte*

On a utilisé la méthode Dietrich-Frühling. Elle permet une détermination rapide du pourcentage de carbonate contenu dans le sol. On attaque un échantillon broyé et séché, par de l'acide chlorhydrique et on mesure le volume de CO_2 dégagé. Le poids de carbonate est déterminé à partir d'une courbe d'étalonnage.

Cette argile verte contient 13% de calcite ; et il s'agit donc d'une argile marneuse.

2.1.1.5 *Minéralogie des argiles par diffraction aux rayons X*

Pour l'argile verte, la lame de poudre présente des pics correspondant à l'illite et à la smectite. Ceci est confirmé par les lames d'argile verte naturelle, glycolée et chauffée. Ce résultat concorde avec la valeur importante de l'indice de plasticité I_p . Car on observe que plus un sol contient de smectites et plus il est plastique. Les résultats obtenus montrent que l'argile verte est composée d'illite et de smectite.

2.1.1.6 *Essai au bleu de méthylène*

Cet essai nous aide à apprécier globalement la quantité et la qualité de la fraction argileuse (inférieur à $2 \mu\text{m}$) présente dans un sol. On mesure la capacité des éléments fins à absorber le bleu de méthylène. Cet essai consiste à doser le bleu nécessaire pour recouvrir d'une couche mono moléculaire les surfaces externes et internes des particules fines en suspension dans l'eau.

On obtient pour l'argile verte une valeur de bleu de méthylène égale à 14,3.

La quantité de bleu adsorbée par un mélange est égale à la somme des quantités de bleu adsorbées par chaque groupe argileux qui entre dans sa composition. Pour les smectites les valeurs moyennes de bleu de méthylène sont 20-35 et pour les Illites 3-6.

2.1.2 Limon de Boissy le Châtel

On commencera par la présentation du site de prélèvement. Ce site a servi pour l'essai de mesure directe de succion in situ. On abordera ici les différents appareils de mesures et les paramètres obtenus. Par la suite on présentera les résultats des essais d'identification.

2.1.2.1 Données générales du site de Boissy-le-Châtel

Le site expérimental de Boissy-le-Châtel a une superficie de 620 m², il est situé dans le bassin d'Orgeval à une altitude de 133 m, à 50 km à l'est de Paris. La parcelle étudiée est dépourvue de végétation à l'exception de la pelouse, qui couvre toute la surface. Des bâtiments et des parcelles cultivées avoisine la parcelle. Le site appartient au CEMAGREF, il est équipé de la façon suivante :

- une station météorologique (depuis 1996) ;
- un piézomètre ;
- de TDR (Time Domain Reflectometry) ;
- un système de drainage pour mesurer le ruissellement.

Les paramètres caractéristiques mesurés (depuis l'année 1996) directement sont :

- Les paramètres de l'atmosphère où on distingue :
 - ⇒ les températures minimales et maximales à 2 m au-dessus de la surface du sol
 - ⇒ l'humidité maximale, minimale et relative à 2 m au - dessus de la surface du sol
 - ⇒ la vitesse du vent à 2 m d'altitude
 - ⇒ les températures à la profondeur -0,5 m et -1 m
 - ⇒ les précipitations
 - ⇒ le rayonnement solaire global pendant la journée et pendant la nuit
- Les paramètres du sol :
 - ⇒ la teneur en eau volumique à différentes profondeurs (0,05 ; 0,15 ; 0,25 ; 0,35 ; 0,45 ; 0,55 ; 0,75 ; 0,95 ; 1,15 ; 1,35 ; et 1,55 mètres)
 - ⇒ le niveau de la nappe phréatique.

2.1.2.2 Illustrations de l'emplacement des appareils

On trouve sur la Figure II - 2 un plan concernant l'emplacement de chaque appareil sur le site. La photo de la Figure II - 3 présente un aperçu des principaux appareils. Elle correspond sur le schéma au rectangle en trait pointillé bleu (Figure II - 2).

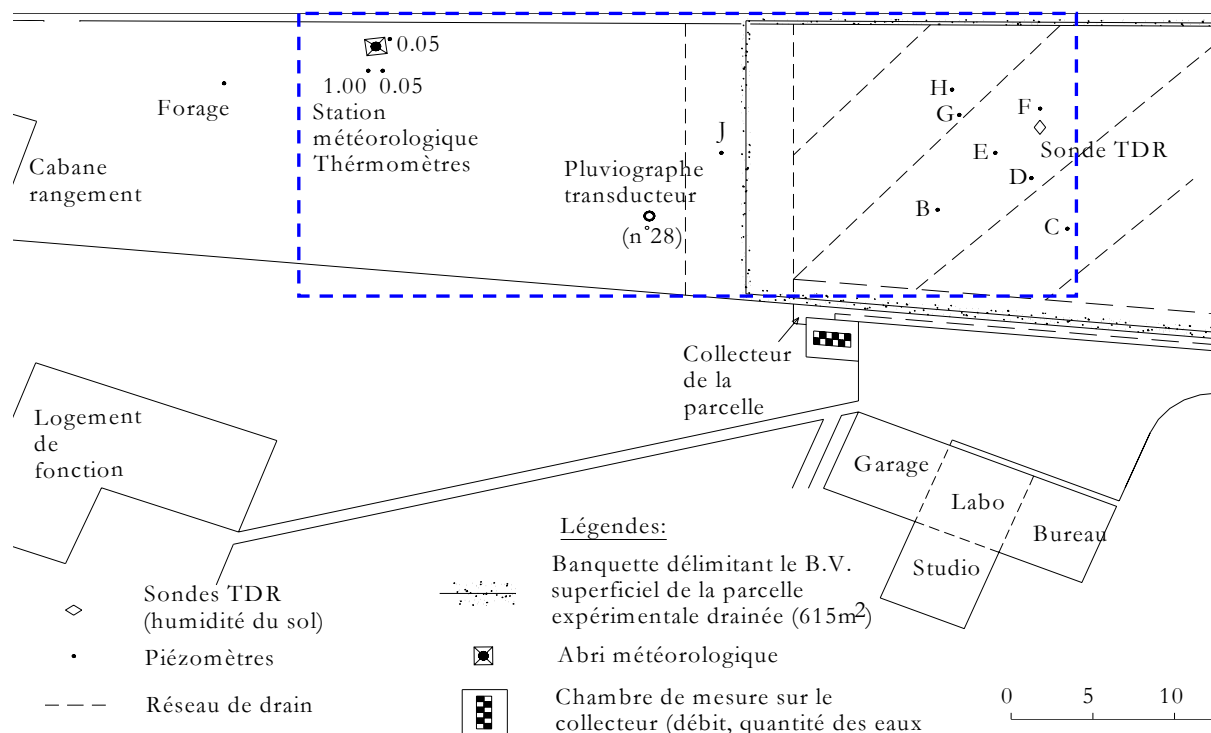


Figure II - 2. Plan du site de Cemagref



Figure II - 3. Implantation de l'instrumentation du site de Boissy le Châtel

2.1.2.3 Prélèvement du limon

Pour les essais au laboratoire deux grands blocs intacts de limon ont été prélevés. On a creusé jusqu'à 70 cm de profondeur afin de trouver une couche de sol homogène. La période qui a précédé le prélèvement (septembre 2003) était très sèche et en conséquence le sol avait une teneur en eau massique naturelle très faible de 14 %. Les deux blocs ont été paraffinés (Figure II - 4 b) sur place afin de garder le sol dans son état naturel. Ils ont été ensuite conservés dans une chambre d'humidité contrôlée.



Figure II - 4. Prélèvement d'un bloc intact de limon in situ

2.1.2.4 Analyse granulométrique

Afin de mieux connaître la composition du sol in situ et voir s'il était homogène on a réalisé une série d'analyses granulométriques jusqu'à une profondeur de 335 cm. Les prélèvements ont été effectués tous les 30 cm à l'aide d'une tarière. On présente sur la Figure II - 5 seulement les résultats obtenus jusqu'à 1 m de profondeur, qui correspond à une zone soumise aux effets des échanges sol – atmosphère.

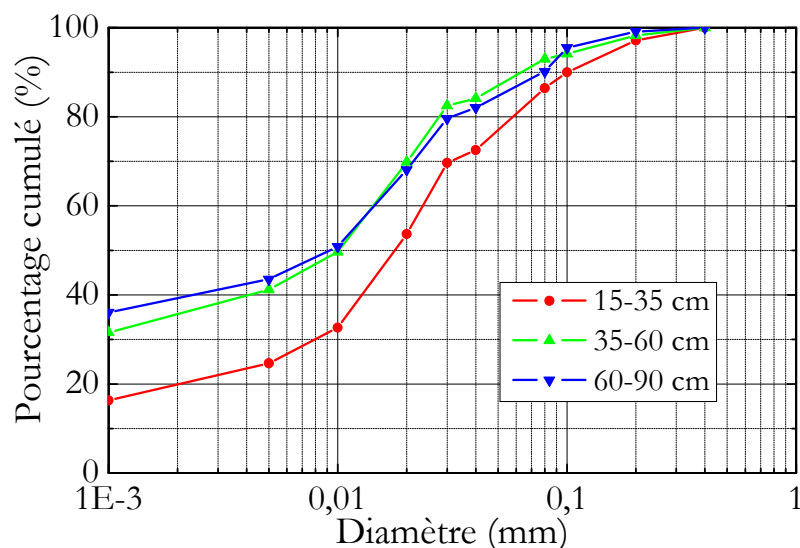


Figure II - 5. Granulométrie du limon à plusieurs profondeurs

2.1.2.5 Limites d'Atterberg

Les essais ont été effectués sur la fraction du matériau passant au tamis de 0,4 mm. On a obtenus les résultats suivants :

$$W_l = 28,5 \% ; \quad W_p = 19,8 \% ; \quad I_p = 8,7$$

Dans le diagramme de Casagrande, le sol étudié se place entre la zone des argiles de faible plasticité et la zone des limons de faible compressibilité. Il s'agit d'un limon peu plastique ($5 < I_p = 8,7 < 15$).

2.1.2.6 Conductivité thermique

On a réalisé quelques mesures de conductivité thermique du limon à l'aide d'une sonde. Un seul échantillon a été utilisé avec une teneur en eau massique initiale de 16,4 %. Pour cela on a perforé l'échantillon de limon (Φ 38 mm et H 70 mm) en son milieu (Figure II - 6 a) et inséré la sonde d'une longueur de 60 mm dans le trou ainsi réalisé. On procède ensuite directement à une mesure de la conductivité de limon (Figure II - 6 b). Trois mesures ont été effectuées dont les résultats sont présentés au Tableau II - 1. On observe une dispersion assez importante des valeurs mesurées.

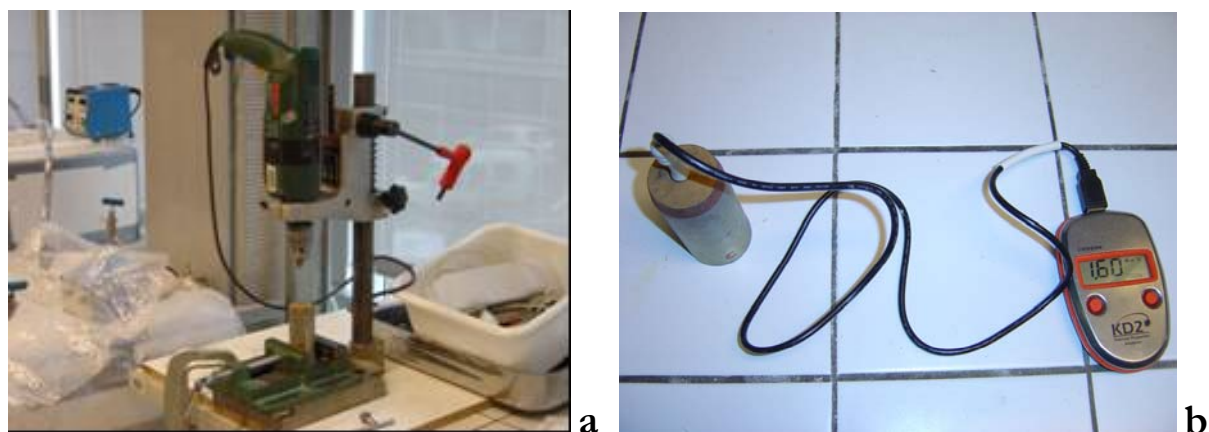


Figure II - 6. Mesure de la conductivité thermique

Echantillon	Conductivité thermique k (W/mc)	Résistance thermique R =1/k (mc/W)	Diffusivité thermique D (mm ² /s)	Température ambiante
1	1,51	0,66	0,41	24,20
2	1,31	0,76	0,51	21,00
3	1,60	0,63	0,38	20,50

Tableau II - 1. Résultats des mesures de la conductivité thermique

2.2 Développement du tensiomètre

Sa conception est basée sur celle du tensiomètre d'Imperial College. Notre premier objectif a été de vérifier les différents effets déjà observés par les chercheurs qui ont travaillé sur le même type de capteur. Une attention particulière a été accordée aux différents effets physiques (cavitation, corrosion etc.). On a commencé avec un seul capteur, sans acquisition automatique. Les premiers tests effectués ont été réalisés sur son fonctionnement. Après les premiers cycles saturation – cavitation on a observé une chute des valeurs maximales mesurées, accompagnée d'une mauvaise performance du tensiomètre. Après de minutieuses vérifications on a constaté que la colle utilisée ne répondait pas aux exigences demandées. Il a fallu donc rechercher une colle appropriée.

D'autres tests ont suivi avec le même capteur, cette fois avec une acquisition automatique complète. Les résultats des tests ont été positifs ; le tensiomètre fonctionnait et les valeurs mesurées étaient élevées (pendant les cycles de cavitation on a obtenues des valeurs entre 1100 et 1573 kPa). Cette première étape franchie, on a poursuivi les tests par des mesures dans le temps. Les premiers furent négatifs à cause d'un défaut du système d'isolation. Après la résolution de ce problème on a testé à nouveau le tensiomètre mais sans succès : on a observé alors une dérive des valeurs mesurées, qui était due à un décollement de la jauge de tension sur le diaphragme. Ce défaut était le résultat d'entrée d'eau dans la partie se situant sous le diaphragme là où était collée la jauge de déformation, ceci ne mettait pas en cause le fonctionnement fondamental du tensiomètre.

On a modifié le capteur de façon à ce que toute la partie mécanique forme un monobloc, assurant ainsi l'étanchéité à l'arrière du diaphragme. Le travail s'est poursuivi avec deux nouveaux tensiomètres et une grande cellule de saturation. Les tests effectués sur le fonctionnement et la performance du capteur ont été concluants. On est alors passé à l'étape suivante : la durée de mesure dans le temps. Pour ce faire, on a préparé un échantillon de sol à une succion relativement faible de 120 kPa et on a placé les deux tensiomètres en contact avec l'échantillon de sol. Le résultat était celui qu'on espérait : les deux tensiomètres ont mesuré la succion pendant aux moins deux semaines (16 et 18 jours). Ce résultat est primordial car il a confirmé la capacité du tensiomètre à mesurer la succion pendant une période suffisamment longue (au moins deux semaines). Ces tests ont pris un

temps relativement long en raison d'un nombre limité de capteurs (deux), qui ne permettait pas un enchaînement des tests.

La confirmation du bon fonctionnement du tensiomètre a ouvert l'horizon pour les autres développements expérimentaux nécessaires pour la réalisation des essais hydro-mécaniques, la colonne d'infiltration entre autres. Cinq autres tensiomètres ont été fabriqués pour répondre à différents besoins.

2.2.1 Conception du tensiomètre

Dans mon étude expérimentale le capteur de succion (tensiomètre) constitue l'outil de travail essentiel. Donc il était important d'assurer sa fiabilité durant un temps de mesure long. La performance du tensiomètre se traduit aussi par son étendue de mesure, supérieure à 1,5 MPa (la valeur d'entrée d'air de la pierre poreuse céramique). Dans notre cas on avait fixé le seuil inférieur admissible à 1 MPa, valeur estimée pour les sols à tester. Il s'est avéré que pour les 7 tensiomètres disponibles, ce seuil était facile à atteindre à condition de suivre attentivement la procédure de saturation et d'application de cycles cavitation – saturation.

Dans les paragraphes suivants on fera une description détaillée des éléments concernant la partie mécanique et leur influence sur le fonctionnement du tensiomètre. On spécifie : la taille du réservoir d'eau, la distance de vide nécessaire entre la pierre poreuse et le corps du tensiomètre, les dimensions du diaphragme et le choix de la colle appropriée. On s'est basé en partie sur les recommandations des autres auteurs (partie 1.4 de l'étude bibliographique). Les éléments du tensiomètre sont montrés schématiquement sur la Figure II - 7.

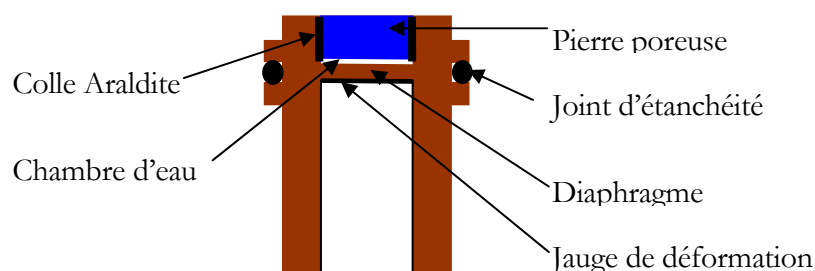


Figure II - 7. Schéma du tensiomètre

2.2.1.1 Taille du réservoir d'eau

La taille du réservoir est un élément clé dans le bon fonctionnement du capteur. On n'a utilisé qu'un seul type de capteur et donc une seule épaisseur du réservoir d'eau de 0,1 mm. La taille réduite du réservoir d'eau a été retenue comme un des éléments clefs pour mesurer de fortes succions (Ridley & Burland 1993). La réduction de la masse d'eau libre dans l'instrument réduirait le nombre de noyaux d'air dans le réservoir d'eau et donc la probabilité de cavitation. Le réservoir est délimité par le diaphragme de mesure et sa profondeur doit être donc compatible avec la déflexion de diaphragme. Au centre, la déflexion est calculée selon la formule :

$$f = \frac{3Pr^4(1-\mu^2)}{16Ee^3}$$

Où :

- P : pression appliquée
- e : épaisseur
- r : rayon
- f : flèche au centre
- E, μ : module de l'élasticité et coefficient de Poisson

2.2.1.2 Jeu entre la pierre poreuse et la paroi

On a choisi d'avoir un jeu entre la pierre poreuse et la paroi du capteur uniforme pour le collage de la pierre. Pour définir une valeur de vide appropriée entre la céramique et le métal, on a tenu compte de la viscosité de la colle ainsi que des recommandations du fournisseur sur l'épaisseur minimale de la colle utilisée. Un jeu uniforme d'environ 0,5 mm a été finalement adopté.

2.2.1.3 Epaisseur et diamètre du diaphragme

Il est préférable de concevoir des tensiomètres dont le diaphragme est une partie intégrante du corps de capteur, afin d'éliminer les risques d'erreurs liés au montage et à l'étanchéité. Pour la conception on définit d'abord les contraintes dans le diaphragme créées sous les pressions uniformes, radiales et tangentiels. Les contraintes radiale et tangentielle sont maximales au centre du diaphragme. La contrainte tangentielle tend vers zéro à la périphérie

du diaphragme tandis que la contrainte radiale diminue rapidement avec le rayon, devenant négative et égale à deux fois la contrainte au centre à la périphérie du diaphragme. La déformation radiale est calculée par la formule suivante :

$$\epsilon_r = \frac{3P(1-\nu^2)}{8Ee^2}(r^2 - 3x^2)$$

Où :

- P : la pression appliquée
- r : le rayon de diaphragme
- t : l'épaisseur de diaphragme
- μ : le coefficient de Poisson
- E : le module de Young.

A la périphérie ($x = r$) cette déformation radiale est : $\epsilon_{r,0} = -\frac{3Pr^2(1-\nu^2)}{4Ee^2}$

Measurements Group (1996) suggère que ϵ_r doit rester inférieure à une valeur limite de 2×10^{-3} pour éviter la mise sous tension excessive du diaphragme. On montre sur la Figure II - 8 la distribution des déformations dans le cas d'un diaphragme serré infiniment rigide :

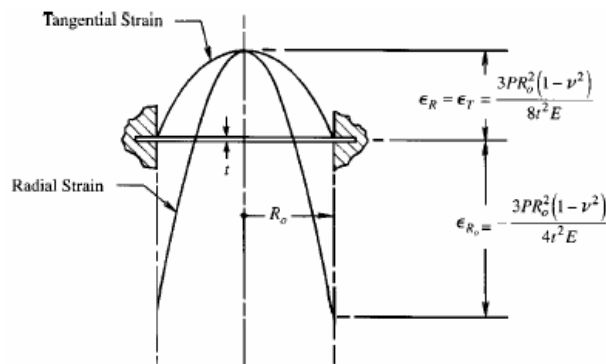


Figure II - 8. Distribution des déformations dans un diaphragme serré infiniment rigide.

Les jauges de déformation, qui sont collées sur le diaphragme, sont conçues pour s'adapter à l'orientation des champs de tension tangentiels et radiaux décrits ci-dessus (Figure II - 8). Ceci grâce à un réseau de jauges de modèle circulaire comme montrés sur la Figure II - 9.

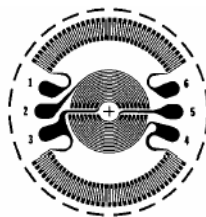


Figure II - 9. Réseau de jauges de modèle circulaire.

2.2.1.4 Choix de la colle

La pierre poreuse céramique est collée dans le corps du tensiomètre. Le choix de la colle doit répondre à trois exigences :

- ⇒ capable d'assurer l'adhésion entre les métaux et la céramique ;
- ⇒ avoir une longue durée de vie en conditions d'humidité permanente ;
- ⇒ supporter des fortes pressions de l'ordre de 4 MPa.

La colle finalement adoptée est l'Araldite 2014 qui comprend deux pâtes d'époxy. C'est un adhésif polyvalent avec une longue durée de vie active et il est particulièrement adapté pour les métaux et la céramique. À 23 °C, la durée maniable de l'adhésif est d'environ une heure et demie et le temps pour atteindre 50 % de son efficacité finale de cisaillement est d'environ 10 heures.

2.2.1.4.1 Dispositif pour tester la colle

La colle initialement choisie ne remplissait pas les conditions requises. Après de longue recherche on s'est concentré sur deux colles possibles : Araldites 2014 et Epoxy 460. On a décidé de les tester pour faire un meilleur choix.

On présente sur la Figure II - 10 a le dispositif utilisé pour tester les colles. Un contrôleur pression d'air, un capteur de pression 2 MPa, une cellule pour vérifier la qualité d'étanchéité du collage sous pression d'air en fonction du temps.

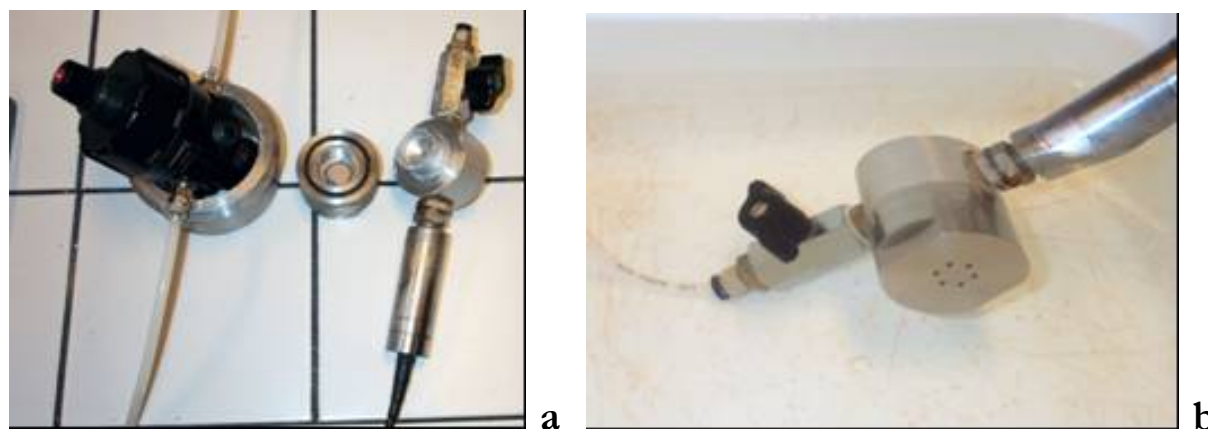


Figure II - 10. Dispositif expérimental du test de la colle appropriée

On a collé avec l'Araldite 2014 ou l'Epoxy 460 une pierre poreuse de 1,5 MPa dans la petite cellule avec le fond ouvert. On a appliqué une pression d'air de l'ordre de 1 MPa dans l'enceinte, on a fermé le robinet de façon à garder la pression dans la petite cellule et on a plongé l'enceinte dans un bain d'eau (Figure II - 10 b). Sous l'eau, la pierre poreuse a été saturée et la colle a été mise en conditions d'humidité permanente, en étant aussi sous pression.

2.2.1.4.2 Résultats des tests de la colle

On a suivi respectivement pendant 4 et 6 semaines l'évolution de la pression dans la petite cellule. Il y a eu une diminution linéaire de la pression, c'était un phénomène normal dû à la diffusion d'air à travers la pierre poreuse (même si la pierre poreuse était saturée). Les graphiques de la pression d'air dans les deux cas (Figure II - 11 a, b) montrent bien que cette perte de pression d'air est linéaire.

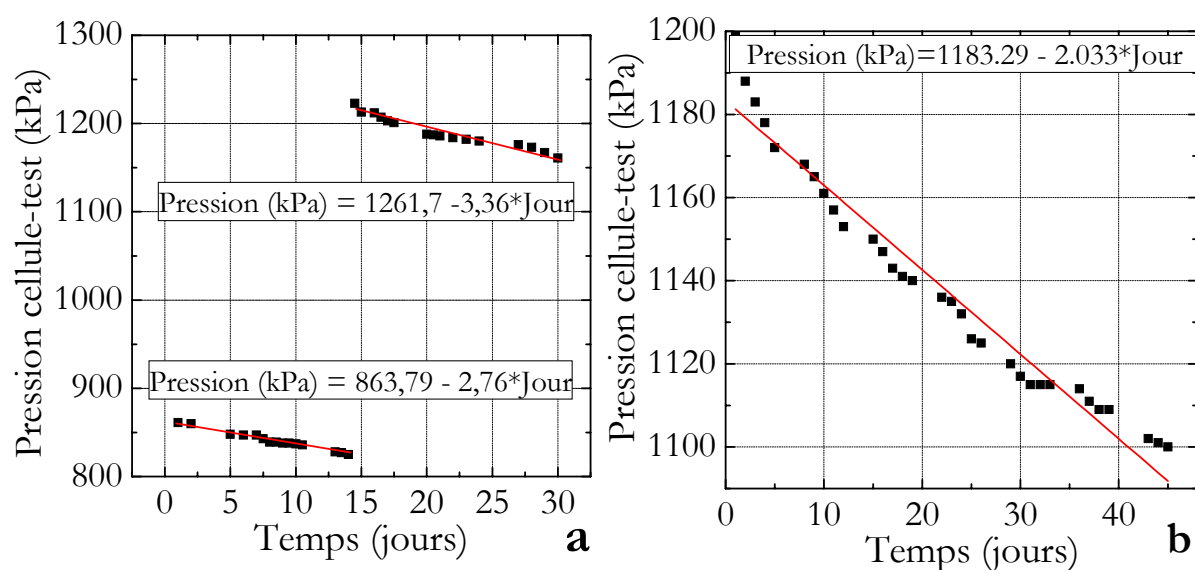


Figure II - 11. Pression dans le temps a) 29 jours – Araldite 2014 ; b) 45 jours – Epoxy 460

Cette linéarité montre bien que les colles utilisées remplissent nos exigences. Une défaillance de la colle aurait causée une chute importante de la pression. A la fin de chaque essai on enlève la colle et la pierre poreuse du fond de la petite cellule. L'observation de la colle utilisée nous a montré que la colle gardait le même aspect après son utilisation.

2.2.2 Cellules de saturation

Pendant toutes ces expériences on a utilisé deux cellules de saturation. Les noms utilisés, petite ou grande cellule, sont liés à leurs dimensions. La petite cellule de saturation sert pour la saturation de la pierre poreuse d'un seul tensiomètre ; la grande cellule de saturation sert pour la saturation simultanée d'un nombre maximal de 6 tensiomètres.

2.2.2.1 Petite cellule de saturation

C'est une cellule en acier inox (dimensions extérieures : diamètre 80 mm et hauteur 70 mm ; épaisseur 20 mm), dimensionner pour résister à une pression de 10 MPa. La cellule est composée d'un corps principal et d'un couvercle. Le corps principal est muni de 3 vannes : une au fond qui sert principalement de purge, deux de côté qui servent à appliquer la pression et le vide respectivement. Le couvercle sous forme de disque, fixée au corps cylindrique par 6 vis, sert également de support pour le tensiomètre. Le schéma de la Figure II - 12 a montre une coupe transversale, complétée par deux photos de la cellule Figure II - 12 b, c.

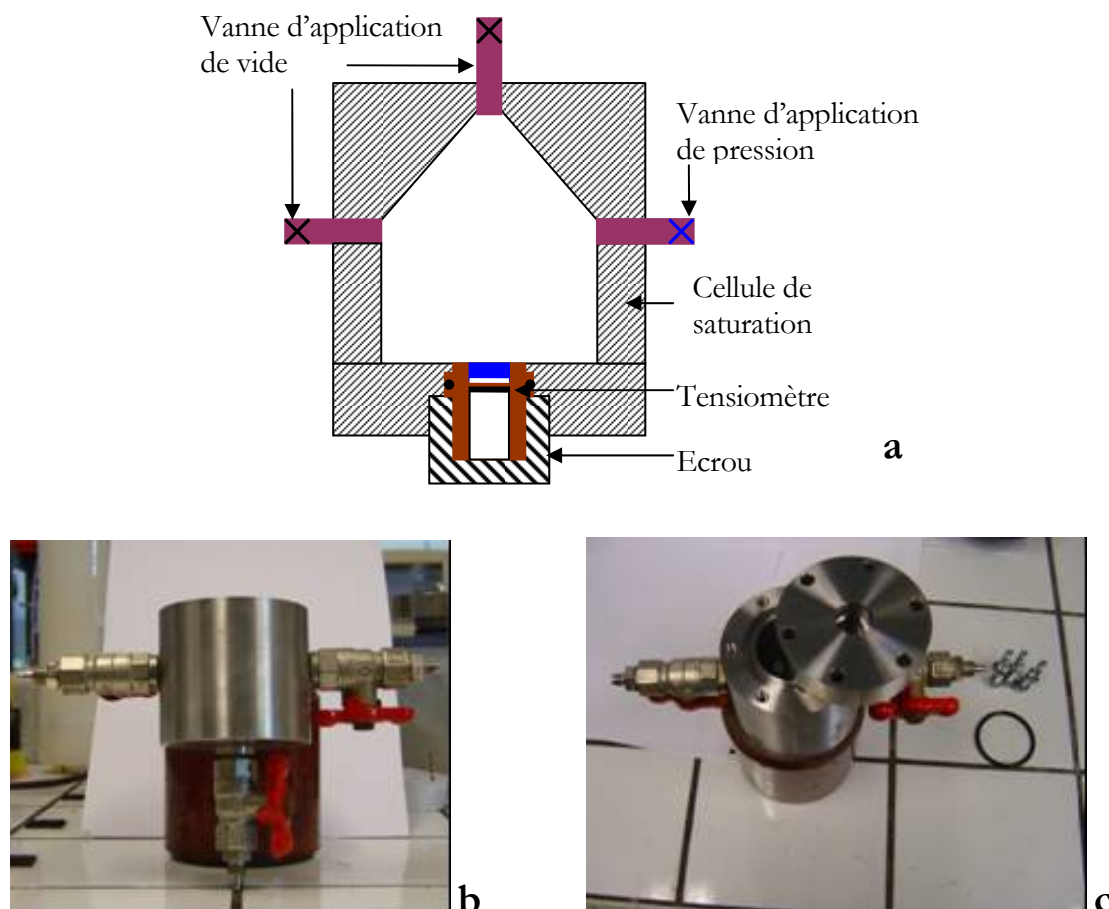


Figure II - 12. a) Coupe transversale ; b, c) Photos de la petite cellule de saturation

2.2.2.2 Grande cellule de saturation

C'est une cellule en acier inox (dimensions extérieures : diamètre 140 mm et hauteur 110 mm ; épaisseur 20 mm) dimensionnée pour supporter des pressions d'eau voisines de 5 MPa. La cellule (Figure II - 13 a) est schématiquement un cylindre creux qui sert de support pour 6 tensiomètres dont les membranes sont orientées vers l'intérieur. Les capteurs sont fixés sur la cellule à l'aide d'un écrou qui les bloque par l'extérieur (Figure II - 13 b). Il y a deux joints sur chaque capteur qui assurent l'étanchéité entre le capteur et la cellule. Deux couvercles en forme de disque munis d'un joint d'étanchéité, fixés au cylindre par 8 vis viennent fermer la cellule. Sur chaque couvercle une sortie est aménagée avec une vanne. L'une, côté inférieur, sert pour l'application de la pression (c'est une vanne de haute pression) et l'autre, côté supérieur sert pour purger. La Figure II - 14 a illustre la grande cellule de saturation avec 6 tensiomètres.

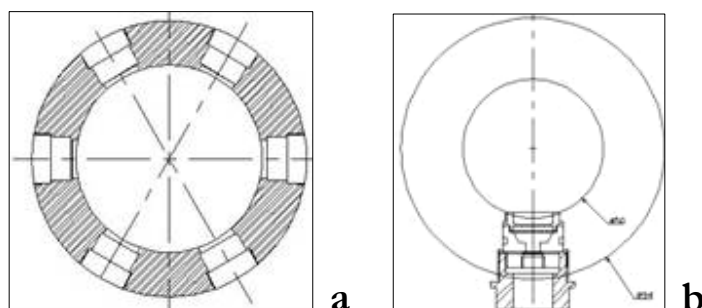


Figure II - 13. a) Coupe transversale de la grande cellule de saturation ; b) Fixation du tensiomètre dans la cellule

La principale difficulté de cette cellule réside dans son maniement lors de la sortie ou de l'entrée d'un tensiomètre (Figure II - 14 a). Lorsque les 6 tensiomètres sont montés, la sortie d'un tensiomètre de la cellule demande un certain nombre de précautions particulières : d'abord baisser la pression à zéro dans la cellule et débrancher la cellule du système d'application de la pression, remettre la cellule en position horizontale et sortir le tensiomètre voulu (Figure II - 14 b). Après cette opération boucher le trou à l'aide d'un bouchon et d'un écrou, appliquer alors le vide dans la cellule pendant au moins deux heures afin d'aspirer les bulles d'air entrées dans la cellule au cours de l'opération. Suivre la même procédure pour remettre en place le tensiomètre une fois que les mesures sont terminées.

Cette procédure était primordiale pour garder les capteurs toujours bien saturés. Après chaque sortie de tensiomètre, il est important de bien nettoyer l'eau désaérée de la cellule.

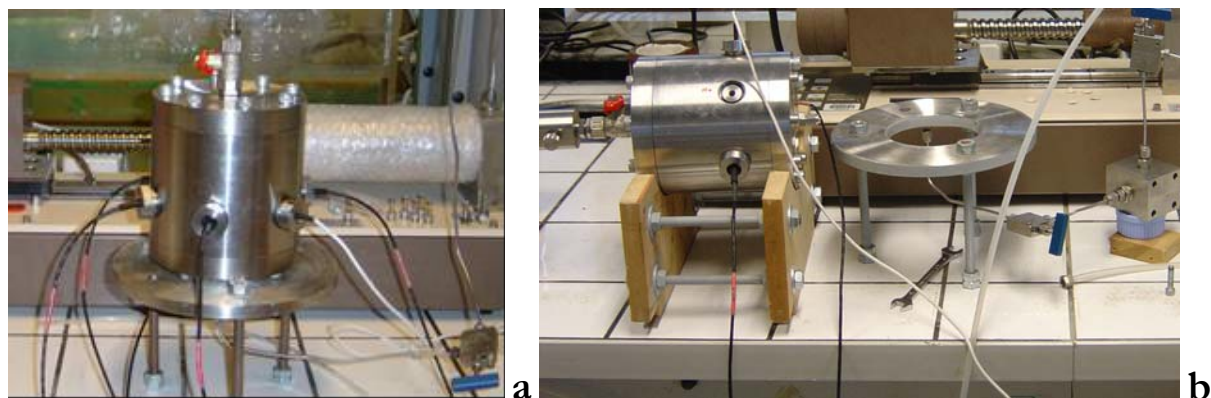


Figure II - 14. a) Grande cellule de saturation, b) Changement d'un tensiomètre

2.2.3 Mode de fonctionnement

On présente ici le mode de fonctionnement du tensiomètre pendant l'application des pressions positives (saturation) et pendant la mesure des pressions négatives – suctions (mesure directe de la succion ou cavitation).

Pendant la saturation, le tensiomètre fonctionne comme un capteur de pression classique. Le tensiomètre mesure les valeurs des pressions appliquées à l'aide d'un CPV (contrôleur pression – volume). On rappelle que pendant la saturation le tensiomètre est placé dans la cellule de saturation. C'est pendant cet intervalle de temps qu'on effectue aussi l'étalonnage du tensiomètre

La mesure de la succion d'un échantillon de sol à l'aide du tensiomètre se fait directement en mettant en contact le tensiomètre avec l'échantillon de sol (Figure II - 15) dans un système bien isolé. On applique sur la surface de la pierre poreuse une fine couche humide du même type de sol. Le rôle de cette pâte est très important car elle a une double fonction :

- elle aide à assurer le bon contact entre la pierre poreuse et l'échantillon de sol ;
- elle permet que la mesure de succion se fasse progressivement. Ceci est particulièrement important quand la succion est élevée (> 1 MPa), car sans cette pâte on risque une cavitation rapide.

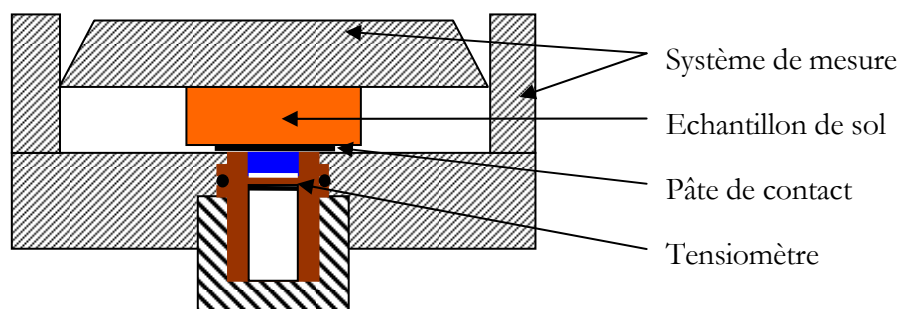


Figure II - 15. Schéma de mesure de la succion d'un échantillon de sol

Quand la pierre poreuse céramique est placée en contact avec l'échantillon de sol, l'eau dans la pierre poreuse et dans le réservoir d'eau commence à se mettre progressivement sous tension le diaphragme de mesure se courbe vers la pierre céramique. La succion qui correspond à la courbure continue du diaphragme est enregistrée à l'aide d'un système d'acquisition automatique. Si l'échantillon de sol a une succion inférieure à 1,5 MPa, la mesure continuera jusqu'à ce que la valeur se stabilise. Si l'échantillon de sol a une succion supérieure à 1,5 MPa, la mesure risque d'être interrompue par le phénomène de cavitation. L'eau de la pierre poreuse tente de se mettre en équilibre avec la tension extérieure qu'exerce l'échantillon de sol, mais quand la valeur mesurée dépasse 1,5MPa, l'air risque d'entrer à l'intérieur des pores de la pierre poreuse et de pénétrer jusqu'à la chambre d'eau, entraînant le phénomène de cavitation.

Le tensiomètre donne alors après cavitation une valeur de -100 kPa. Il faut placer très vite la pierre poreuse du tensiomètre dans l'eau libre, car en laissant le tensiomètre en contact avec l'échantillon de sol on risque de désaturer complètement la pierre poreuse. La valeur revient rapidement à zéro une fois que le tensiomètre est placé dans l'eau libre. On met ensuite le tensiomètre sous vide pendant quelques heures, et on le sature à nouveau afin qu'il redevienne opérationnel.

2.2.4 Influence de divers facteurs sur le comportement du tensiomètre

On a commencé le travail au laboratoire sur un tensiomètre de première conception. Il était avant tout nécessaire d'élaborer une procédure en se basant sur les travaux existants en la matière. Dans un premier temps on s'est contenté d'une acquisition manuelle. L'objectif principal était de le faire fonctionner, de découvrir ses particularités et d'éliminer les erreurs

de manipulations. Cette phase d'apprentissage a permis de comprendre le comportement du tensiomètre dans les moindres détails, de bien maîtriser les différents problèmes apparus et de tenter de trouver des réponses adaptées aux questions difficiles.

L'anomalie qui a posé le plus de problèmes et a demandé une réflexion assez poussée était l'entrée d'eau dans la partie des jauges de déformation collées sur le diaphragme. La conception du capteur en deux pièces, qui se vissaient entre elles et se collaient en utilisant une colle Araldite, n'était pas appropriée. La colle n'arrivait pas à assurer l'étanchéité de ce système, car vraisemblablement elle n'avait pas les caractéristiques nécessaires. On a corrigé ce problème en demandant au fabricant du capteur une soudure laser à l'endroit du montage des deux pièces. C'était la première modification issue directement des différents essais effectués sur le tensiomètre.

2.2.4.1 Traitement préliminaire d'un nouveau tensiomètre

On présente ici une procédure préliminaire concernant la mise en service d'un nouveau tensiomètre. Chaque nouveau capteur est testé de la part du fabricant pour une pression maximale de 5 MPa. Ce test a été systématiquement répété au laboratoire après la réception de chaque capteur. Strictement dit, les appareils de départ fonctionnaient en tant que capteur de pression donc dans des gammes positives.

On résume cette procédure préliminaire :

- ⇒ appliquer une pression d'air de 200-300 kPa et suivre la réponse du capteur ; faire plusieurs cycles montée – descente en pression par paliers ; répéter ces cycles pendant 1-2 jours et monter progressivement la valeur de pression à 600-700 kPa. On remarque en général que la valeur du capteur se stabilise très vite, malgré les oscillations au début de l'opération ;
- ⇒ appliquer par paliers une pression d'eau à l'aide de CPV (Contrôleur Pression Volume – GDS) atteignant une valeur maximale de 2 MPa ; refaire pendant 1-2 jours d'autres cycles montée – descente en pression d'eau en changeant progressivement la pression appliquée ;

⇒ faire un étalonnage de la membrane du tensiomètre dans l'intervalle des pressions d'eau appliquées 0-2 MPa par paliers de 200 kPa dans le sens de la montée en pression ; on répète 2-3 fois ce type d'étalonnage en montant la pression par paliers, jusqu'à 3-4 MPa ; c'est seulement à ce stade que l'on peut s'assurer du bon fonctionnement du capteur de pression et passer à la phase suivante : le collage de la pierre poreuse.

2.2.4.2 Collage de la pierre poreuse céramique

Pour le collage de la pierre poreuse (initialement à l'état sec) dans le logement prévu, on procède de la façon suivante : la colle d'Araldite 2014 est placée sur la surface latérale de la pierre poreuse ; la pierre est ensuite introduite dans le logement prévu à cet effet. On réalise le collage en gardant le tensiomètre vertical dirigé vers le bas, ce qui permet d'éviter le débordement de la colle dans le réservoir d'eau et d'assurer l'évacuation du surplus de colle dans la surface annulaire de la pierre poreuse. Lors de cette manipulation, la partie supérieure de la pierre poreuse était protégée par un papier filtre. On n'a pas appliqué la colle dans la partie métallique du capteur, car on craignait que la colle déborde dans le réservoir d'eau.

Les observations faites sur les pierres poreuses extraites (après le changement des pierres poreuses) ont montré une très bonne cohésion entre la pierre poreuse, la colle et le métal, ce qui montre l'efficacité de ce procédé.

2.2.4.3 1^{ère} saturation du capteur tensiométrique

Ridley et Burland (1999) considèrent la première saturation de la pierre poreuse (céramique) comme un pas décisif dans la procédure expérimentale. C'est le processus qui conditionne le futur comportement du capteur. On ne peut faire la première saturation de la pierre poreuse qu'au moins 24 heures après le collage de la pierre poreuse. Les différentes étapes sont :

⇒ nettoyage de l'intérieur de la petite cellule de saturation ; il est nécessaire de s'assurer qu'il n'y a pas d'eau à l'intérieur de la cellule et que la surface intérieure du métal est lisse et propre pour la suite du processus de saturation (Marinho & Chandler 1995) ;

- ⇒ fixation du tensiomètre à l'aide d'un écrou dans le couvercle et fermeture de la petite cellule à l'aide des 6 vis ;
- ⇒ appliquer le vide en utilisant la vanne n°2 (Figure II - 16 a) pendant au moins 2 heures pour aspirer le maximum d'air possible piégé dans les pores de la pierre poreuse céramique ;
- ⇒ arrêter le vide et faire entrer de l'eau désaérée et déminéralisée jusqu'au niveau inférieur de la vanne 1 ; pour éviter que l'eau se mette en contact avec la pierre poreuse, qui est toujours sèche, le tensiomètre se trouve en haut de la cellule de saturation (Figure II - 16 b) ;
- ⇒ appliquer à nouveau le vide en utilisant la vanne n°1 pendant au moins 1 heure. Cette fois le vide est nécessaire pour extraire les bulles d'air de l'eau ainsi que l'air emprisonné dans la cellule ;
- ⇒ tourner de 90° dans le sens des aiguilles d'une montre la cellule toujours sous vide (Figure II - 16 c) ; le niveau d'eau se trouve juste un peu en dessous de la pierre poreuse, qui est encore sèche ;
- ⇒ commencer à immerger doucement la pierre poreuse en tournant de quelques degrés la petite cellule dans le sens des aiguilles d'une montre (Figure II - 16 d). La pierre poreuse se trouve à moitié noyée. La petite cellule est fixée dans cette position durant au moins 20 minutes. L'eau envahit progressivement la pierre poreuse par capillarité, tout en laissant une surface suffisante pour l'évacuation d'air ;
- ⇒ tourner la petite cellule d'environ 90° dans le sens des aiguilles d'une montre. Le tensiomètre se trouve à ce stade en bas de la cellule et la pierre poreuse est complètement immergée dans l'eau (Figure II - 16 e). Laisser encore l'ensemble sous vide pendant au moins 1 heure.
- ⇒ on arrête le vide, on remplit complètement d'eau désaérée la petite cellule et on connecte la cellule avec le CPV. On applique la pression par paliers jusqu'à 4 MPa et on laisse le tensiomètre sous cette valeur de pression pendant 48 heures (Ridley & Borland suggèrent 24 heures, mais on estime qu'un temps plus important est nécessaire pour la première saturation). Après cet intervalle de temps la première saturation de la pierre poreuse du tensiomètre est terminée.

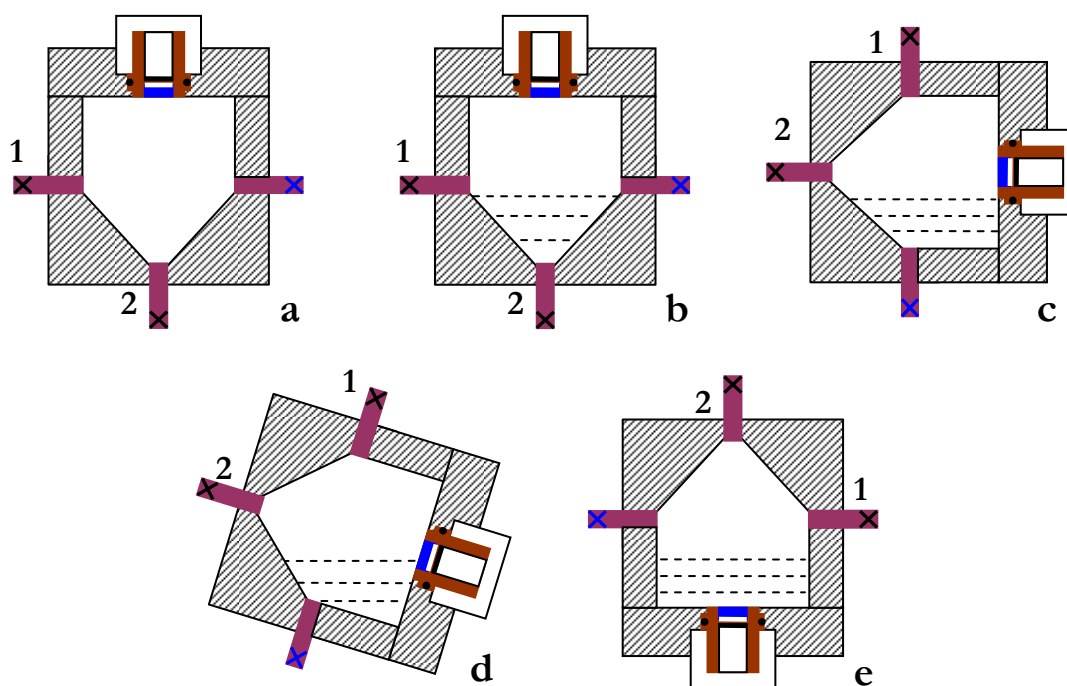


Figure II - 16. Réalisation de la 1^{ère} saturation de la pierre poreuse du tensiomètre

2.2.4.4 Effet du temps de saturation et des cycles saturation – cavitation

Le temps de saturation joue un rôle important dans le cycle de vie d'un tensiomètre. On appelle cycle de vie d'un tensiomètre la période de temps entre la première saturation et la dernière mesure qu'on effectue avec le capteur.

On parle souvent du cycle saturation – cavitation, qui est à l'origine du mode de fonctionnement du tensiomètre. D'abord la pierre poreuse du capteur doit être saturée pour que le capteur puisse mesurer correctement. Une fois les mesures de la succion sur des échantillons de sols terminées on continue avec une autre mesure sur un échantillon très sec ($s > 2$ MPa) de façon à faire caviter le capteur par le phénomène de diffusion d'air. Après la cavitation le capteur ne peut plus fonctionner et il est nécessaire de le re-saturer.

On présente sur la Figure II - 17 un récapitulatif de cycles de cavitation pour le tensiomètre N-2. Les cinq premières cavitations servent à améliorer la performance du tensiomètre, les autres sont des cavitations « forcées » à la fin d'une série de mesures ou de tests. On observe que chaque fois la valeur finale avant cavitation est supérieure à 1000 kPa.

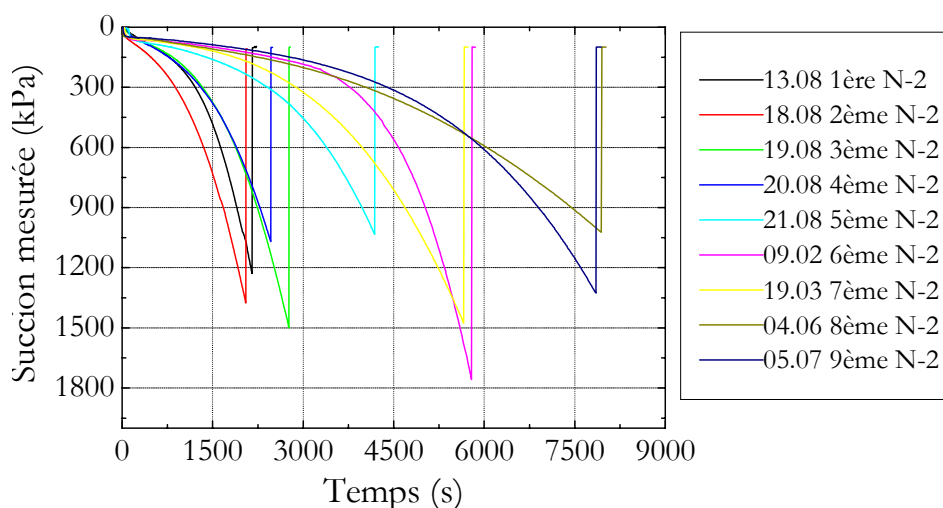


Figure II - 17. Sommaire de cycles de cavitation pour le tensiomètre N-2

Après la première saturation du tensiomètre quelques cycles (au moins 4-5) saturation – cavitation sont nécessaires de façon à augmenter la performance du capteur et de s’assurer de son bon fonctionnement. On présente les différentes étapes dans ce qui suit.

2.2.4.4.1 Saturation de la pierre poreuse du tensiomètre

La première phase correspond à la saturation : durant ce processus, le capteur se trouve dans la cellule de saturation pleine d’eau désaérée et déminéralisée. Pendant cette durée de temps (au moins 24 heures) le capteur est mis sous une pression positive d’eau (normalement 4 MPa) à l’aide d’un appareil CPV. Au cours de la saturation on change aussi la pression d’eau appliquée ; on applique des paliers de pressions décroissantes et croissantes. On pense que c’est un facteur qui favorise la saturation (Harvey et al. 1944). On peut faire aussi des étalonnages du tensiomètre pendant la durée de saturation sans qu’il y ait une influence négative sur le comportement futur du capteur. Il faut au moins 24 heures pour assurer une bonne saturation de la pierre poreuse du tensiomètre.

2.2.4.4.2 Cavitation du tensiomètre

La deuxième phase est la cavitation : durant ce processus le capteur mesure des valeurs de succions (pressions négatives) des échantillons de sols suffisamment sec ($S_{\text{échantillon}} > 2\text{MPa}$). L’objectif est de provoquer la cavitation pendant les premiers cycles saturation – cavitation. Après la cavitation le capteur ne peut pas être utilisé pour des mesures. On le met dans l’eau libre pour que sa valeur revienne à zéro. Il faut entre 1 et 3 heures pour arriver à la

cavitation du capteur. Ce temps est donné à titre indicatif, car il dépend du type d'échantillon et des conditions de mesure (à l'air libre, ou dans une enceinte bien fermée).

2.2.4.4.3 Réponse du tensiomètre après la cavitation

Après la cavitation du tensiomètre, il faut enlever le tensiomètre en contact avec l'échantillon de sol, bien nettoyer la surface de la pierre poreuse des éventuelles traces de sol et le mettre dans l'eau libre. La réponse du tensiomètre après la cavitation dépend du temps qu'on prend pour le mettre dans l'eau libre.

La meilleure solution est de surveiller le tensiomètre et de le mettre dans l'eau libre immédiatement après la cavitation. Dans ce cas, on observe que la valeur affichée du tensiomètre descend de -100 kPa à 0 en quelques minutes ; la courbe (courbe plus épaisse) du tensiomètre N-5 dans la Figure II - 18 illustre bien ce phénomène. L'explication est simple : très peu d'air a pénétré dans les pores de la pierre poreuse juste après la cavitation.

Si on laisse un certain temps le tensiomètre en contact avec l'échantillon de sol après la cavitation, la réponse du tensiomètre risque d'être longue, car l'air peut continuer à pénétrer dans la pierre poreuse par diffusion et occuper un plus grand nombre de pores. Dans ce cas quand on place la pierre poreuse dans l'eau libre il faudra beaucoup plus de temps pour que l'eau remplisse à nouveau les pores de la pierre poreuse ; un exemple est donné (capteur N-1) sur la Figure II - 18.

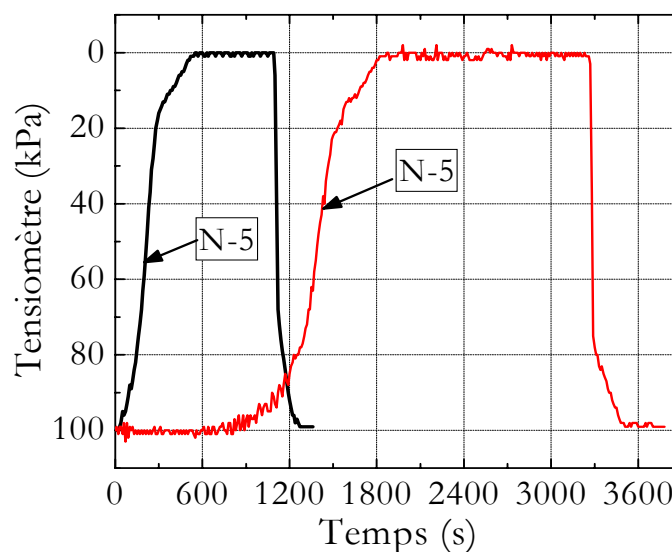


Figure II - 18. Réponses du tensiomètre après la cavitation

Un temps trop long après la cavitation peut entraîner une désaturation complète de la pierre poreuse, ce qui causerait une perte de la performance ultérieure du tensiomètre.

On a observé ce phénomène après une mesure dans le temps avec les tensiomètres N-1 et N-2. Ils sont restés pendant plus d'un jour en contact avec l'échantillon de sol après la cavitation et en conséquence leur performance ultérieure après la re-saturation a chuté considérablement, ce qui nous a obligé à changer les pierres poreuses et à recommencer à nouveau le processus de leur mise en service.

2.2.4.4.4 Application du vide

La troisième phase est l'application du vide : durant ce processus, le capteur se trouve dans la cellule de saturation où on applique le vide. L'objectif principal est d'enlever l'air de la pierre poreuse et du réservoir d'eau pour que le capteur recommence à fonctionner normalement. C'est un processus important, car il conditionne le comportement futur du capteur. On estime à 3 heures au minimum l'application du vide pour être efficace.

Ces trois processus indispensables sont suivis l'un après l'autre. Ils sont présentés sur la Figure II - 19. On baisse la pression et on commence les mesurent qui durent 7,5 heures (0 – 7,5 h) ; on applique le vide (7,5 – 11,5 h) ; on sature la pierre poreuse du tensiomètre (11,5 – 50 h) et pendant la saturation on fait une descente – montée en pression (4000 – 2500 – 4000 kPa).

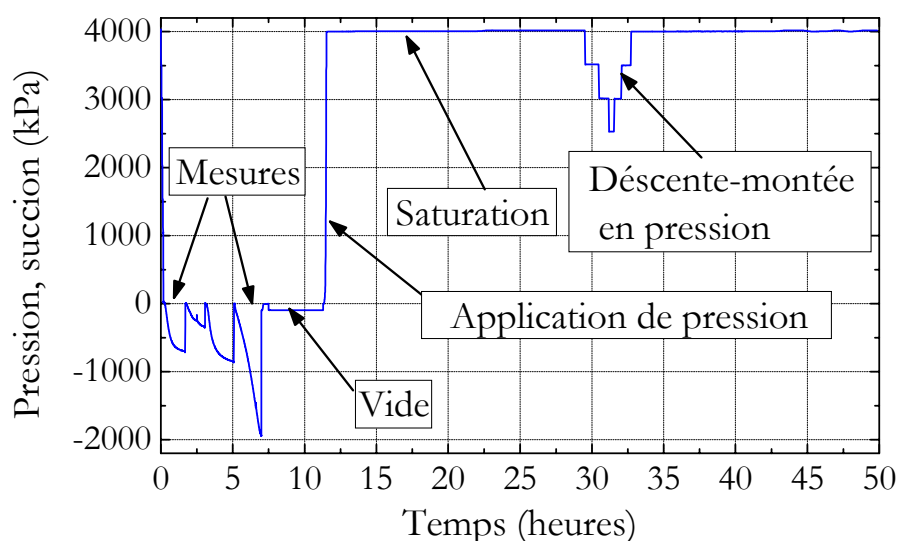


Figure II - 19. Cycle saturation – cavitation d'un tensiomètre

2.2.4.5 Importance de l'étalonnage

Il est évident que l'étalonnage joue un rôle important car on passe d'une valeur de tension mesurée en mV à une valeur correspondante de pression ou de succion en kPa. L'étalonnage de chaque capteur est fait dans le sens des pressions positives à l'aide d'un appareil CPV (contrôleur pression volume) et d'un capteur – étalon de pression. On a utilisé ce capteur de précision pour s'assurer des valeurs appliquées avec l'appareil CPV. L'appareil CPV (GDS) utilisé a une valeur maximale d'application de pression de 64 MPa et le capteur interne n'a pas une précision satisfaisante.

La gamme de pression étalonnée est de 0 à 2000 kPa avec un pas de 200 kPa dans l'ordre croissant. On obtient toujours une courbe de tendance linéaire (Figure II - 20 a, b). Sur la Figure II - 20 on a présenté deux étalonnages successifs du capteur N-3.

Concernant la fréquence des étalonnages, certains auteurs (Tarantino 2002) préconisent de faire un étalonnage avant chaque utilisation du capteur. Nos résultats et notre expérience ont montré que ces fréquences d'étalonnages peuvent être diminuées à une sur deux ou trois mesures.

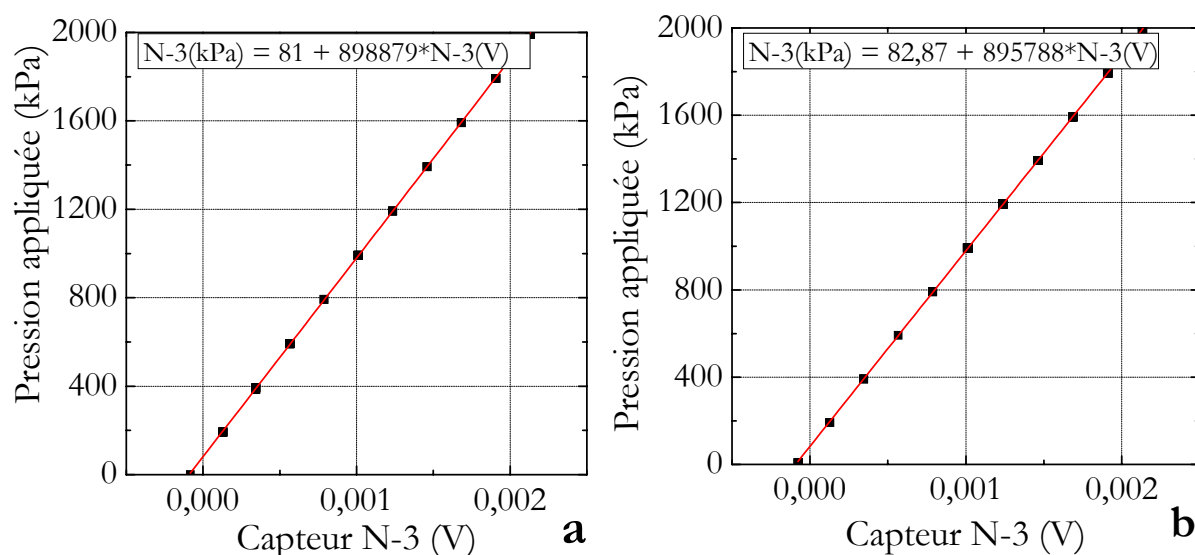


Figure II - 20. a, b) Deux étalonnages successifs d'un tensiomètre

Cet étalonnage sert à calculer les valeurs mesurées du tensiomètre durant les essais de mesures directes de la succion. On suit ce procédé, qui consiste à trouver les valeurs indirectement, car on ne peut pas faire un étalonnage dans le sens des pressions négatives (des dépressions). Cependant ce diaphragme en métal doit avoir normalement la même

courbure des deux côtés, du fait de son élasticité. Selon une étude de Tarantino (2003) ce raisonnement est valable. Il a effectué des étalonnages du diaphragme de capteur dans le sens de la dépression et le résultat obtenu de cet étalonnage « propre » était le même que celui calculé à partir des valeurs de pressions positives.

2.2.4.6 Effet de la température

Tous nos essais expérimentaux et nos expériences avec les tensiomètres sont réalisés dans un laboratoire climatisé, avec une température ambiante constante de 20 °C. Cependant dans une perspective de les utiliser en conditions in situ, il était indispensable de faire des tests pour étudier l'influence de la température. La gamme de température considérée est de 20 à 32 °C.

Le dispositif expérimental utilisé est simple : la petite cellule de saturation avec le tensiomètre était plongée entièrement dans un bain thermostaté dont la température de l'eau était contrôlée à l'aide d'un thermostat. On augmentait pour les tests la température avec un pas d'un degré.

On a effectué quelques tests à différentes pressions positives maintenues constantes pendant toute la durée du test. On observe qu'une augmentation de la température engendre une augmentation de la valeur de pression. Ceci avec une relation linéaire (Figure II - 21). Pour chaque montée en température de 1°C on observe une augmentation de 1kPa en pression. On obtient ainsi l'expression d'étalonnage :

$$N_A = N_A^{20^\circ\text{C}} + 0,997*(T - T^{20^\circ\text{C}})$$

N_A – : valeur du tensiomètre A à température ambiante (ou du sol) ;

$N_A^{20^\circ\text{C}}$: valeur du tensiomètre A à la température de 20°C ;

T : température ambiante (ou du sol) ;

$T^{20^\circ\text{C}}$: température de référence 20°C.

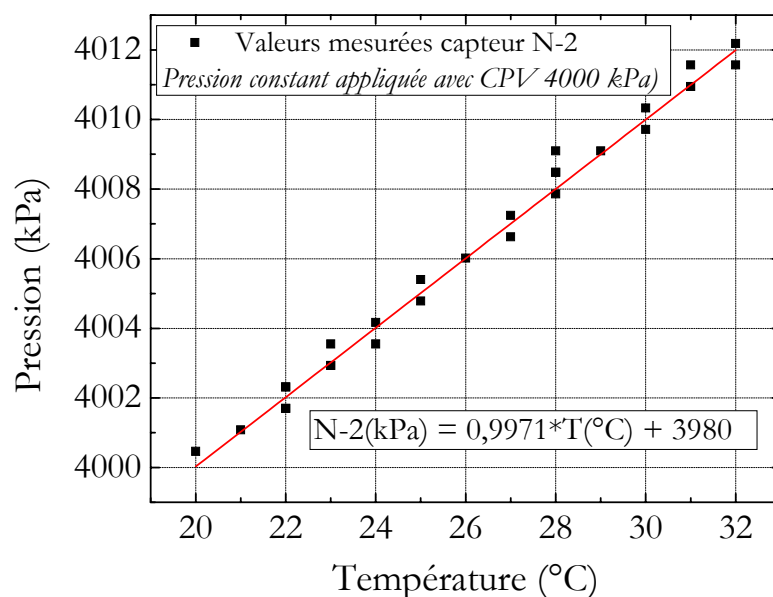


Figure II - 21. Influence de la température sur le tensiomètre

Ces résultats ont été utilisés ultérieurement pour le dépouillement des mesures in situ. Le choix de l'intervalle de température de 20 à 32 °C correspond aussi aux prévisions de la température dans le sol pendant la saison chaude de l'année. Dans ce cas le tensiomètre subirait les variations de la température du terrain et les cycles journaliers.

2.2.4.7 Précision de l'acquisition et de l'alimentation

Pour la première série de mesures on n'avait pas d'acquisition automatique et on se contentait de noter les valeurs à un intervalle de temps défini. Par la suite on a utilisé pour l'acquisition des données un multimètre HP qui garantissait une précision suffisante dans la gamme des valeurs mesurées par les tensiomètres. Ces valeurs sont de l'ordre du millivolt et la précision du multimètre permet de bien appréhender le changement de ces valeurs.

L'alimentation des tensiomètres joue aussi un rôle important car il doit assurer un signal stable, continu et lisse. La valeur de l'alimentation pour les tensiomètres est de 10V. Il faut surtout éviter les sauts de tension, c'est-à-dire les valeurs singulières.

Dans un premier temps, on a utilisé une alimentation qui n'était ni très précise (de l'ordre de 1/100^{ème} de Volt) ni très stable, et ces imprécisions et instabilités se répercutaient sur les différentes courbes des valeurs du tensiomètre (Figure II - 22). Les courbes avaient bien

une allure normale, mais on observait une petite oscillation continue, liée principalement à la stabilité de l'alimentation.

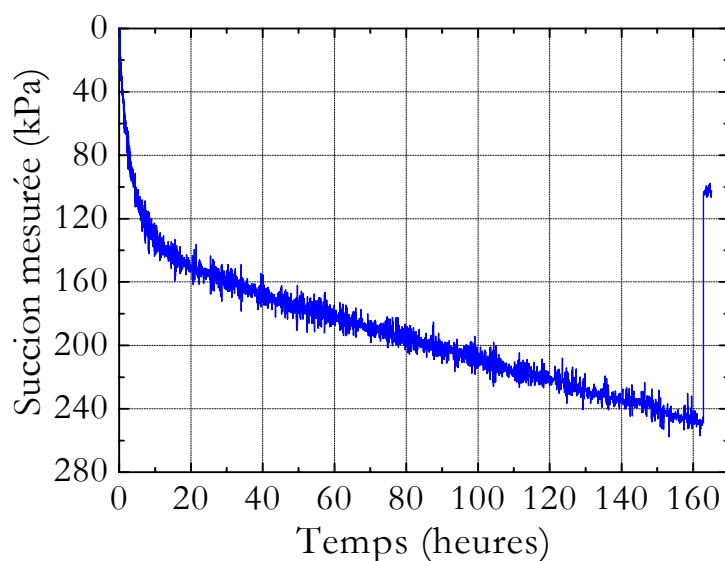


Figure II - 22. Oscillation liée à la précision d'alimentation

Avec utilisation d'une autre alimentation d'une précision de 1/1000^{ème} de Volt, ce problème gênant a disparu : les courbes obtenues étaient bien lisses et on n'a plus observé de sauts dans les valeurs mesurées.

2.2.4.8 Temps nécessaire d'application du vide

Après chaque cavitation ($s = -100$ kPa), on laisse le capteur dans l'eau libre jusqu'à ce que sa valeur revienne à zéro. Une fois la valeur zéro atteinte, on met le capteur dans la cellule de saturation et on applique le vide à l'aide d'une trompe à eau.

Au moment de l'application du vide avec une trompe à eau, la pression descend rapidement à -97 – -99 kPa (Figure II - 23) : on arrête alors le vide et la valeur du tensiomètre revient à zéro ; on applique à nouveau le vide et la valeur tombe à presque -100 kPa.

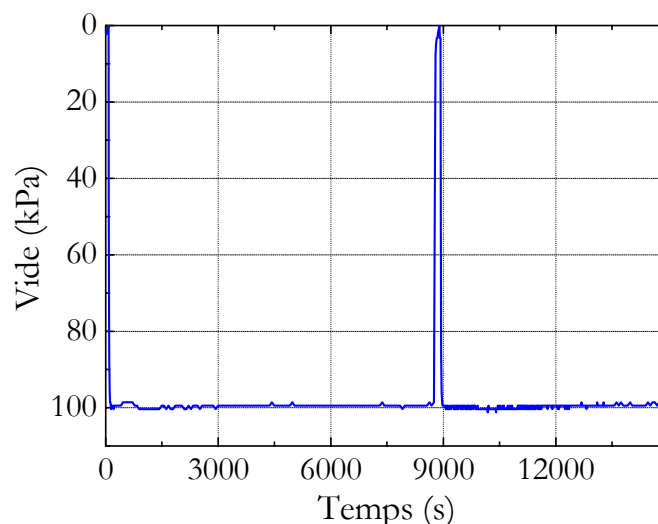


Figure II - 23. Application du vide – tensiomètre N-6

C'est un processus important pour la suite de la saturation. Au cours des différents cycles de vide, on a essayé différents temps d'application allant de 2 à 4 heures. On estime à environ 3 heures la durée du temps nécessaire pour assurer à la fois l'extraction de l'air dans la pierre poreuse et dans le réservoir d'eau. L'application du vide améliore la désaération de l'eau dans la cellule.

2.2.4.9 Effet de la colle

On a remarqué cet effet pendant la première phase du développement du tensiomètre. Comme on a expliqué précédemment, la première colle utilisée ne pouvait pas répondre aux deux des trois exigences demandés : l'humidité permanente et les hautes pressions de l'ordre de 4 MPa.

Après les premiers cycles saturation – cavitation du tensiomètre N-0, on a observé une chute importante des valeurs maximales mesurées (les valeurs maximales ont chuté à environ 400 kPa). Cette perte était irréversible et il a fallu trouver la colle appropriée pour éliminer ce défaut. La Figure II - 24 montre une comparaison des cycles saturation – cavitation réalisés avec le même tensiomètre avant et après le changement de la colle. On remarque une amélioration très nette.

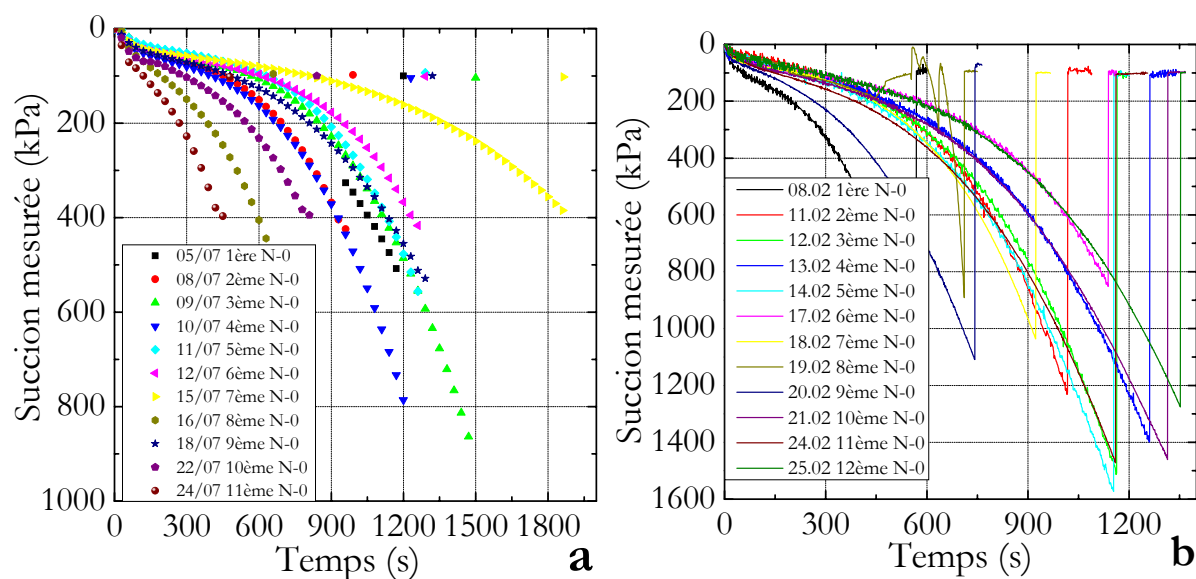


Figure II - 24. Cycles de cavitations tensiomètre N-0 a) avant ; b) après changement de la colle

2.2.5 Mesure des tensiomètres dans le temps

Les capteurs étant développés pour suivre la succion au laboratoire et in situ, il paraît important de savoir leurs durées de suivi. On a utilisé deux tensiomètres et la grande cellule de saturation à cette fin. On a compacté directement dans la cellule un échantillon de limon de Jossigny à une valeur de succion proche de 120 kPa.

L'échantillon n'était pas très bien compacté, et présentait une certaine hétérogénéité de teneur en eau qui explique la durée de stabilisation des mesures (presque 2 jours). La chute des valeurs de 120 à 132 kPa s'explique par une ouverture du couvercle supérieur de la grande cellule de saturation pour faire une vérification de la teneur en eau (Figure II - 25). Cette manipulation eu pour conséquence une augmentation des valeurs mesurées, mais elle nous a permis de vérifier la réponse immédiate des deux capteurs.

Les résultats (Figure II - 25) ont montré que les tensiomètres étaient capables de mesurer en continu la succion du sol pendant au moins deux semaines (16 et 18 jours).

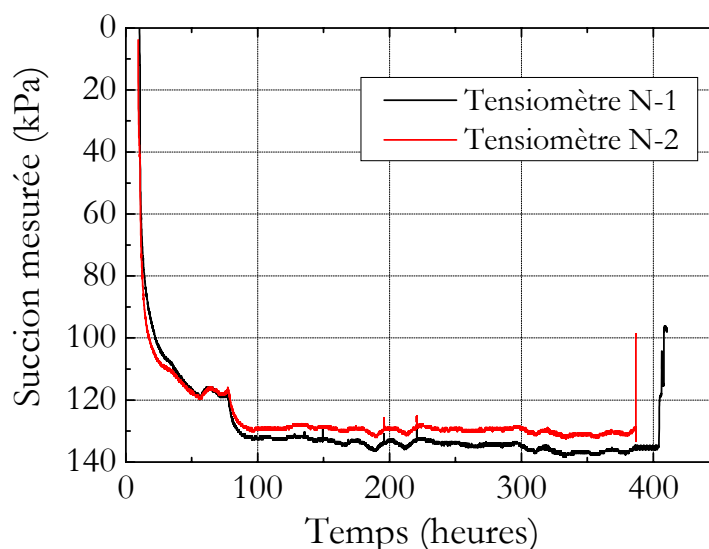


Figure II - 25. Mesure de la succion dans le temps avec deux tensiomètres

2.2.6 Procédure recommandée pour la mise en service du tensiomètre

Cette procédure représente une description détaillée des différentes opérations à suivre.

- ⇒ Traitement préliminaire du tensiomètre (2-3 jours), qui se présente à ce stade comme un capteur classique de pression. Application des cycles de pressions d'air jusqu'à 700kPa et des cycles de pressions d'eau jusqu'à 2000 kPa ;
- ⇒ Monter jusqu'à une pression de 4 MPa et laisser le capteur sous pression pendant 2-3 jours. Effectuer entre temps 2-3 étalonnages du capteur dans l'intervalle des pressions 0-2000 kPa et par pas de 200 kPa ;
- ⇒ Confirmation du bon fonctionnement du capteur sur la base des résultats des étalonnages effectués précédemment ;
- ⇒ Collage de la pierre poreuse sur le corps du capteur, avec un temps minimum de 24 heures pour assurer l'efficacité du collage ;
- ⇒ Nettoyage de l'intérieur de la petite cellule de saturation (eau et impuretés possibles) ;
- ⇒ Placer le tensiomètre dans la petite cellule de saturation ;
- ⇒ Mettre le tensiomètre sous vide pour aspirer l'air des pores de la pierre poreuse (temps d'application de vide : supérieur à 2 heures) ;
- ⇒ Casser le vide, faire entrer de l'eau désaérée à moitié de la cellule de saturation, tout en évitant que l'eau se mette en contact avec la pierre poreuse sèche ;

- ⇒ Appliquer à nouveau le vide pour permettre l'extraction d'air et des bulles d'air piégés dans l'eau (temps d'application du vide : au moins 1 heure) ;
- ⇒ Faire la saturation de la pierre poreuse en l'immergeant progressivement dans l'eau et laisser la possibilité à l'air de s'échapper (temps d'immersion : au moins 20 minutes) ;
- ⇒ Immerger complètement la pierre poreuse du tensiomètre, l'ensemble étant toujours sous vide, pendant au moins 1 heure ;
- ⇒ Arrêter le vide, remplir complètement d'eau désaérée la petite cellule de saturation et la connecter au CPV. Appliquer la pression par palier jusqu'à 4 MPa et laisser le tensiomètre sous cette pression pendant 48 heures ;
- ⇒ Faire la première cavitation du tensiomètre et refaire une re-saturation. Appliquer des descentes et des montées en pression (4000-2000-4000 kPa) pendant la saturation. Ces cycles de pression favorisent la dissolution des noyaux d'air dans l'eau ;
- ⇒ Appliquer 4-5 cycles de cavitation – saturation pour augmenter la performance du tensiomètre ;

Après cette longue procédure, le tensiomètre devient opérationnel. Cependant, il faut toujours respecter avec le plus grand soin les consignes concernant son utilisation. C'est la seule garantie pour que le déroulement des mesures puisse être effectué pendant longtemps.

2.3 Dispositif de la mise en place du tensiomètre pour le suivi in situ

Il s'agit d'un dispositif qui a nécessité une réflexion minutieuse. Après sa conception, sa fabrication et la procédure de tests au laboratoire il a fallu le tester sur le terrain afin de découvrir d'éventuels problèmes et de trouver les solutions correspondantes.

On a vérifié le fonctionnement des appareils de mesure sous différentes conditions de température. On a réalisé des simulations d'acquisition et de transfert de données via le multimètre HP à l'aide d'un ordinateur pour s'assurer que le transfert des données était fiable et ne représentait pas le moindre risque de perte de données.

Finalement on est arrivé à la mise en place in situ du capteur qui s'est réalisée sans problème particulier. Le suivi de succion a duré dans le temps avec succès, ce qui atteste de l'efficacité du travail préalable de préparation. On présente les différentes étapes dans ce qui suit.

2.3.1 Dispositifs utilisés pour le suivi en place

On a choisi deux profondeurs de sol pour mettre en place les dispositifs : 25 et 45 cm. Le choix de ces deux profondeurs n'est pas fait au hasard. Le site sélectionné à Boissy le Châtel disposait de TDR et de sondes de température à différentes profondeurs. On a remarqué que la teneur en eau ne changeait presque pas en dessous de 70 cm et que l'épaisseur de la terre végétale ne dépassait pas les 20 cm. De ce fait le choix d'intervalle entre 25 cm et 70 cm nous a semblé le plus approprié. Notre choix s'est porté finalement sur les deux profondeurs 25 et 45 cm, car on pouvait avoir aussi les autres données du site à ces deux profondeurs.

Les éléments du dispositif utilisé sont les suivants (Figure II - 26) : deux tubes en PVC diamètre Φ 63 mm (1) et Φ 50 mm (2) et de longueurs différentes, un disque support obturateur (3), des joints d'étanchéité, deux anneaux équipés de joints d'étanchéité et de centrage Φ 63 mm (4) et Φ 50 mm (5), une rondelle en téflon et des vis de fixation.



Figure II - 26. Dispositif type utilisé in situ pour la mise en place du tensiomètre

- Le tube Φ 63 mm sert à protéger la mise en place du tensiomètre. Sa longueur est de 30 cm pour le dispositif à 25 cm et de 50 cm pour le dispositif à 45 cm de profondeur. Une extrémité du tube est solidaire d'une pièce métallique dont un des bords est en forme de biseau pour permettre une meilleure pénétration dans le sol. Il sert à créer un petit volume de sol « protégé » d'un éventuel écoulement d'eau du côté extérieure du tube Φ 63 mm et aussi à centrer l'autre tube de Φ 50 mm. Cette pièce métallique est collée au tube à l'aide de l'Araldite 2014.
- Le tube Φ 50 mm sert à fixer le tensiomètre. Sa longueur est de 32 cm pour le dispositif à 25 cm de profondeur et de 52 cm pour le dispositif à 45 cm de profondeur. Il est équipé d'une pièce métallique servant de support au tensiomètre avec une étanchéité appropriée. Le support métallique est collé au tube à l'aide de l'Araldite 2014. Ce tube avec cette pièce métallique vient s'insérer dans le bout de l'autre tube Φ 63 mm. Pour assurer l'étanchéité du contact entre le sol et le capteur on a utilisé deux joints sur le support métallique, qui se plaquent contre la pièce métallique du grand tube. La longueur du tube Φ 50 mm est supérieure à celle du tube Φ 63 mm pour deux raisons : garantir le centrage du petit tube par rapport au grand tube à l'aide de l'anneau et assurer la facilité du démontage de ce tube pendant le changement périodique du tensiomètre.
- Une rondelle en téflon permet de bloquer le tensiomètre dans son logement et d'assurer ainsi une surface plane au voisinage du capteur. Elle se place au bout du support métallique pour le tube Φ 50 mm. On fixe cette rondelle sur le support métallique à l'aide de vis en téflon.

- L'anneau Φ 63 mm se met à l'extérieur du tube Φ 63 mm. Il sert à assurer une stabilité du grand tube dans le forage de sol préalablement réalisé et à empêcher tout écoulement d'eau le long de l'espace compris entre le grand tube et le sol.
- Un autre anneau Φ 50 mm se fixe sur le tube Φ 50 mm. Il permet de garantir un centrage du petit tube par rapport au grand et d'assurer l'étanchéité de l'espace entre les deux tubes.
- Le disque support obturateur métallique joue un rôle important. Son poids assure un bon contact entre le capteur et le sol permettant une mesure fiable. Son joint assure l'étanchéité à l'intérieur du tube Φ 50 mm et il peut servir comme support pour d'autres charges si nécessaire.

2.3.2 Tests au laboratoire

On a commencé par tester au laboratoire le fonctionnement du dispositif. Les résultats négatifs au départ ont permis d'apporter des modifications et de le rendre opérationnel.

2.3.2.1 Fonctionnement du dispositif et résultats des tests

On a effectué des tests au laboratoire avec un dispositif-type pour voir le fonctionnement de l'ensemble (dispositif + capteur) et pour trouver le meilleur mode opératoire de mise en place. Il a fallu pour cela reproduire des conditions in situ. Ceci a été fait en préparant un petit massif de sol dans une boîte plastique.

2.3.2.1.1 Test en modèle réduit

On a commencé par la préparation d'un sol à une teneur en eau massique de 15-16%, qui correspond à une valeur de succion comprise entre 50 et 100 kPa. Ensuite, on a compacté directement ce sol par couche dans une boîte plastique (Figure II - 27). Le sol utilisé est le limon de Jossigny, qui a des caractéristiques mécaniques proches du sol in situ (limon des plateaux). On note que le sol a été préparé en plusieurs fois et que sa teneur en eau n'était pas toujours la même. A la fin on a couvert la boîte contenant le sol pour éviter l'évaporation et homogénéiser la teneur en eau.



Figure II - 27. Préparation du de sol

Une fois que le sol a été préparé à la teneur en eau désirée, on réalise un forage dans le sol de façon à insérer le tube Φ 63 mm, tout en gardant un petit espace entre le sol et le tube (Figure II - 28). Cet espace est ensuite bouché avec du sol de la même teneur en eau une fois que le grand tube a été mis en place. Enfin on insère le petit tube avec le tensiomètre à son bout jusqu'à ce qu'il soit en contact avec la surface du sol au fond du forage.



Figure II - 28. Forage réalisé

2.3.2.1.2 Premiers résultats

La Figure II - 29 présente les premiers résultats obtenus. On observe sur la Figure II - 29 a que la succion augmente rapidement jusqu'à une valeur élevée, supérieure à 1200, et le capteur cavite. Si l'on compare la succion maximale donnée par le tensiomètre avec celle estimée à partir de la teneur en eau du sol, on remarque que la succion mesurée est trop élevée. La Figure II - 29 b montre une courbe qui semble plus proche de la réalité. En effet la succion semble se stabiliser au bout de 4 jours (6000 minutes) à une valeur de 700 kPa, qui devait correspondre à la succion de sol estimée. Or d'après la teneur en eau de départ

on devrait avoir 50 à 100 kPa, on a donc arrêté la deuxième mesure (avant que le tensiomètre cavite), car elle ne correspondait pas avec la réalité. On voit ici que la mesure n'est pas fiable.

Une vérification appropriée a ainsi été menée, et elle nous a conduit à attribuer ce problème à l'opération de mise en place du tube extérieur. En effet, la procédure utilisée pourrait favoriser l'entrée d'air dans le forage malgré le colmatage ultérieur, augmentant ainsi la succion. C'est apparemment le cas pour les deux mesures présentés sur la Figure II - 29.

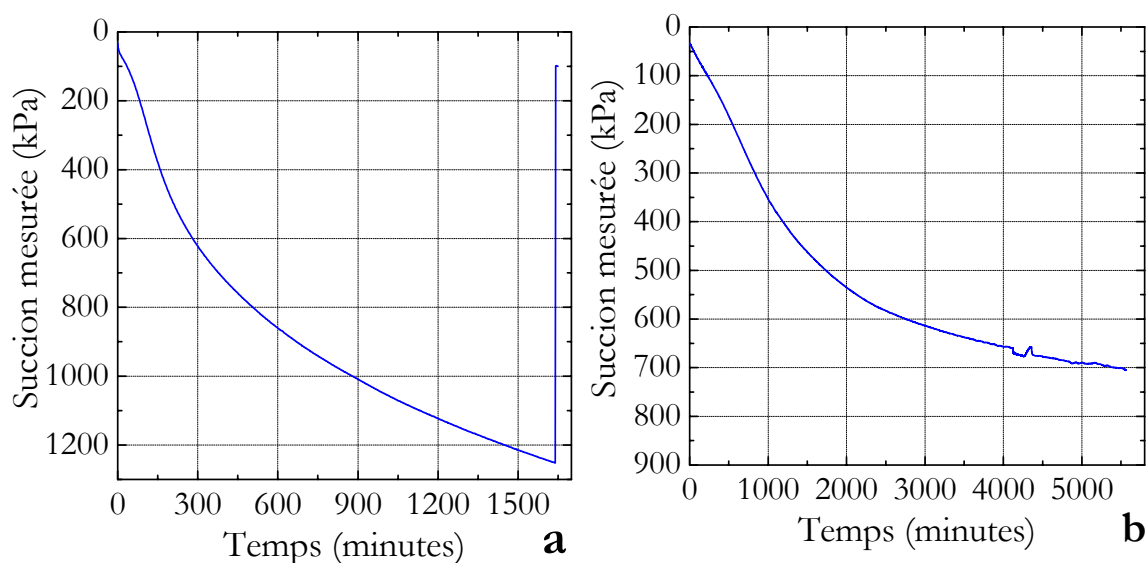


Figure II - 29. Mesures dans le temps avec le tensiomètre N-1

2.3.2.1.3 Améliorations portées au procédé

On respecte soigneusement la règle la plus importante : « éliminer l'air au niveau du contact sol – capteur, car il est l'ennemi le plus redoutable pour le déroulement normal de l'essai ». Après différents tests, on a défini une procédure adaptée permettant d'assurer un bon déroulement de la mesure. Avant de mettre en contact le tensiomètre avec le sol, on applique sur la surface de la pierre poreuse du tensiomètre une couche de pâte du même sol. Cette couche a une épaisseur minimale et elle n'influence ni la mesure, ni la teneur en eau du sol. Cette couche de pâte améliore le contact d'une part et d'autre part, elle assure une transition douce au début des mesures, particulièrement importante dans le cas des échantillons avec une succion élevée, à cause de risques de cavitation.

On a changé la façon de creuser le forage dans le sol. On a utilisé un tube Φ 63 mm équipé d'un système permettant de réaliser un forage dans le sol. On a creusé le sol à l'aide de ce tube en l'enfonçant verticalement et tout en le tournant horizontalement. On a réussi à avoir un forage de qualité en forme de cylindre. Cette procédure permet aussi de minimiser la perturbation du sol au niveau du contact avec le tube et au bout du tube.

Un autre dispositif permet d'araser le fond du forage et créer ainsi une surface plane. Le système utilisé est simple, il est formé d'un tube de dimensions Φ 63 mm et H 20mm et d'une trousse coupante métallique d'une longueur de 63 mm et d'une hauteur de 12 mm. On a fixé la trousse coupante dans le tube Φ 63mm suivant son diamètre. A l'aide d'une tige qui s'adapte sur le dispositif on donne un mouvement de rotation horizontale et on obtient ainsi une surface plane.

On a appliqué une fine couche de sol liquide à l'extérieur du tube Φ 63 mm, avant qu'il soit mis en place. Cette couche a servi à boucher les éventuels trous du sol le long de la paroi du forage et à assurer une cohésion entre le tube et le sol. Cette cohésion s'établit vite, car la couche de sol sèche rapidement et s'équilibre avec la teneur en eau du sol environnant (Figure II - 30 a). Une fois que le test a été terminé, on a vérifié le collage entre le sol et le tube, il était alors impossible de séparer le sol du tube, pour récupérer le tube intact on a du couper la boîte en deux.

Finalement on a paraffiné la surface du sol dans la boîte pour éviter les échanges avec l'atmosphère, qui auraient eu pour conséquence un séchage progressif du sol (Figure II - 30 b).



Figure II - 30. Test en modèle réduit

2.3.2.1.4 Résultats de mesures après les améliorations du procédé

Ce mode opératoire s’est avéré satisfaisant. La Figure II - 31 montre le résultat de ce test pour une période de 13 jours. La valeur mesurée s’est stabilisée après le premier jour. La légère diminution de la valeur absolue est due à l’homogénéisation de la valeur de succion à l’intérieur de la boîte, qui ne met donc pas en cause le bon fonctionnement du tensiomètre.

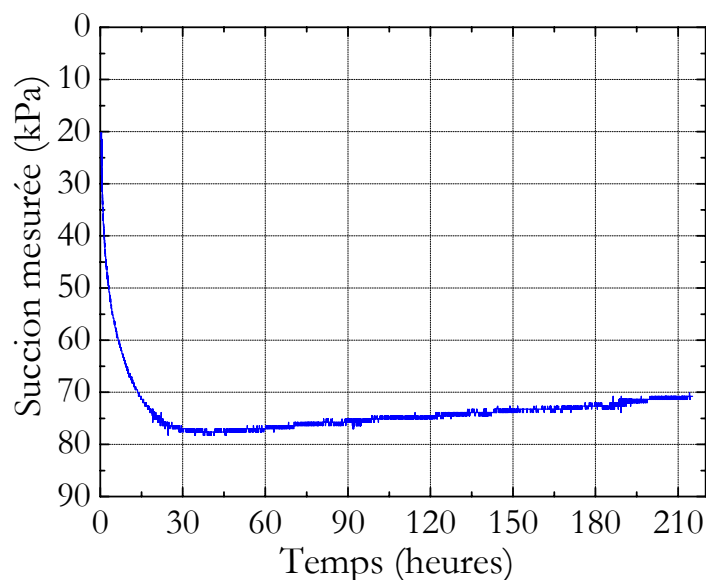


Figure II - 31. Mesure dans le temps – simulation des conditions in situ

On a effectué deux autres tests avec le même dispositif de mesure et avec deux tensiomètres différentes. Ces tests d’une durée de 2-3 jours ont servi juste à vérifier la mise au point du système et à s’assurer qu’en le répétant on aurait toujours la même réponse, indépendamment du tensiomètre utilisé.

Les graphiques (Figure II - 32 a, b) montrent que finalement on a réussi à créer un système étanche. La différence entre les valeurs mesurées est due au fait qu’on a laissé à l’air libre pendant quelques heures la surface du sol où on effectuait la mesure (Figure II - 32 b).

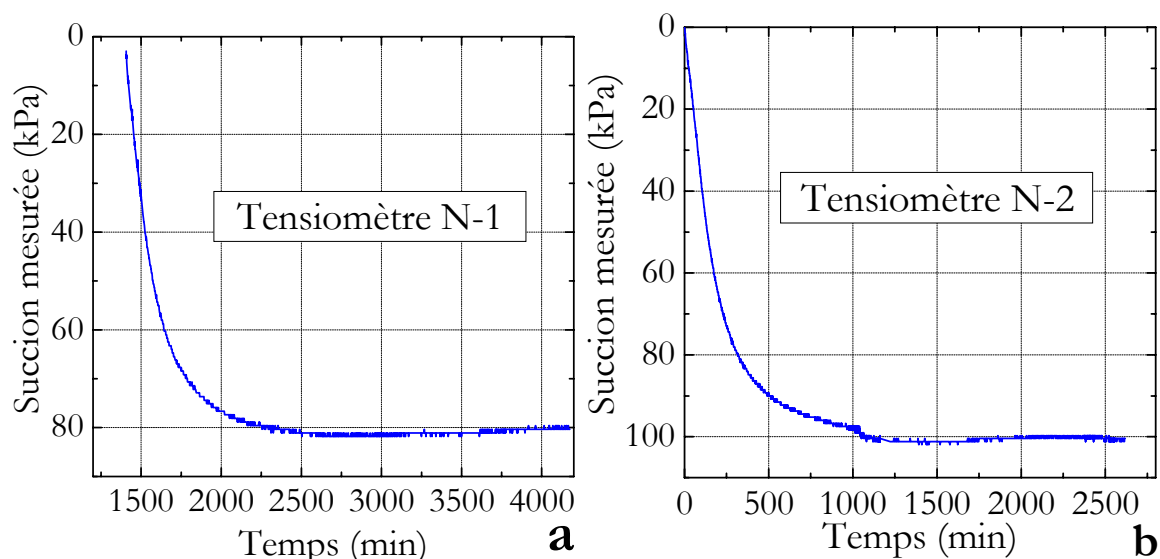


Figure II - 32. Deux tests de vérification de la mise au point du système

2.3.2.2 *Fonctionnement des appareils de mesure*

Pour l’acquisition et l’alimentation les appareils de mesures utilisés sont (Figure II - 33 a) : un multimètre HP (1) avec une carte d’acquisition (2), une alimentation (3) pour les tensiomètres, la station météo type Opus 208 (Figure II - 33 b) avec : une centrale d’acquisition (4) équipée d’un panneau solaire (5) et d’une batterie (6), trois sondes de températures (7) de sol, un câble série pour le transfert des données.

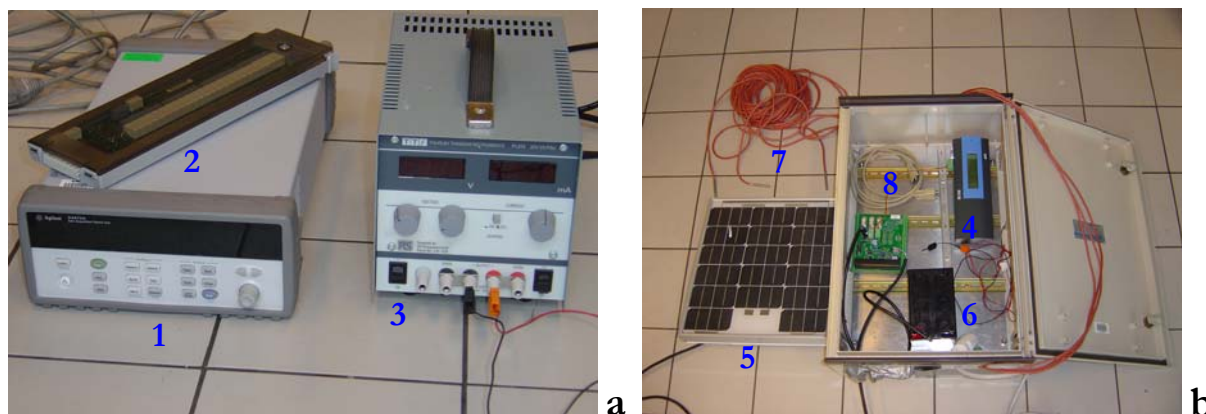


Figure II - 33. Les appareils de mesures utilisés in situ

Le multimètre HP peut mesurer plusieurs voies simultanément et garder dans sa mémoire interne un maximum de 50000 valeurs. Deux sondes de température ambiante étaient branchées sur deux voies de la carte d’acquisition du multimètre ainsi que l’alimentation des capteurs, afin de vérifier des oscillations possibles en fonction de la température.

On a choisi un intervalle de temps de 5 minutes entre deux mesures consécutives. Une fois les préparations terminées, on a lancé les mesures en notant l'heure de début. C'est à partir de cet instant que le multimètre commence à enregistrer les valeurs. Toutes les données stockées précédemment sont effacées à cet instant. Il faut donc être très prudent avec le maniement de cet appareil, pour éviter de perdre des données.

La centrale d'acquisition Opus a huit voies d'entrées et il a une grande mémoire interne. Le nombre de valeurs qu'elle peut enregistrer dépend de l'intervalle de temps choisi et des voies utilisées. On a branché deux sondes de température du sol. Le paramétrage est fait directement sur l'ordinateur à l'aide d'une interface. On peut choisir les voies utilisées, le temps et la fréquence d'échantillonnage. Une fois le paramétrage effectué l'appareil commence à enregistrer les données.

2.3.2.2.1 Test des appareils de mesures dans les conditions in situ

L'ensemble des appareils d'acquisition et d'alimentation (à l'exception de l'alimentation des capteurs) était placé dans une boîte plastique (Figure II - 34 a). Cette boîte et l'appareil d'alimentation des capteurs étaient placées dans un grand abri en bois (Figure II - 34 b). On a placé deux sondes de température ambiante à l'intérieur de la boîte et à l'intérieur de l'abri afin de suivre l'évolution de la température intérieure.

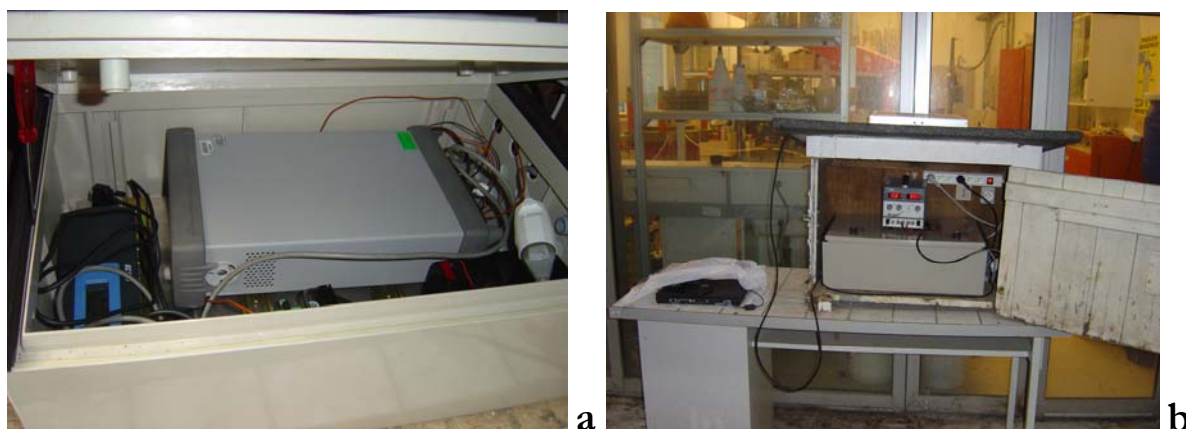


Figure II - 34. Test des appareils de mesures pour simuler les conditions in situ

Il était important de vérifier le fonctionnement des appareils de mesures et d'acquisition en les testant en conditions in situ pendant au moins quelques jours. La Figure II - 35 présente les variations de température ainsi que les variations de l'alimentation pendant deux jours de

mesures au mois d'avril. On a répété le test durant plus d'une semaine pour étudier la réponse dans le temps ; on n'a pas observé d'anomalies à part des oscillations dues aux changements de température.

Les valeurs de la température suivent bien les cycles journaliers (Figure II - 35). On remarque une amplitude assez importante entre les valeurs minimales et maximales de l'ordre de 10 °C.

On s'aperçoit qu'il y a une influence de la température ambiante sur l'alimentation des capteurs. Les valeurs de l'alimentation suivent de façons régulières les valeurs de la température ambiante, mais l'amplitude des oscillations est négligeable. Cependant un coefficient qui prend en compte l'effet de la température sur l'alimentation des capteurs sera utilisé pour corriger la valeur brute des tensiomètres.

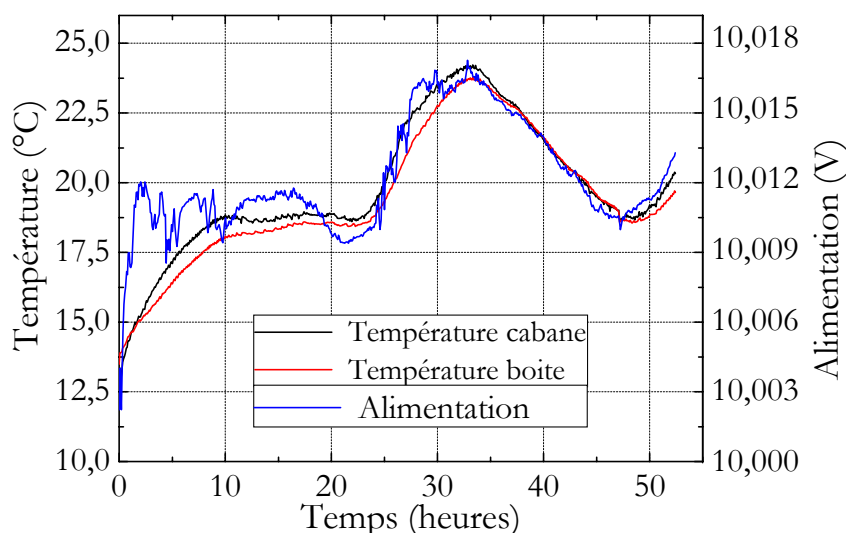


Figure II - 35. Variation de la température intérieure et de l'alimentation

2.3.2.3 Test de récupération des données enregistrées

Une fois les mesures terminées, on a récupéré les données enregistrées dans les deux appareils. Pour la centrale d'acquisition Opus, la récupération des données est rapide et sans précaution particulière. En revanche, pour le multimètre HP on est amené à suivre une méthode spécifique. Le multimètre est branché à l'ordinateur à l'aide d'un câble série. Pour télécharger les données, on utilise le logiciel de communication Terminal, qui sert à lire en continu des valeurs enregistrées d'un appareil de mesure. Le seul problème de cette

méthode de transfert est le nombre réduit des lignes qui peuvent être sauvegardées en une seule fois : limité à 244 lignes. Avec ce procédé, on était dans l'obligation de répéter la lecture plusieurs fois jusqu'à la récupération de toutes les données.

2.3.3 Test effectué in situ avec le dispositif

Le test au laboratoire a permis de découvrir un certain nombre de problèmes liés à la mise en place du dispositif. Cependant il paraît important de confronter l'ensemble aux conditions réelles en place. Le test a été effectué en avril 2004.

2.3.3.1 Réalisation du test in situ

Avant de commencer, on a enlevé la couverture végétale autour de l'emplacement choisi. On a utilisé le tube avec la trousse coupante pour réaliser le forage dans le sol. On avait fixé une tige à l'autre extrémité du tube permettant de creuser plus facilement et de maintenir la direction verticale durant l'enfoncement. Tous les 10 cm on retirait le tube pour enlever le sol à l'intérieur.

On observe sur la Figure II - 36 a que le sol extrait à l'aide du tube est resté en bon état grâce à sa teneur en eau massique élevée (18 %). Pour le dernier enfoncement et l'extraction du sol on a minimisé le nombre de tours avec le tube afin de réduire la perturbation du sol au fond du forage. On a creusé jusqu'à 1 cm au-dessus de la profondeur voulue, qui correspond à la marge prévue pour la finition par arasage du fond.



Figure II - 36. Test du dispositif de la mise en place in situ du tensiomètre

Une fois l'extraction du sol terminée, on a vérifié l'état de surface du fond du trou à l'aide d'une torche. La surface paraissait assez lisse, attestant de la bonne qualité du forage. Afin de perfectionner l'état de surface, on a introduit un dispositif d'arasage pour l'améliorer. Après avoir remonté le dispositif, on a nettoyé le fond à l'aide d'un petit extracteur équipé d'un long bras. On a inséré ensuite dans le trou le tube Φ 63 mm et on l'a enfoncé de 7 mm dans le sol ; on a fixé ce tube avec le support Φ 63 mm (Figure II - 36 b). A l'intérieur on a mis en place l'autre tube Φ 50 mm, le support Φ 50 mm et le disque support obturateur.

2.3.4 Mise en place du tensiomètre in situ

Le test in situ a éclairci les dernières points d'interrogations et a permis le lancement du suivi réel. Les deux profondeurs choisies étaient de 25 cm et 45 cm (paragraphe 2.3.1).

2.3.4.1 Transport du tensiomètre in situ

On a vu à travers les tests au laboratoire que le fonctionnement du tensiomètre est fortement lié à la variation de la température et à la qualité de saturation. C'est ainsi que pour le transport, on a protégé les tensiomètres en les mettant dans une boîte remplie d'eau désaérée et déminéralisée, et l'ensemble dans un bac plus grand rempli d'eau (Figure II - 37). L'eau utilisée avait la température du laboratoire (20°C).



Figure II - 37. Système de protection pour le transport

2.3.4.2 Schéma du dispositif mis en place

Une coupe schématique des dispositifs de mise en place (Figure II - 38) permet de mieux comprendre la procédure suivie.

Les longueurs de tubes Φ 50 mm et Φ 63 mm utilisés pour chaque dispositif sont les suivantes :

- *Dispositif mis en place à une profondeur de 25 cm :*

Longueur du tube Φ 50 mm – 33 cm, longueur du tube Φ 63 mm – 31 cm ;

- *Dispositif mis en place à une profondeur de 45 cm :*

Longueur du tube Φ 50 mm – 53 cm, longueur du tube Φ 63 mm – 51 cm ;

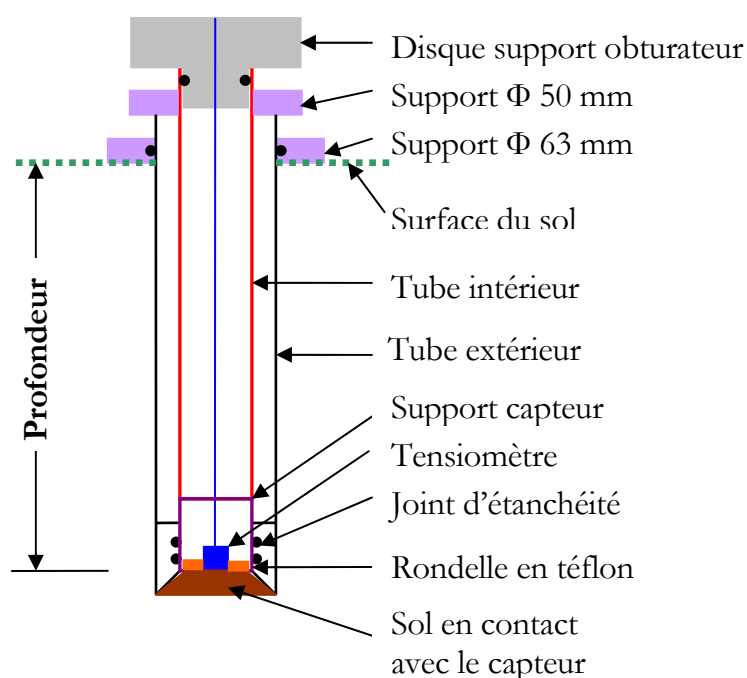


Figure II - 38. Coupe schématique de l'ensemble du dispositif mis en place in situ

2.3.4.3 Etapes de la mise en place in situ du tensiomètre

Ces étapes sont basées sur le test effectué in situ, on les récapitule ici avec quelques photos (Figure II - 39) illustrant la procédure :

- Enlever la couverture végétale sur une surface qui dépasse légèrement le diamètre du tube extérieur.
- Réaliser le forage dans le sol à l'aide du tube muni de la trousse coupante et équipé d'une tige. Ce tube joue le rôle d'une tarière.
- Enlever le sol à l'intérieur du tube tous les 10 cm d'avancement. Une attention particulière est accordée au dernier enfoncement pour minimiser la perturbation du sol.
- Après l'extraction du sol, vérifier l'état de la surface du fond.

- Araser et créer une surface du fond régulière à l'aide du dispositif de nettoyage.
- Appliquer (Figure II - 39 1) une fine couche de sol liquide à l'extérieur du tube Φ 63mm et le mettre en place (Figure II - 39 2). Cette couche sert à boucher les éventuelles fissures du sol et à assurer la cohésion entre le tube et le sol. Insérer dans le trou le tube Φ 63 mm et l'enfoncer de 7 mm dans le sol.
- Fixer ce tube avec le support Φ 63 mm.
- Fixer (Figure II - 39 3) le tensiomètre dans le tube intérieur Φ 50 mm à l'aide de la rondelle et des vis en téflon. Protéger la surface de la pierre poreuse du tensiomètre en appliquant une fine couche de sol liquide. Cette protection est nécessaire, car la mise en place du tensiomètre dans le tube Φ 50 mm nécessite un certain temps durant lequel la pierre poreuse n'est pas dans l'eau.
- Graisser les deux joints du support métallique du tube Φ 50 mm et aussi tous les autres joints afin d'assurer l'étanchéité du contact surface de sol – pierre poreuse du tensiomètre et d'empêcher une entrée éventuelle d'air.
- Insérer le tube Φ 50 mm (avec le tensiomètre à son bout) à l'intérieur du grand tube et le pousser jusqu'au contact avec la surface du sol. Une marque à l'extérieur de ce tube sert à vérifier et à contrôler la mise en contact.
- Centrer (Figure II - 39 4) le tube Φ 50 mm par rapport au grand tube en utilisant le support Φ 50 mm qui se plaque contre le pourtour du tube extérieur.
- Mettre en place (Figure II - 39 5) le disque support obturateur qui assure la fermeture du tube Φ 50 mm. La charge du disque assure en permanence le bon contact entre le capteur et la surface du sol. On isole hermétiquement le trou d'où sortent tous les câbles.
- Brancher (Figure II - 39 6) les deux fils du tensiomètre sur la voie correspondante du multimètre et les deux autres sur l'alimentation. Pendant cette opération les deux appareils (multimètre et alimentation) sont éteints.
- Allumer les appareils de mesures et commencer l'acquisition. On note l'heure du début de mesures.



Figure II - 39. Mise en place in situ du dispositif de mesure

2.3.4.4 Mise en place des sondes de température

On a mis en place, à côté des deux dispositifs, 3 sondes de température (Figure II - 40). Les profondeurs choisies sont : 1 cm, 10 cm et 25 cm. La sonde à 1 cm (1) permet de suivre les variations de la température presque à la surface du sol, juste en dessous de la pelouse. Les sondes à 10 cm (2) et à 25 cm (3) permettent de connaître la température à ces deux profondeurs et de définir la direction du flux de chaleur.



Figure II - 40. Placement des 3 sondes de température in situ

2.3.4.5 Réalisation d'un planning de mesures des tensiomètres *in situ*

On a mis en place les deux dispositifs dans deux forages séparés à quelques jours d'intervalle. Par la suite on a échangé (Figure II - 41) les tensiomètres, dans l'ordre de mise en place par des tensiomètres bien saturés ; les tensiomètres récupérés ont subi une procédure de cavitation – re-saturation au laboratoire.



Figure II - 41. Changement d'un tensiomètre *in situ*

La fréquence des changements des tensiomètres *in situ* a diminué au fur et à mesure. On a commencé par une semaine et on s'est aperçu que les capteurs fonctionnaient correctement et que la durée des mesures pouvait augmenter. On est passé ainsi à une durée de 10 jours, puis du 14 jours. Avant l'arrêt de l'expérimentation on a enregistré les mesures des deux tensiomètres durant respectivement 18 et 21 jours. Aucune anomalie n'a été enregistrée. Une vérification au laboratoire a été ensuite effectuée, montrant le bon état de fonctionnement de ces deux capteurs. A partir de cette observation on estime qu'en condition de succion faible (< 200 kPa), les tensiomètres mis en œuvre pourraient fonctionner pendant un mois.

2.3.4.6 Récupération des données

On récupère les données du multimètre chaque fois qu'on se déplace sur le site pour changer un tensiomètre. Cette opération dure en général plus d'une heure. Après la récupération des données, on réalise le changement du tensiomètre, et on enclenche une nouvelle acquisition en notant l'heure du début de mesures.

On charge aussi les données des trois sondes de température sur l'ordinateur portable, mais avec une moindre fréquence (mémoire plus importante de la station météo).

2.4 Développement de la colonne d'infiltration

Le développement de la colonne d'infiltration et de l'ensemble des accessoires nécessaires à sa mise en place a permis de réaliser des essais de perméabilité sur le limon peu plastique prélevé sur le site de Boissy le Châtel.

On a bénéficié dans ce développement du savoir faire acquis au laboratoire lors des travaux antérieurs (Loiseau 2001). Les tests de préparation ont concerné dans un premier temps le carottage du sol, car il fallait obtenir un échantillon de sol intact d'une grande dimension ($H = 20$ cm et $\Phi = 5$ cm). Une attention particulière était accordée à l'ensemble du système spécialement conçu permettant le transfert d'échantillons du carottier à la colonne.

On a procédé également à la vérification du contact entre le tensiomètre et le sol dans la colonne. Tous ces tests ont permis l'élaboration d'un mode opératoire adapté à ces essais.

2.4.1 Présentation de la colonne d'infiltration et de ses accessoires

Dans une colonne (Figure II - 42 a, b1) en inox (dimensions : $\Phi_{\text{extérieur}} 90$ mm, $\Phi_{\text{intérieur}} 50$ mm et $H 200$ mm), quatre trous (Figure II - 42 a) sont réalisés, espacés de 4 cm suivant la hauteur et décalés de 90° sur le plan horizontal. Ces trous servent de logement pour les tensiomètres (Figure II - 42 b4) qui se fixent à l'aide d'écrous (Figure II - 42 b5).

Deux embases oedométriques équipées de pierres poreuses (Figure II - 42 b2) se plaquent contre chaque extrémité de la colonne afin d'assurer l'étanchéité du système. Elles sont fixées à l'aide de quatre tiges filetées (Figure II - 42 b3). L'eau arrive par l'une des entrées de l'embase inférieure, et s'infiltré dans le sol progressivement. Ce choix, qui permet une remontée progressive de l'eau, empêche de piéger l'air dans les pores du sol.

D'autres accessoires sont utilisés dont un carottier ($\Phi_{\text{intérieur}} 50$ mm et $H 200$ mm) et un guide de centrage qui se place au-dessus de la colonne.

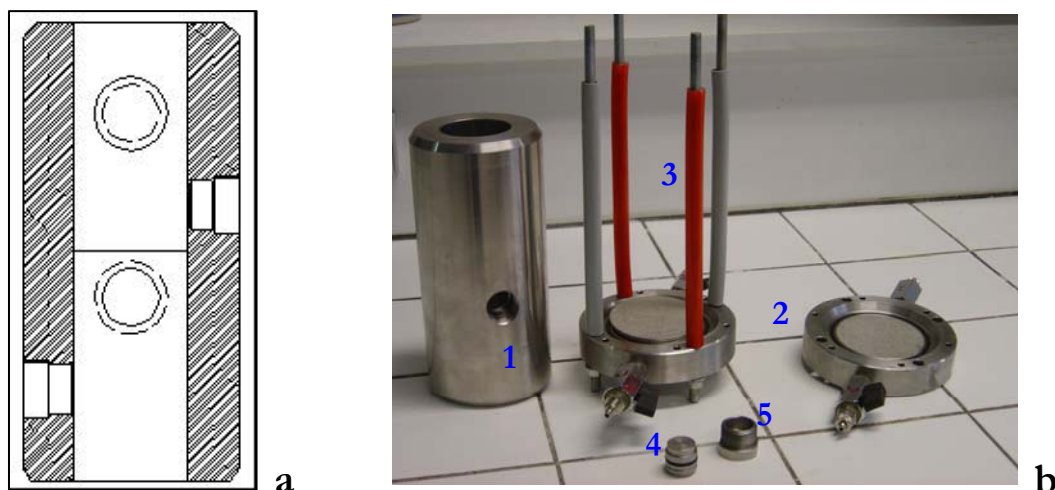


Figure II - 42. a) Coupe longitudinale de la colonne d'infiltration b) Eléments du dispositif

2.4.2 Préparation des échantillons

Les blocs avaient une teneur en eau naturelle de l'ordre de 14%, ce qui correspond à une succion faible (inférieur à 100 kPa). Donc un séchage a été nécessaire pour augmenter leur succion à une valeur proche d'1 MPa. Dès que la succion voulue a été atteinte on est passé à la dernière phase : le carottage de l'échantillon du sol.

2.4.2.1 Carottage et introduction dans la colonne d'infiltration

On a effectué deux premiers tests de carottage sur le limon de Jossigny compacté. Pour faciliter le glissement de l'échantillon dans le carottier, on a graissé l'intérieur du carottier. Après le carottage on a placé le carottier avec l'échantillon au-dessus de la colonne d'infiltration à l'aide d'un guide de centrage (Figure II - 43 a).

En utilisant une presse manuelle et un piston, on pousse l'échantillon de sol dans la colonne (Figure II - 43 b). Une vitesse faible de 1 cm/minute est appliquée. Durant cette opération, on peut vérifier une partie de l'état de la surface latérale de l'échantillon de sol après le carottage, à travers les quatre trous.

Après que l'échantillon ait été mis en place dans la colonne (Figure II - 43 c), on vérifie sa longueur finale. On a observé en général une différence de l'ordre d'1 mm, qui est négligeable.

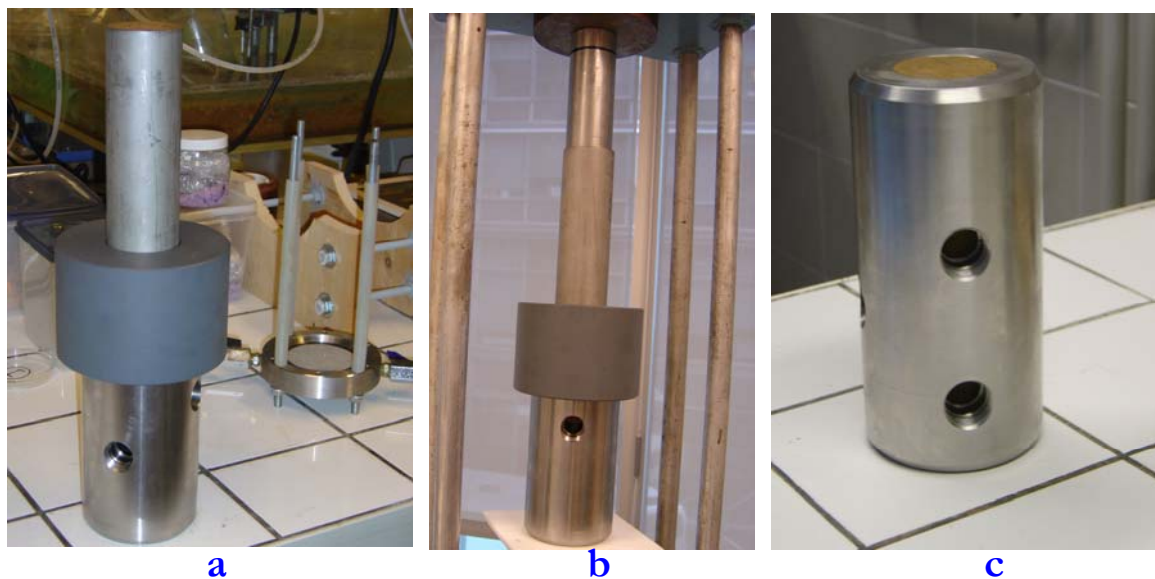


Figure II - 43. Passage carottier – colonne d’infiltration de l’échantillon de sol

2.4.2.2 Découpage des blocs de limon

A partir d’un des deux grands blocs prélevés à Boissy le Châtel (Figure II - 44 a) on a découpé trois petits blocs (30 x 8 x 8 cm). La teneur en eau relativement élevée (14 %) a facilité la tâche. Cependant la taille s’est effectuée très lentement afin d’éviter des cassures (Figure II - 44 b, c).



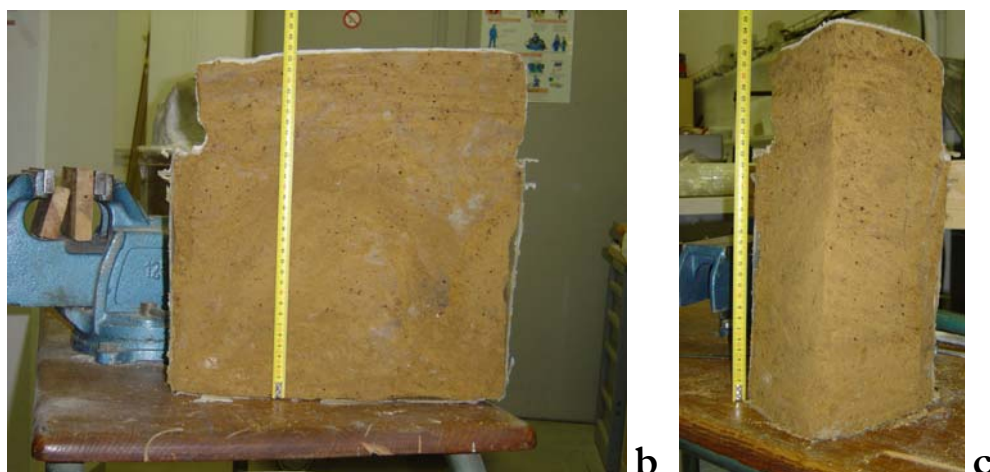


Figure II - 44. Découpage du grand bloc de limon

2.4.2.3 Séchage des blocs de limon

On a placé deux des trois petits blocs dans une enceinte fermée munie d'un couvercle. Le séchage des deux blocs s'est effectué en ouvrant le couvercle (Figure II - 45 a) pendant un intervalle de temps de 30 minutes par jour, et on refermait ensuite afin d'obtenir une homogénéisation de la teneur en eau à l'intérieur de chaque bloc de sol. L'objectif était de diminuer la teneur en eau de 14 % à 10 %.

Des vérifications de la teneur en eau ont été faites au cours du séchage. Sur la Figure II - 45 b on présente les deux échantillons après le séchage.



Figure II - 45. Séchage des blocs de limon

2.4.2.4 Carottage des échantillons de limon

Le carottage des échantillons de sol à une teneur en eau proche de 10 % a été plus difficile.

On a procédé par pas de quelques millimètres. On résume ici le procédé adopté :

- graisser le côté intérieur du carottier ;
- préparer une surface horizontale sur des blocs de limon du côté du contact avec le carottier ;
- assurer un bon centrage selon la verticale de l'ensemble carottier + bloc de sol dans la presse manuelle (Figure II - 46 a). Une perte du centrage signifie une cassure presque certaine à l'intérieur de l'échantillon ;
- commencer à carotter le sol (Figure II - 46 b) en diminuant le volume de sol autour du carottier ;
- enfoncer le carottier de quelques millimètres à l'aide d'une presse manuelle ;
- vérifier périodiquement la longueur de l'échantillon de sol dans le carottier (Figure II - 46 c) ;
- laisser une longueur dite de réserve de 3-5 mm en plus de la longueur de l'échantillon (elle pourrait servir pour l'ajustement en cas d'un possible tassement de l'échantillon) ;
- après le carottage on arase bien les deux surfaces de l'échantillon.
- on garde l'ensemble carottier + échantillon dans un film plastique afin d'empêcher le séchage de l'échantillon.



Figure II - 46. Carottage des échantillons de limon

On a vérifié la teneur en eau en prenant quelques échantillons de sol pendant le carottage et on a observé que vers le centre du bloc la teneur en eau était un peu plus élevée (0,5 % – 1,5 %). Ceci est probablement lié au séchage artificiel imposé.

2.4.3 Mise en place de l'échantillon de sol et des tensiomètres

Après le carottage l'échantillon doit être mis en place dans la colonne d'infiltration. En prenant des précautions nécessaires, on a réussi à glisser l'échantillon dans la colonne sans l'endommager. On ferme ensuite le système afin de permettre une homogénéisation de la teneur en eau au sein de l'échantillon.

Avant de placer les tensiomètres en contact avec le sol il a fallu aplanir la surface de contact qui était légèrement courbée car l'échantillon est cylindrique. Il ne reste alors qu'à mettre les tensiomètres en place.

2.4.3.1 Mise en place dans la colonne d'infiltration des échantillons

L'échantillon qui se trouve dans le carottier avec ses deux extrémités planes est prêt à glisser dans la colonne d'infiltration (Figure II - 47 a). Comme pour les tests, on utilise une presse manuelle et un piston qui pousse l'échantillon de sol à l'intérieur de la colonne (Figure II - 47 b). La vitesse faible permet de minimiser d'éventuelles densifications de l'échantillon de sol. On a pu observer à travers les trous latéraux l'excellent état de la surface latérale de l'échantillon de sol après le carottage.

La longueur finale de l'échantillon n'avait pas changé ; ce qui montre que l'échantillon de sol n'a pas subi de déformation pendant son passage dans la colonne (Figure II - 47 c). Après l'introduction de l'échantillon, on ferme hermétiquement la colonne : on bloque avec des bouchons les quatre trous et les deux extrémités de la colonne à l'aide des deux embases et des tiges. On isole l'échantillon pendant au moins 24 heures pour permettre une homogénéisation de la teneur en eau.

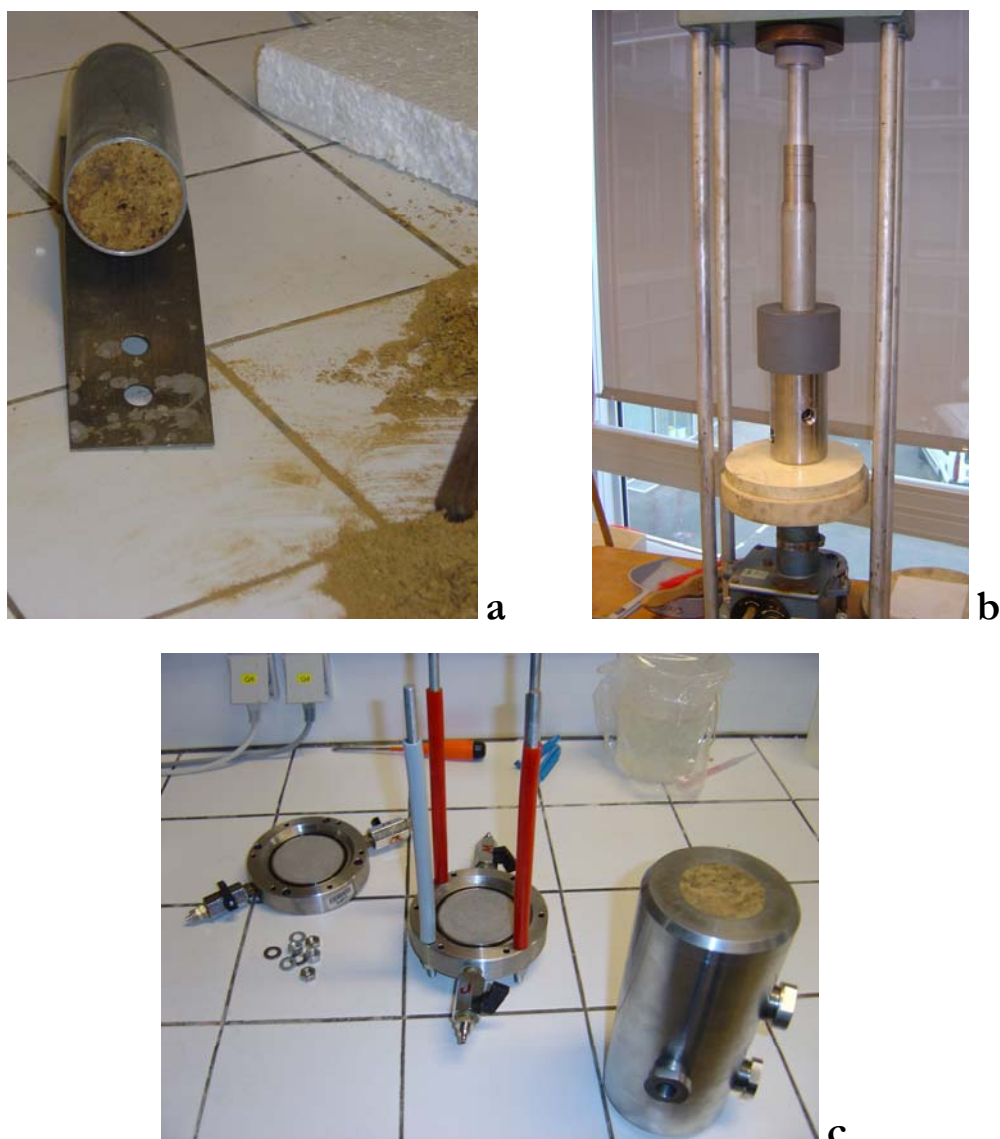


Figure II - 47. Etapes de mise en place de l'échantillon de sol dans la colonne

2.4.3.2 Mise en contact tensiomètres - sol dans la colonne d'infiltration

Après avoir aplani la surface correspondant aux quatre trous (Figure II - 48) à l'aide d'une spatule (la perte totale du sol liée à cette opération est inférieure à 1 g) et avant de mettre en contact le tensiomètre avec la surface de sol on applique une fine couche de sol liquide sur la pierre poreuse du tensiomètre (paragraphe 2.3.2.1.3). Cette couche assure un meilleur contact surface de sol – tensiomètre et permet un début de mesure progressif. On place dans le trou le tensiomètre, et on le bloque à l'aide d'un écrou. Pendant cette opération délicate, on surveille à chaque instant l'acquisition pour que l'écrou n'exerce pas d'efforts supplémentaires sur le tensiomètre. L'opération est répétée pour les trois autres tensiomètres (Figure II - 49).



Figure II - 48. Préparation de la surface de contact échantillon – tensiomètre



Figure II - 49. Montage général

2.4.4 Stabilisation des valeurs des tensiomètres et démarrage de l'essai

Dès que les tensiomètres sont mis en contact avec le sol les valeurs de mesure augmentent progressivement. Il faut attendre 24 heures pour obtenir une stabilisation des valeurs. On laisse le système encore quelques heures ainsi, afin de tester et de vérifier que les valeurs des tensiomètres ne changent plus. On peut commencer alors l'infiltration de l'échantillon en faisant arriver l'eau par l'embase inférieure. Au début de l'expérience on ouvre l'autre robinet de l'embase inférieure afin de la saturer. L'eau est placée dans un tube ouvert à la pression atmosphérique. L'évaporation d'eau est empêchée à l'aide d'une fine couche de soltrol. Le tube est équipé d'un mètre qui permet de suivre l'évolution de son niveau. La charge d'eau appliquée est très faible et son niveau se trouve à la même hauteur que l'embase supérieure de la colonne. On purge l'air des pores du sol qui monte progressivement vers le haut en ouvrant ponctuellement les robinets de l'embase supérieure. Les résultats de ces essais sont présentés dans le chapitre 3.

2.5 Dispositif assurant la mesure directe de la succion au laboratoire

Ce dispositif a servi à effectuer des mesures directes de la succion avec le tensiomètre sur différents échantillons de sol. Les résultats de ces mesures ont permis en particulier d'obtenir la courbe de rétention d'eau du limon de Boissy le Châtel. Cette courbe est obtenue en suivant le chemin de séchage des échantillons. Ils avaient une succion initiale très faible et pour nous c'était plus facile de contrôler le séchage des échantillons.

2.5.1 Système cellule + tensiomètre

C'est l'ensemble d'une cellule oedométrique modifiée et d'un tensiomètre qui est placé au même niveau de la surface de l'embase (Figure II - 50). Il se fixe à l'aide d'un écrou qui assure aussi son placement initial. Un moule cylindrique et un piston permettent d'assurer l'étanchéité de l'enceinte. De plus, le piston permet de maintenir le bon contact entre le tensiomètre et la surface de l'échantillon.

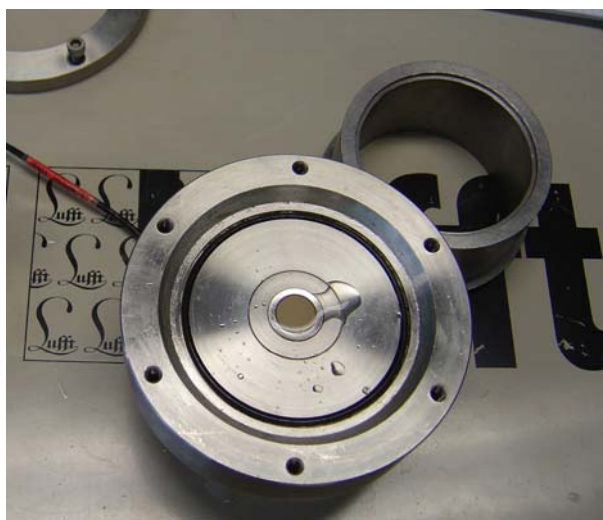


Figure II - 50. Eléments de dispositif de mesure

2.5.2 Préparation des échantillons de sol

Les échantillons de sol ont été préparés à partir d'un bloc de sol prélevé sur le site de Boissy le Châtel (Figure II - 51). Ce sont des petits échantillons (dimensions : Φ 8 mm et H 20mm) qui sont placés dans les carottiers. On a laissé les échantillons dans les carottiers pour mieux les protéger. On a utilisé trois échantillons pour les mesures directes de la succion afin d'obtenir plus de points pour la courbe de rétention d'eau.



Figure II - 51. Carottage des petits échantillons de limon

2.5.3 Réalisation de la mesure de succion avec le dispositif

Pour la réalisation d'un tel essai on suit les étapes suivantes :

- mettre le tensiomètre dans le logement prévu dans l'embase oedométrique ;
- s'assurer que la surface du tensiomètre est au même niveau que celle de l'embase ;
- protéger la pierre poreuse du tensiomètre pendant la phase de préparation en appliquant une fine couche de sol liquide (Figure II - 52 a) ;
- placer l'échantillon de sol au-dessus du tensiomètre (Figure II - 52 b) ;
- mettre en place le moule cylindrique ;
- fixer le collier de serrage, mettre en place le piston et mettre une charge au-dessus afin de permettre un bon contact tensiomètre – surface de sol ;
- suivre la mesure à l'aide d'un ordinateur ;
- attendre la stabilisation des valeurs mesurées par le tensiomètre ;
- arrêter la mesure en sortant l'échantillon de sol ;
- nettoyer la surface du tensiomètre et préparer la mesure suivante.

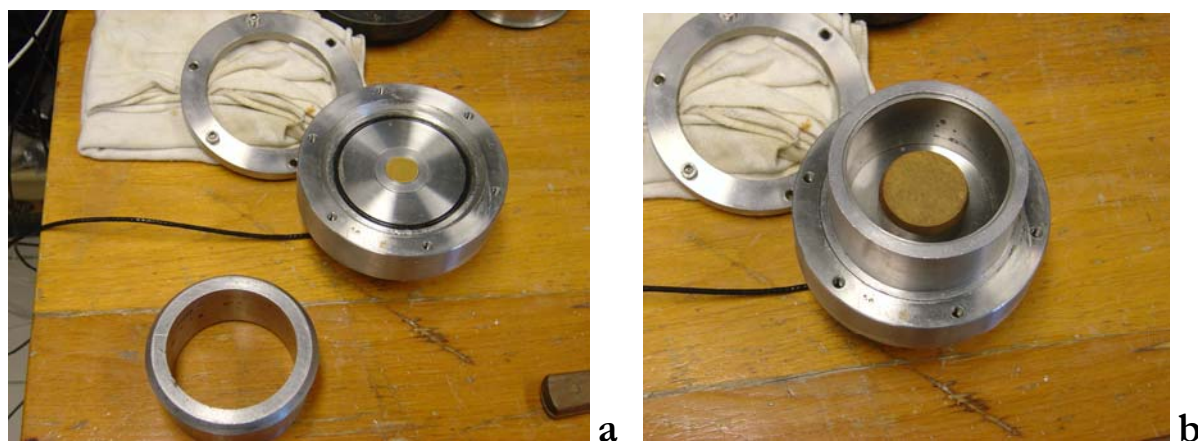


Figure II - 52. Enceinte pour la mesure directe de la succion

Normalement le temps de stabilisation dépend en particulier de la valeur de succion de l'échantillon. Une mesure sur un échantillon de sol à succion élevée prendra plus de temps que celle d'un échantillon à succion faible. Le résultat typique d'une mesure sera présenté dans le chapitre 3, qui traite des résultats expérimentaux.

2.6 Dispositif d'imposition de la succion par phase vapeur

Le principe de cette méthode consiste à placer un échantillon dans une atmosphère confinée à humidité contrôlée (dans un dessiccateur). Les transferts d'eau s'effectuent sous phase vapeur jusqu'à l'équilibre. La durée d'un essai est en moyenne de trois semaines dans le cas des échantillons d'argile verte.

Les échantillons d'argile verte ont en général une forme cubique. On a placé 2-3 échantillons dans un dessiccateur. Le dessiccateur est branché à l'aide d'un tube à une bouteille contenant une solution saline saturée dont on connaît la succion. Afin d'éviter l'arrivée des gouttes d'eau dans le dessiccateur, une autre bouteille servant de piège est placée entre le dessiccateur et la bouteille de solution saline saturée. Une pompe pneumatique permet d'assurer la circulation.



Figure II - 53. Dispositif d'imposition de la succion par phase vapeur

Le dessiccateur est situé à l'intérieur d'une enceinte thermostatée. Pour chaque solution choisie, correspond un degré hygrométrique constant. On pèse l'échantillon après le temps d'équilibrage (environ trois semaines) et on déduit sa teneur en eau correspondante.

On continue en imposant à l'échantillon un autre degré hygrométrique correspondant à une autre solution saline saturée. Ainsi on suit le chemin de séchage de l'argile verte en augmentant les valeurs de la succion imposée. Pour quelques échantillons qui sont arrivés à une valeur maximale de la succion, on a suivi ensuite le chemin de remouillage. La lenteur des échanges par phase vapeur demande un intervalle de temps important pour le déroulement de cet essai (au moins 6 mois dans notre cas).

2.7 Dispositif de détermination du volume d'un échantillon de sol

Ce dispositif a été utilisé pour mesurer les variations du volume des échantillons d'argile verte, qui ont servi pour la détermination de la courbe de rétention par phase vapeur. Pour chaque palier de succion imposée, une mesure du volume total de l'échantillon est réalisée par pesée hydrostatique dans le mercure qui est un liquide non mouillant. On réalise la mesure du volume total de l'échantillon à son arrivée à l'équilibre. Ces informations nous ont servi à trouver le lien entre la teneur en eau et le volume de sol correspondant.

2.7.1 Procédure de détermination du volume d'un échantillon de sol

Le volumètre à mercure (Figure II - 54 a, b) permet de mesurer le volume total des échantillons à partir d'une pesée hydrostatique dans le mercure avec une précision de 1/2000. Les éléments du volumètre sont : un bac rempli de mercure, une balance mobile, un flotteur équipé d'un témoin qui permet la liaison entre le bac de mercure et la balance.



Figure II - 54. Dispositif de détermination du volume d'échantillon d'argile verte

On place l'échantillon sur le plateau. On rajoute des poids (W_1) sur le plateau jusqu'à ce que le témoin de niveau du flotteur soit au contact de la surface du mercure (Figure II - 55 a). A l'équilibre (1^{er} équilibre), on obtient :

$$V_i \cdot \gamma_{hg} = W_f + E + W_1$$

Où :

- V_i : volume immergé
- E : poids de l'échantillon
- W_1 : poids qui permet la mise à l'équilibre (1^{er} équilibre)
- γ_{Hg} : poids volumique du mercure

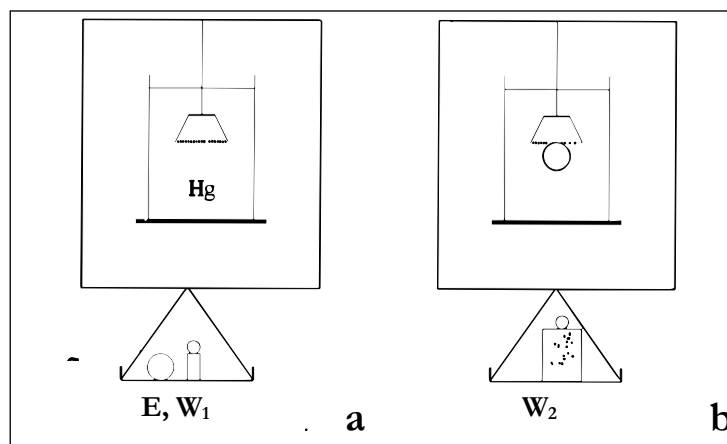


Figure II - 55. Schéma de détermination du volume d'un échantillon de sol

On immerge l'échantillon d'argile verte dans le mercure et on répète la même opération que précédemment (Figure II - 55 b). L'équation à l'équilibre (2^{ème} équilibre) s'écrit :

$$(V_i + V_E) \cdot \gamma_{Hg} = W_f + W_2$$

Où :

V_E : volume total de l'échantillon

W_2 : poids qui permet la mise à l'équilibre (2^{ème} équilibre)

Finalement à l'aide des deux équations précédentes on peut déterminer le volume total de l'échantillon :

$$V_E = \frac{W_2 - W_1}{\gamma_{Hg}}$$

2.8 Conclusions

On a déterminé les principales caractéristiques des deux matériaux utilisés, l'argile verte de Romainville et le limon de Boissy le Châtel. L'argile verte de Romainville est une argile très plastique ($I_p = 53,6 \%$; $W_l = 94,9 \%$; $W_p = 41,3 \%$). Le limon de Boissy le Châtel est un limon peu plastique ($I_p = 8,7 \%$; $W_l = 28,5$; $W_p = 19,8 \%$).

Un tensiomètre a été développé au laboratoire suivant l'exemple de celui de l'Imperial College. L'étude réalisée a permis dans un premier temps de détecter les différents problèmes soulevés et de trouver les solutions adaptées. Les effets mis en évidence permettent de mieux comprendre le fonctionnement du tensiomètre. On a comparé les réponses du tensiomètre entre les conditions classiques au laboratoire et les conditions in – situ simulées.

Dans un deuxième temps, sa fiabilité ne faisant plus de doute, une série de mesures directes de la succion au laboratoire a été réalisée qui a permis de connaître les capacités et la durée maximale de fonctionnement. Les mesures in - situ et les essais de perméabilité à l'état non saturé ont permis au tensiomètre de jouer le rôle principal et de démontrer sa fiabilité.

Le dispositif mis au point pour réaliser la mise en place in situ du tensiomètre était un autre développement indispensable. Au préalable, une mise au point au laboratoire, en conditions proches du terrain, a permis de corriger et d'écarter les problèmes rencontrés. Ensuite ce dispositif a permis la réalisation avec succès d'une série de mesures directes de la succion in situ pendant une période de deux mois (mai – juin 2004).

Le développement de la colonne d'infiltration fait suite à des développements antérieurs ayant été réalisés au laboratoire. Dans un premier temps, il a fallu tester le carottage des échantillons de sol et leur passage à l'intérieur de la colonne d'infiltration. Une précaution particulière a été prise pour la mise en contact tensiomètres – sol dans la colonne. Ensuite trois essais de perméabilité à l'état non saturé ont été réalisés.

Un autre développement qui mérite l'attention est le dispositif assurant des mesures directes de la succion. L'efficacité de ce dispositif a été testée sur le limon de Boissy le Châtel, en

condition du laboratoire dont les mesures sont à l'origine de la courbe de rétention d'eau du limon.

D'autres systèmes ont été utilisés, tel que le dispositif d'imposition de la succion par phase vapeur ou le dispositif de détermination de volume d'un échantillon d'argile verte. Ils ont permis de déterminer la courbe de rétention d'eau et les variations du volume correspondantes de l'argile verte.

3 ETUDE EXPERIMENTALE

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale. On fera une analyse des résultats des différents essais effectués au laboratoire et in situ.

On commence par la détermination des propriétés de rétention des deux matériaux utilisés : l'argile verte de Romainville et le limon de Boissy le Châtel. On détermine ensuite la perméabilité du limon à l'état saturé et non saturé. La perméabilité saturée est obtenue en utilisant un perméamètre à charge variable, alors que la perméabilité à l'état non saturé est déterminée par la méthode des profils instantanés. On termine avec les résultats des essais in situ concernant le suivi direct de la succion.

3.1 Détermination des courbes de rétention d'eau

On a déterminé pour chacun des matériaux étudiés la courbe de rétention d'eau en utilisant trois techniques différentes. Pour l'argile verte, on a utilisé la méthode osmotique et la méthode de contrôle de succion par phase vapeur. Pour le limon, on a choisi une autre méthode : les mesures directes de la succion à l'aide du tensiomètre.

3.1.1 Courbe de rétention de l'argile verte

On a utilisé deux méthodes pour obtenir la courbe de rétention d'eau de l'argile : la méthode osmotique qui couvre la plage de faibles succions et la méthode par phase vapeur qui complète avec des succions fortes (6,1 – 216 MPa).

3.1.1.1 Courbe de rétention de l'argile verte par la méthode osmotique

On a travaillé avec quatre succions différentes : 1, 2, 4 et 6,1 MPa. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure III - 1. On a utilisé deux échantillons pour chaque valeur de succion afin de s'assurer du résultat et d'obtenir une moyenne significative. Au Tableau III - 1 on montre les teneurs en eau finales de tous les échantillons.

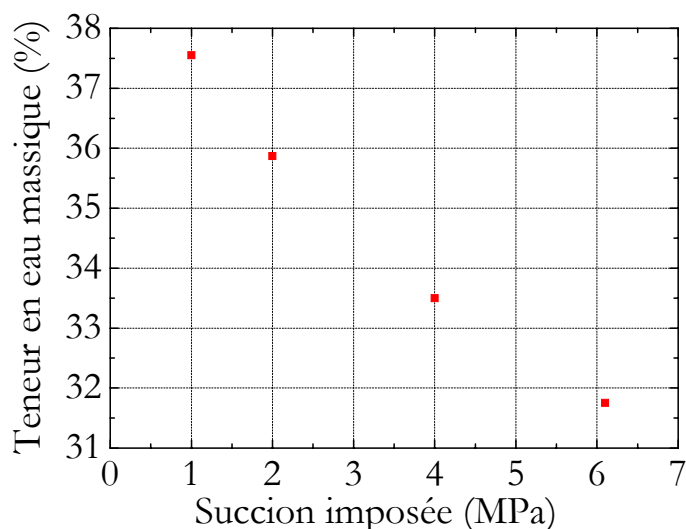


Figure III - 1. Courbe de rétention d'argile verte (méthode osmotique)

	S ₁ (1 MPa)	S ₂ (2 MPa)	S ₃ (4 MPa)	S ₄ (6,1 MPa)
W ₁	37,75	35,21	32,88	31,34
W ₂	37,35	36,52	34,11	32,17
W _{moyenne}	37,55	35,86	33,50	31,75

Tableau III - 1. Echantillons de l'argile verte – méthode osmotique

3.1.1.2 Courbe de rétention de l'argile verte par phase vapeur

Le dispositif d'imposition de la succion par phase vapeur (Figure II - 54) a permis de travailler sur plusieurs échantillons. A l'équilibre de chaque palier de succion imposée, on a réalisé des mesures du volume des échantillons à l'aide d'un volumètre à mercure.

3.1.1.2.1 Réalisation de l'essai

Les échantillons d'argile verte utilisés sont cubiques avec des dimensions comprises entre 1,5 et 2 cm. Au début de l'essai tous les échantillons sont à l'état naturel. Il correspond à une teneur en eau élevée de 38,6% et à une succion de 40 kPa. On commence l'essai en plaçant les échantillons dans 4 dessiccateurs à différentes succions (6,1 MPa ; 13,1 MPa ; 24,9 MPa et 82 MPa) imposées par différentes solutions salines (Tableau III - 2).

Pour le chemin de séchage les échantillons sont passés progressivement à chaque palier de succion dans l'ordre croissant. Par contre pour le chemin d'humidification, les échantillons

sont passés par un palier sur deux à chaque fois. Donc en résumé l'ordre complet du chemin séchage – humidification est :

6,1 → 13,1 → 24,9 → 82 → 113 → 136 → 216 → 113 → 24,9 → 6,9 MPa

Sel	Succion (MPa)	Humidité relative (%)
CuSO ₄ .5H ₂ O	6,1	95,7
Na ₂ SO ₃ .7H ₂ O	13,1	90,9
(NH ₄)SO ₄	24,9	83,5
Mg(NO ₃) ₂	82	55
K ₂ CO ₃	113	44
MgCl ₂	136	33
LiCl	262	15

Tableau III - 2. Relation humidité relative – succion pour les types de sels utilisés

3.1.1.2.2 Résultats obtenus

On présente les résultats obtenus suivant le chemin parcouru pour chaque groupe d'échantillons (deux groupes avec deux échantillons chacun et un autre avec trois échantillons). Les courbes de séchage sont présentées par des traits continus et les courbes d'humidification par des traits pointillés et de couleurs plus claires.

3.1.1.2.3 Courbe de rétention – échantillons 1 & 2

Les échantillons 1 et 2 ont suivi seulement le chemin de séchage (Figure III - 2). Ils sont partis de l'état naturel ($s = 40$ kPa et $w = 38,6\%$) et ont séché progressivement à des succions variant de 6,1 MPa à 216 MPa. Les paliers appliqués sont : 6,1 → 13,1 → 24,9 → 82 → 113 → 136 → 216 MPa. On remarque que les deux courbes sont confondues montrant d'une part la bonne précision des mesures et d'autre part, l'homogénéité du sol. On peut diviser les courbes en trois parties caractéristiques :

- la 1^{ère} partie où le changement de la teneur en eau est très important. Le point d'entrée d'air constitue la limite de cette partie ;
- la 2^{ème} partie où la baisse de succion provoque une diminution plus faible de la teneur en eau massique. Cette partie s'arrête à $s = 113$ MPa ;

- la 3^{ème} partie commence à des succions supérieures à 113 MPa. On passe à un autre régime avec une variation plus lente de la teneur en eau.

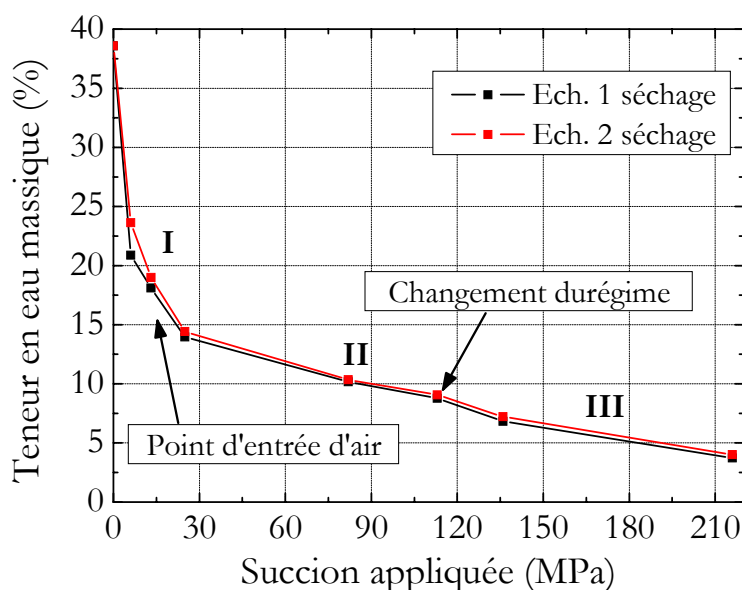


Figure III - 2. Courbe de rétention de l'argile verte (phase vapeur) – échantillons 1, 2

3.1.1.2.4 Variation de l'indice des vides et du degré de saturation – échantillons 1 & 2

La Figure III - 3 a présente les courbes qui donnent la relation entre l'indice des vides et la succion appliquée pour les échantillons 1 et 2. On observe un changement important de l'indice des vides entre l'état naturel et l'état final à une succion élevée de 216 MPa. On passe d'un indice des vides initial moyen $e_i = 1,02$ à un indice des vides final moyen $e_f = 0,34$.

On peut distinguer, comme pour la teneur en eau trois parties : une première partie caractérisée par une variation de l'indice des vides importante, une deuxième partie avec une variation de l'indice des vides modérée et une troisième partie avec une faible variation, les points de séparation correspondant au point d'entrée d'air et au changement de régime.

La Figure III - 3 b présente la relation entre succion et degré de saturation. Les trois parties sont mieux individualisées : la première où le degré de saturation est maximal et ne change presque pas, la deuxième où le degré de saturation diminue progressivement et la troisième partie où la diminution du degré de saturation est importante.

Les deux graphiques de la Figure III - 3 permettent une meilleure compréhension des phénomènes au cours du séchage.

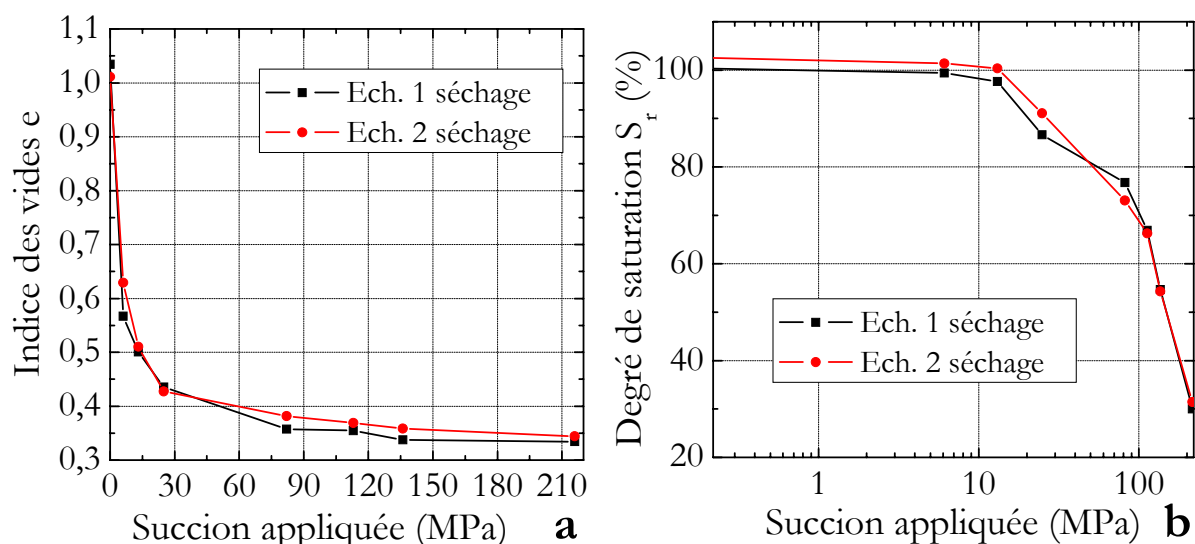


Figure III - 3. a) Relation succion – indice des vides, b) Relation succion – degré de saturation – échantillons 1, 2

3.1.1.2.5 Courbe de rétention – échantillons 3 & 4

Les échantillons 3 et 4 ont suivi principalement le chemin de séchage (Figure III - 4). Ils sont partis de l'état naturel ($s = 40$ kPa et $w = 38,6\%$) et sont arrivés à la valeur maximale de succion imposée de 216 MPa ($w = 4,7\%$). Ils ont suivi ensuite le chemin de remouillage de 216 à 113 MPa. On observe des variations réversibles au remouillage avec une faible différence de 0,4 % de teneur en eau. Les trois parties de la courbe décrites précédemment restent valables.

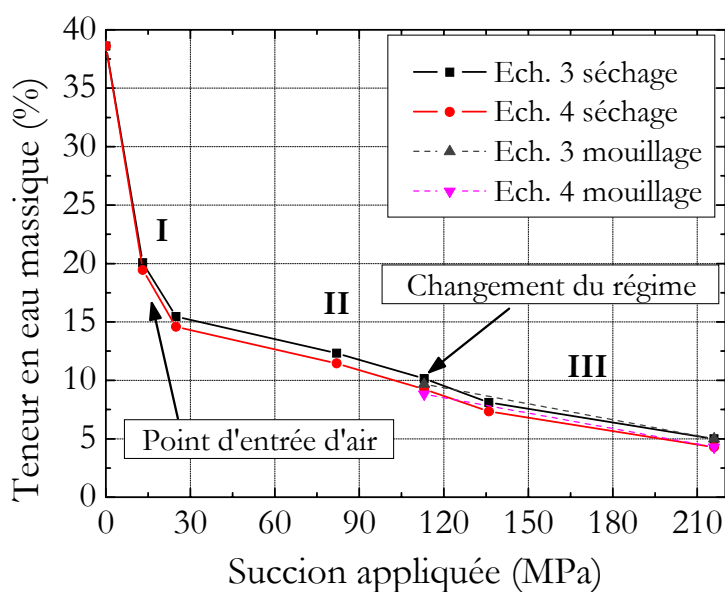


Figure III - 4. Courbe de rétention d'eau – échantillons 3, 4

3.1.1.2.6 Variation de l'indice des vides et du degré de saturation – échantillons 3 & 4

Les variations de l'indice des vides pour les échantillons 3 et 4 sont présentées sur la Figure III - 5 a. On remarque que la valeur minimale moyenne de l'indice des vides à $s_{max} = 216\text{MPa}$ est de 0,38, légèrement supérieure à celle obtenue avec les deux premiers échantillons. On observe pour la première partie de la courbe une superposition totale des deux courbes. Pour la deuxième partie, les valeurs des deux échantillons présentent une petite différence, qui se réduit pour la troisième partie de la courbe. La réversibilité mise en évidence précédemment en teneur en eau est à nouveau observée pour la partie séchage et remouillage (succion entre 113 et 216 MPa).

Sur la Figure III - 5 b on a présenté la relation entre succion et degré de saturation. On observe trois parties bien distinctes : la première où le degré de saturation est maximal et ne change presque pas, la deuxième où le degré de saturation diminue progressivement et la troisième partie où la diminution du degré de saturation est importante.

Cette mise en forme des deux graphiques de la Figure III - 5 permet une meilleure lisibilité des résultats.

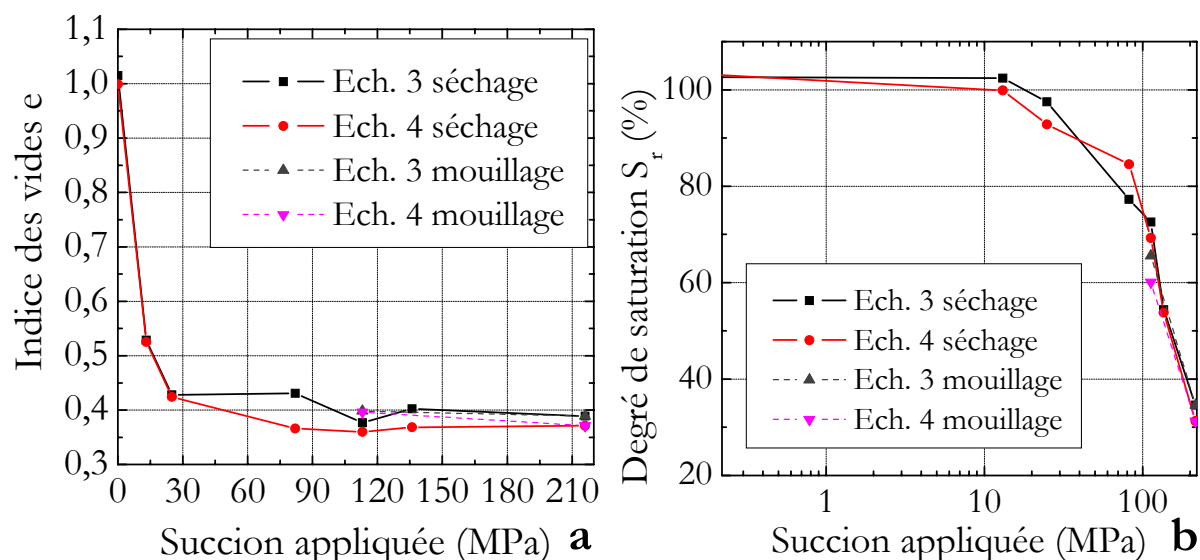


Figure III - 5. a) Relation succion – indice des vides, b) Relation succion – degré de saturation – échantillons 3, 4

3.1.1.2.7 Courbe de rétention – échantillons 5 & 6

Les échantillons 5 et 6 ont subi d’abord un séchage sous une succion de 24,9 MPa. Ils sont soumis ensuite à un cycle de succion défini par 24,9 → 82 → 113 → 136 → 216 → 113 → 24,9 MPa. Les résultats sont présentés sur la Figure III - 6. Les deux courbes ont la même allure aussi bien pour le séchage que pour le mouillage : une superposition parfaite est observée pour le chemin de séchage et une petite différence est observée pour le chemin inverse.

A cause du nombre de points limité pour la première partie, on a défini avec ces deux échantillons seulement la partie II et la partie III. Pour la deuxième partie on observe une faible hystérésis, qu’il est difficile d’interpréter puisque il manque un palier intermédiaire au mouillage (82 MPa) . La réversibilité est à nouveau observée dans la troisième partie avec un écart relatif faible de 6 %.

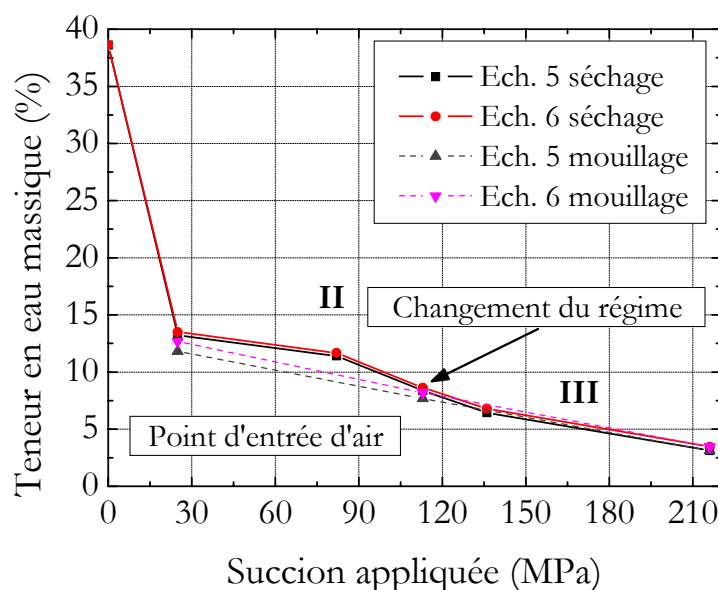


Figure III - 6. Courbe de rétention d’eau – échantillons 5, 6

3.1.1.2.8 Variation de l’indice des vides et du degré de saturation – échantillons 5 & 6

La Figure III - 7 a présente les variations de l’indice des vides pour les échantillons 5 et 6. On a obtenu une valeur minimale moyenne de 0,34 à $s = 216$ MPa, qui est égale à celle obtenue avec les deux premiers échantillons. On observe pour la partie II et la partie III le même phénomène de réversibilité.

On présente sur la Figure III - 7 b la relation entre succion et degré de saturation. Pour la troisième partie on observe une superposition des deux courbes qui confirme la réversibilité du phénomène. Par contre une hystérésis importante est à noter pour la deuxième partie entre les chemins de séchage et d'humidification

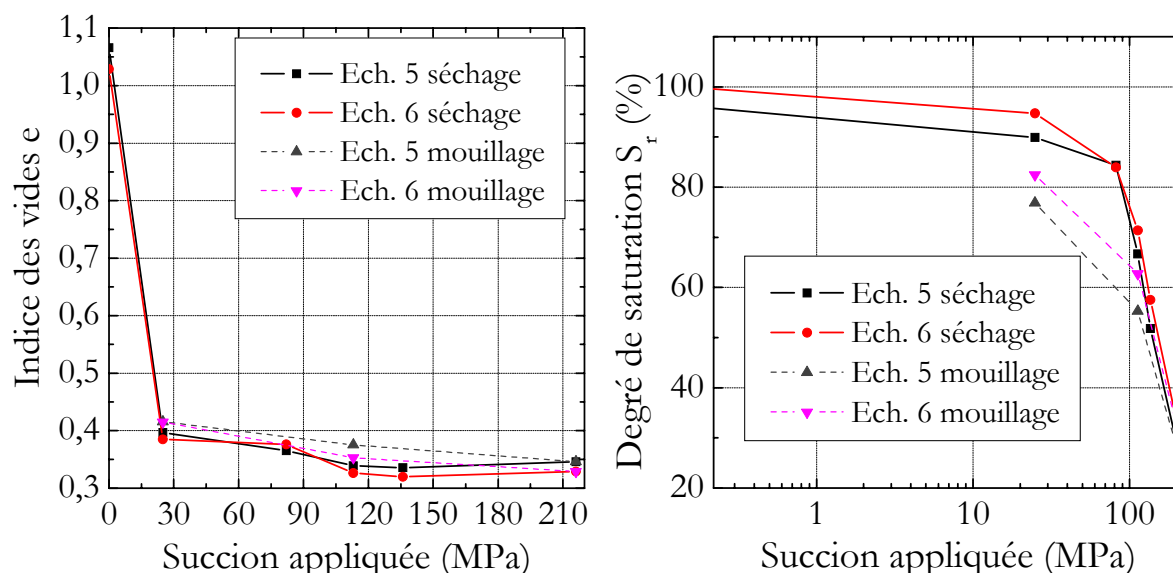


Figure III - 7. a) Relation succion – indice des vides, b) Relation succion – degré de saturation – échantillons 5, 6

3.1.1.2.9 Courbe de rétention – échantillons 7, 8 & 9

Les échantillons 7, 8 et 9 ont suivi les chemins de séchage et de remouillage sur une large gamme de succions (Figure III - 8). La première succion imposée à partir de l'état initial était élevée (82 MPa). Elle est suivie de trois paliers successifs de succion en séchage et trois autres en remouillage. (82 → 113 → 136 → 216 → 113 → 24,9 → 6,1 MPa).

On remarque à nouveau les trois parties caractéristiques des courbes. Pour la deuxième partie, on observe un hystérésis très marqué ; en revanche pour la troisième partie c'est encore la réversibilité qui est observée avec un écart relatif de 13 %.

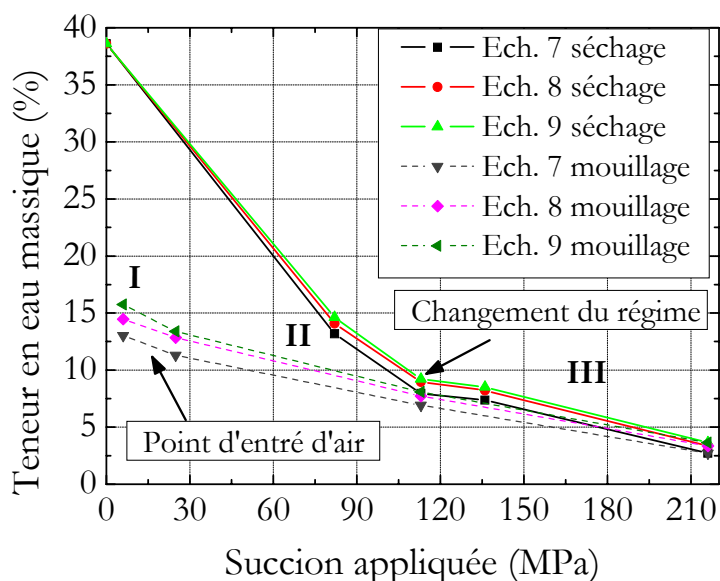


Figure III - 8. Courbe de rétention d'eau – échantillons 7, 8, 9

3.1.1.2.10 Variation de l'indice des vides et du degré de saturation – échantillons 7, 8 & 9

On présente sur la Figure III - 9 les variations de l'indice des vides pour les trois échantillons. La valeur minimale moyenne de l'indice des vides observée à la succion maximale de 216 MPa est de 0,33 presque égale à celle obtenue avec les deux premiers échantillons. La partie III (succion entre 113 et 216 MPa) est parfaitement réversible au remouillage.

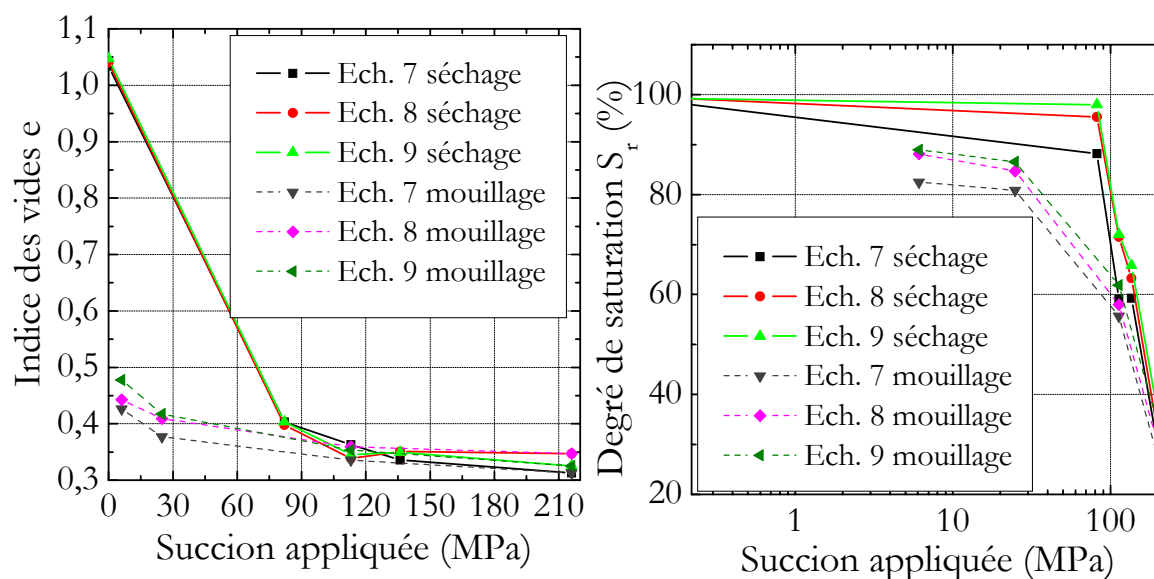


Figure III - 9. Relation succion – indice des vides – échantillons 7, 8, 9

Biarez et Fleureau (1988) ont travaillé sur des comparaisons des variations de volume des sols argileux lors des cycles séchage – humidification. Ils ont observé le même type de comportement : au séchage le sol présente au début un comportement élasto-plastique suivi d'un comportement élastique quand la succion dépasse une valeur de seuil ; au remouillage le comportement est élastique.

3.1.2 Courbe de rétention d'eau du limon de Boissy le Châtel

La courbe de rétention du limon de Boissy le Châtel (Figure III - 10) a été déterminée à l'aide de mesures directes de la succion. On a suivi le chemin de séchage pour les trois échantillons utilisés (dimensions : Φ 38 mm, h 20 mm).

Les échantillons de limon préparés (2.5.2), qui avaient une teneur en eau volumique initiale de l'ordre de 28%, ont été placés dans une boîte fermée afin de permettre un séchage en douceur et homogène. La mesure de succion a été effectuée à différents temps, au fur et à mesure de la progression du séchage. Un grand nombre de mesures a été réalisé dans la gamme de succion de 0 à 1800 kPa.

Avant de commencer la mesure, on pesait l'échantillon afin de connaître sa teneur en eau volumique initiale. Une autre pesée en fin de chaque mesure permettait de vérifier d'éventuels changements de masse au cours de la manipulation. Ces changements se sont avérés très faibles, inférieurs à 0,05 g (soit 0,1 %).

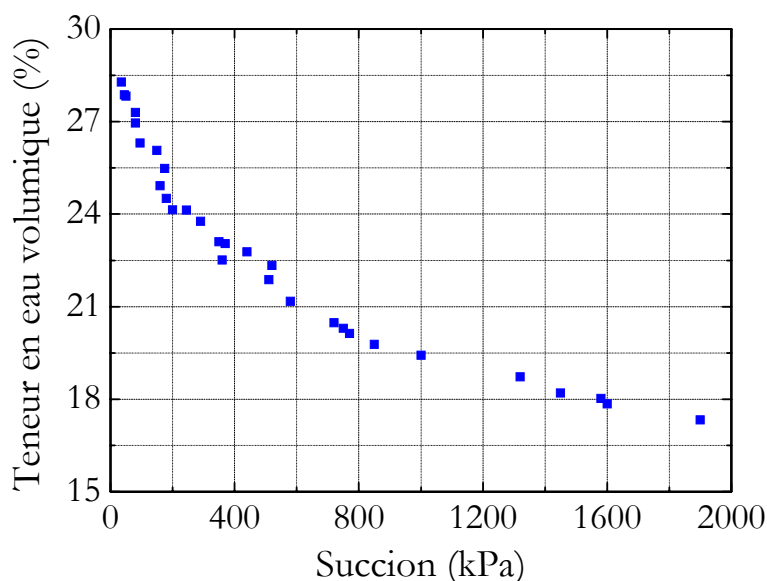


Figure III - 10. Courbe de rétention du limon obtenue par mesures directes de succion

On note que la courbe de rétention n'est pas unique ; elle dépend du chemin hydrique (séchage ou humidification) et des champs de contraintes ou de température. La courbe obtenue est représentative des propriétés au séchage sous contrainte nulle. A l'aide d'une expression mathématique on peut modéliser cette courbe particulière avec quelques paramètres appropriés.

3.1.2.1 Mesure directe de la succion d'un échantillon de limon

L'échantillon est mis en contact avec le tensiomètre. Les mesures s'effectuent dans un dispositif spécial qui empêche l'entrée d'air dans ce système (2.5). La Figure III - 11 présente une courbe type de mesure. On observe une augmentation rapide au début, suivie d'un ralentissement puis d'une stabilisation. La valeur finale est retenue pour la détermination de la courbe de rétention. Le temps de mesure semble augmenter avec la progression du séchage.

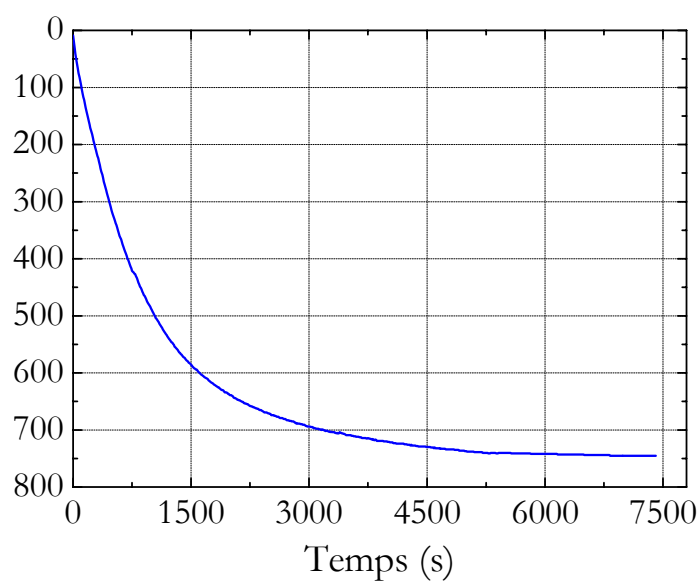


Figure III - 11. Mesure directe de la succion sur un échantillon de limon

3.2 Détermination de la perméabilité du limon de Boissy le Châtel

On a déterminé la perméabilité du limon à l'état saturé (essai classique à l'oedomètre) et à l'état non saturé (essai d'infiltration d'un échantillon dans la colonne d'infiltration).

3.2.1 Perméabilité du limon à l'état saturé

On a déterminé la perméabilité du limon à l'état saturé en utilisant un oedomètre relié à un perméamètre à charge variable et à plusieurs niveaux de chargement.

3.2.1.1 Réalisation de l'essai

L'échantillon de limon intact utilisé (dimensions : Φ 70 mm, h 20 mm) est préparé sur un bloc de sol prélevé in situ ; il a une teneur en eau volumique initiale de 30,6%. On a placé l'échantillon dans un moule cylindrique lui-même fixé sur l'embase oedométrique. Un papier filtre est placé de chaque côté de l'échantillon, permettant un meilleur contact entre la pierre poreuse et le sol.

On commence les premières mesures à une faible charge de 10 kPa. On répète ensuite l'opération à des charges de 25 → 50 → 100 → 200 → 400 → 800 kPa. Puis on procède au déchargement en prenant les mêmes paliers. En fin d'essai l'échantillon a été extrait de la cellule et la teneur en eau a été prise pour vérification.

3.2.1.2 Résultats des mesures de l'essai de perméabilité saturée

On présente sur la Figure III - 12 la courbe de compressibilité du limon de Boissy le Châtel saturé. Cette courbe permet de déterminer les caractéristiques de compressibilité du limon tels que le coefficient de compression $c_c = 0,0124$; le coefficient de décompression $c_r = 0,014$, et la contrainte de pré-consolidation $\sigma'_p = 180$ kPa.

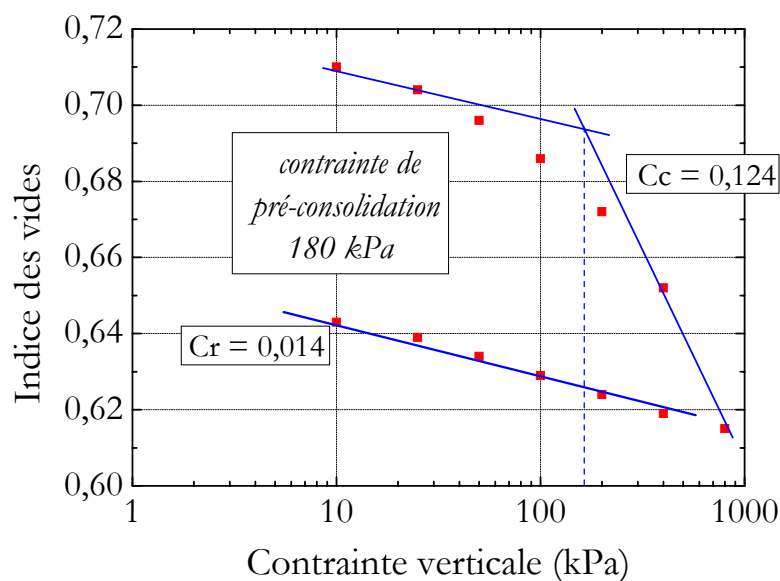


Figure III - 12. Courbe de compressibilité

La Figure III - 13 présente la relation entre le coefficient de perméabilité et l'indice des vides sur un graphique semi-logarithmique. Elle peut être considérée comme droite.

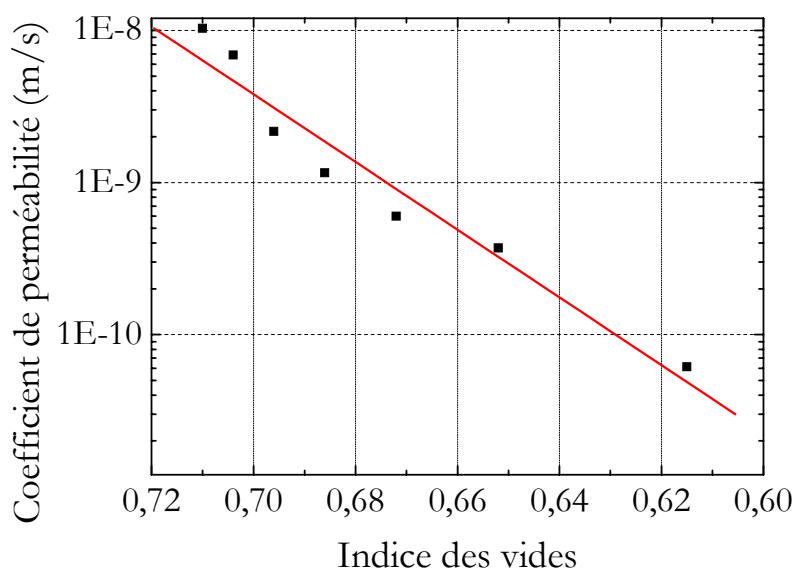


Figure III - 13. Relation coefficient de perméabilité – indice des vides

3.2.2 Perméabilité à l'état non saturé

La réalisation de cet essai a nécessité le développement d'une colonne d'infiltration. On s'est basé sur la méthode des profils instantanés. Le dispositif nécessaire à la réalisation de cet essai est présenté sur la Figure III - 14 : la colonne d'infiltration, deux embases oedométriques, un tube d'eau, un tuyau plastique pour relier le tube d'eau à l'embase inférieure, quatre tensiomètres et un système d'acquisition par ordinateur. On a utilisé des échantillons de limon de Boissy le Châtel intacts. On a réalisé trois essais de perméabilité à différentes succions initiales. Les résultats des essais sont présentés séparément. Une comparaison est réalisée à la fin.



Figure III - 14. Essai de perméabilité avec la colonne d'infiltration

3.2.2.1 Réalisation de l'essai

Le limon de Boissy le Châtel avait une teneur en eau volumique initiale importante de l'ordre de 27 %. Après le découpage en petits blocs, le sol a été séché de façon contrôlée afin de diminuer sa teneur en eau (2.4.2.3).

Pendant les essais, la succion a été suivie à l'aide des tensiomètres à quatre niveaux différents. La courbe de rétention d'eau déterminée préalablement permet de déterminer les teneurs en eau volumiques correspondantes.

Les principales étapes de la réalisation des essais sont :

1. préparation de l'échantillon, et mise en place dans la colonne d'infiltration ;
2. homogénéisation de la teneur en eau dans la colonne pendant au moins 24 heures ;
3. mise en place des quatre tensiomètres ; stabilisation de leurs valeurs affichées (au moins 24 heures) et confirmation de la continuité des mesures des tensiomètres (s'assurer qu'aucun tensiomètre n'a cavité en fin de cette étape) ;
4. infiltration jusqu'à la saturation complète de l'échantillon. On arrête les mesures quand il n'y a plus d'eau qui s'infiltré dans l'échantillon de sol. La durée de l'expérience est comprise entre 9 et 21 jours ;
5. purger l'air régulièrement en ouvrant les deux robinets de l'embase supérieure.
6. vérification du bon fonctionnement de chacun des tensiomètres après la fin de cette série de mesures ;
7. Vérification de la teneur en eau finale à différentes hauteurs de l'échantillon.

Entre les étapes 3 et 6, le système d'acquisition a été mis en marche permettant de suivre en temps réel les succions à différentes hauteurs. Une fréquence de mesures de 2 min est utilisée.

3.2.2.2 Interprétation des résultats

Les fichiers de données brutes contiennent l'information de base. Ces données permettent de connaître le déroulement complet de l'infiltration en fonction du temps écoulé. D'une part la succion enregistrée par chaque tensiomètre en fonction de temps et d'autre part la quantité d'eau infiltrée par un suivi du niveau de l'eau dans la burette en fonction du temps. Pour construire les courbes d'isochrones de la succion et de la teneur en eau on a défini un intervalle de temps de 24 heures. On extrait des données brutes les valeurs de la succion à quatre niveaux en partant de l'instant initial.

Afin de déterminer les profils de succion et de teneur en eau volumique, on a regroupé dans un tableau toutes les données de la succion (pour chaque instant choisi) ; on complète ensuite avec les valeurs de la teneur en eau volumique. Vu qu'il est nécessaire de connaître le profil complet (0 – 20 cm) des isochrones de la teneur en eau, on a déterminé la teneur en eau volumique à 20 cm par extrapolation. Les graphiques des isochrones de la succion et de

la teneur en eau constituent les données nécessaires pour calculer les coefficients de perméabilité à différentes succions (1.3.5.1).

3.2.2.3 Résultats du 1^{er} essai

Les valeurs initiales de la succion (Figure III - 15) de l'échantillon varient peu entre les hauteurs de 8 cm et 16 cm (488 et 498 kPa). Par contre, à 4 cm de hauteur la succion est un peu plus faible : 460 kPa. Cette différence est due probablement au séchage qui n'était pas complètement uniforme.

La charge d'eau appliquée est très faible (3-4 cm au-dessus de la hauteur de l'échantillon).

L'essai a duré 212 heures (9 jours), 24 heures pour la stabilisation de la succion initiale et 188 heures pour l'infiltration. L'essai est arrêté lorsque le niveau d'eau ne varie plus dans la burette. A la fin de l'essai les valeurs de la succion étaient comprises entre 0 et 2 kPa, montrant l'état quasi-saturé de l'échantillon. La teneur en eau finale a été déterminée à plusieurs hauteurs après l'essai.

3.2.2.3.1 Stabilisation des valeurs des tensiomètres

Les tensiomètres sont mis en place progressivement 2 par 2. Il faut entre 6 à 7 heures pour avoir la stabilisation de la succion (Figure III - 15). On a laissé 24 heures afin de s'assurer qu'il n'y avait pas de risque de cavitation.

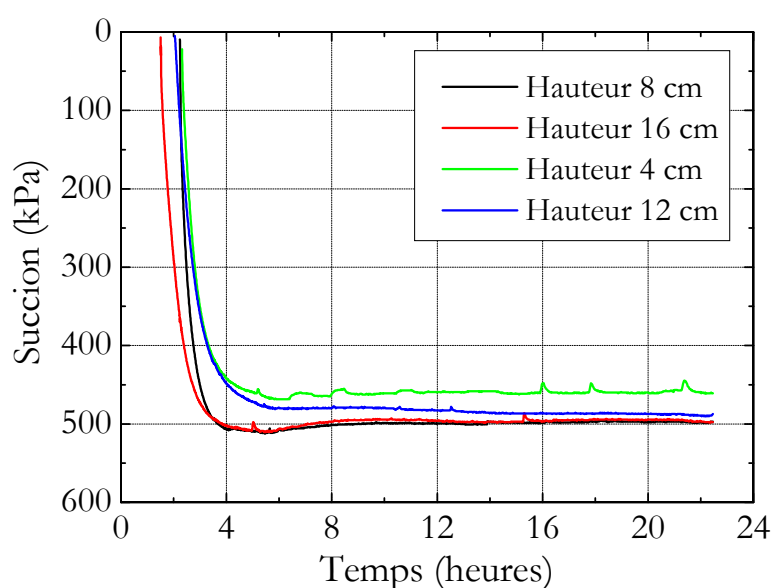


Figure III - 15. Stabilisation de la succion à 4 hauteurs différentes

3.2.2.3.2 Infiltration

La Figure III - 16 présente les mesures de la succion aux quatre hauteurs de l'échantillon au cours de l'infiltration. On observe une diminution progressive. Le niveau 1 à 4 cm est saturé après seulement 50 heures (2 jours) ; le niveau 2 à 8 cm est saturé après 75 heures (3 jours) ; le niveau 3 à 12 cm après 125 heures (5 jours) et le niveau 4 à 16 cm après 175 heures (7 jours). Au cours de cet essai on a refait 4 fois le niveau d'eau dans la burette. Ceci s'est traduit par des petites variations en dents de scie sur les 4 courbes (Figure III - 16).

Les données sur la quantité d'eau infiltrée dans l'échantillon permettent de suivre le remplissage progressif des pores du sol. Elles indiquent aussi le moment d'arrêt des mesures. On présente sur la Figure III - 17 l'évolution du volume d'eau entrant dans l'échantillon. On observe que l'échantillon ne prend presque plus d'eau après 200 heures.

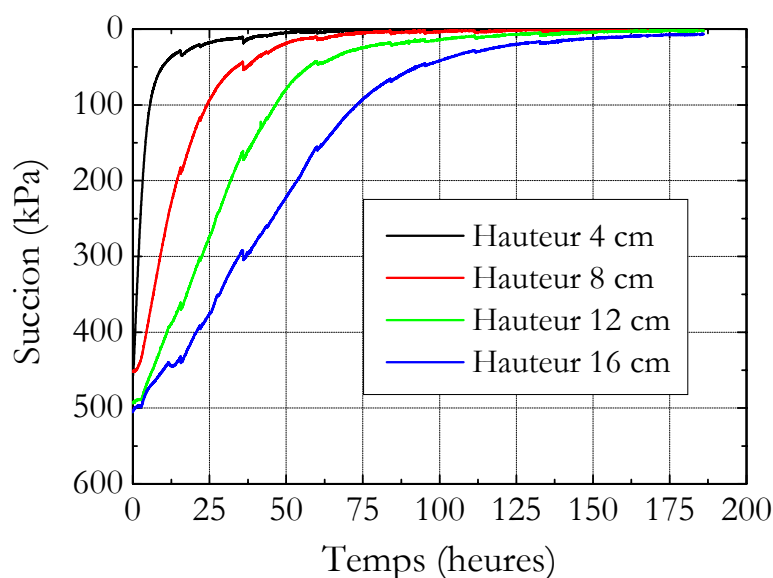


Figure III - 16. Variation de la succion à différentes hauteurs

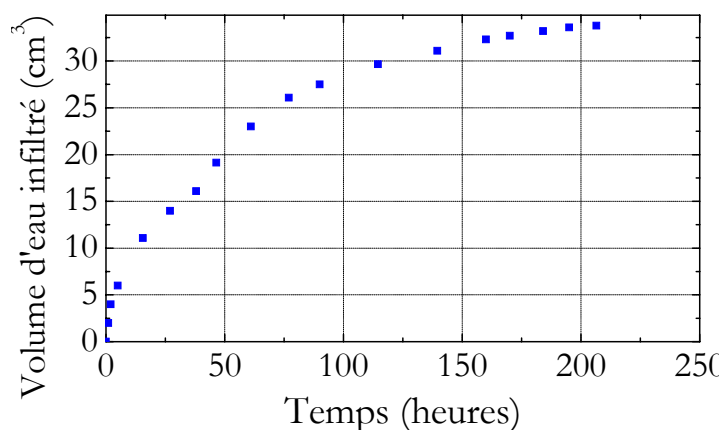


Figure III - 17. Volume d'eau infiltré

3.2.2.3.3 Isochrones de succion et de teneur en eau volumique

Pour construire les isochrones de la succion, il a fallu sélectionner dans les données d'infiltration (Figure III - 16) celles correspondant au pas de temps choisi (premier instant initial à 0 h avec un intervalle de temps de 24 h). Les isochrones de succion sont présentées sur la Figure III - 18.

La présentation choisie (axe verticale : hauteur de l'échantillon et axe horizontale : succion), correspond au positionnement vertical de l'échantillon durant l'essai. Le niveau 0 étant saturé dès le début de l'infiltration, la succion à ce niveau est nulle à tout instant. En se basant sur les 5 points correspondant au pas de temps on peut construire les courbes des isochrones de succion (Figure III - 18).

L'état initial avant infiltration est figuré par les quatre points séparés de couleur noire. La première isochrone est celle à l'instant $t = 24$ h (courbe rouge), les autres suivent avec un intervalle de temps régulier de 24 heures et tendent vers une diminution de la succion (les courbes isochrones se déplacent vers la gauche). La légende de chaque courbe ne figure pas sur le graphique afin de permettre une meilleure lisibilité. Les isochrones permettent une visualisation directe de la succion au sein de l'échantillon à un temps donné. A titre d'exemple, à 72 h on observe que les valeurs sont comprises entre 0 et 106 kPa.

La tangente d'une isochrone de succion permet de déterminer à chaque point le gradient hydraulique ($i = \partial s / \partial z$). On présente à titre d'exemple sur la Figure III - 18 deux tangentes aux isochrones (à la hauteur 12 cm de l'échantillon) qui servent à définir une valeur moyenne entre les instants de temps $t = 24$ h et $t = 48$ h.

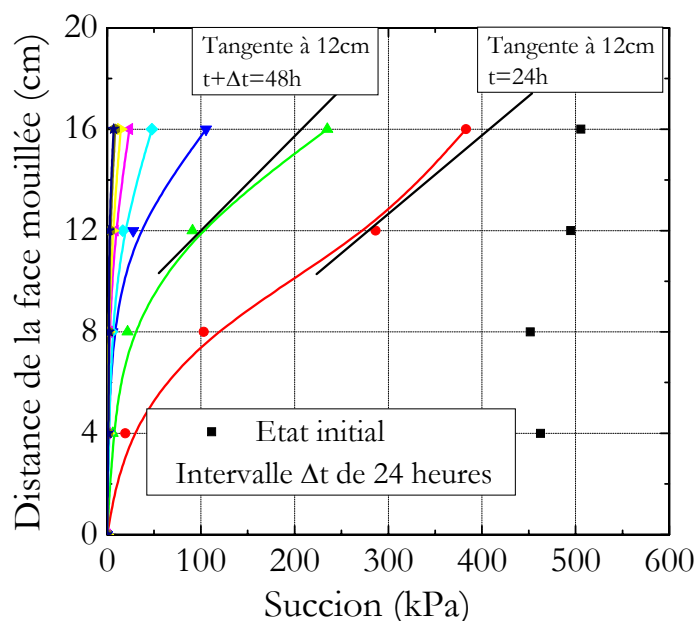


Figure III - 18. Isochrones de succion

La Figure III - 19 présente les isochrones de la teneur en eau volumique calculée. Elles sont obtenues à partir des données mesurées de la succion et de la courbe de rétention d'eau. L'état initial de l'échantillon est représenté par les 4 points séparés. Les valeurs sont calculées aux quatre niveaux choisis ; la valeur au niveau 0 est connue, elle correspond à la teneur en eau volumique saturée (35 %). Pour la teneur en eau volumique à 20 cm, on a procédé à l'extrapolation. La partie extrapolée est présentée en traits pointillés.

Les isochrones présentées commencent à l'instant $t = 24 h$ (courbe rouge) jusqu'à l'instant $t = 184 h$. On observe que les isochrones de teneur en eau volumique ont les mêmes allures que les isochrones de succion ; elles se déplacent vers la gauche dans le temps.

L'aire délimitée par deux isochrones voisines représente le volume d'eau total infiltré dans l'échantillon entre les deux instants de temps considérés. Par conséquent, à une position donnée (16 cm par exemple), l'aire délimitée par deux isochrones voisines (la surface hachurée sur la Figure III - 19) représente le volume d'eau qui a traversé cette position entre les deux temps considérés ($t = 24 h$ et $t = 48 h$). La connaissance de ce volume d'eau permet la détermination du débit q .

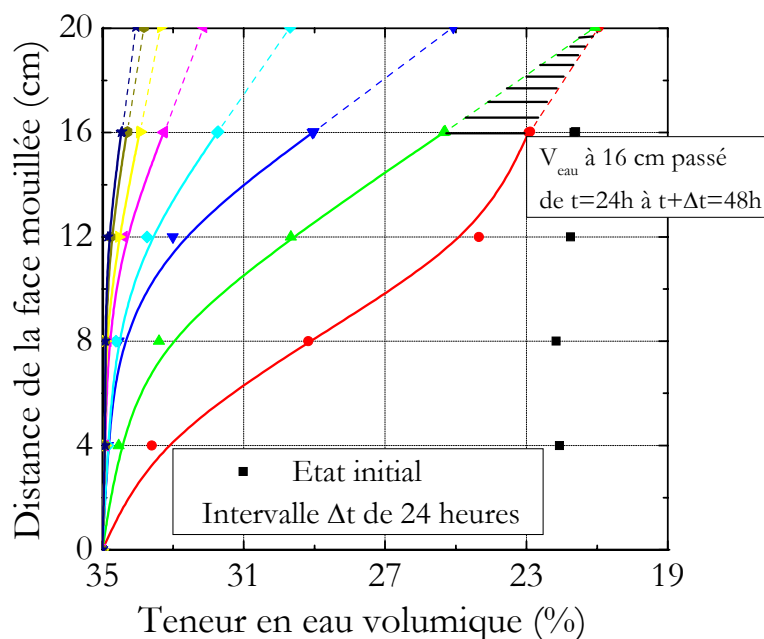


Figure III - 19. Isochrones de teneur en eau volumique

3.2.2.3.4 Teneur en eau volumique à l'état initial et final

On présente sur la Figure III - 20 les valeurs de la teneur en eau initiale, estimées à partir des mesures respectives de succion, et les valeurs mesurées de la teneur en eau finale à différentes hauteurs de l'échantillon de limon. On observe qu'à l'état initial les teneurs en eau volumiques sont très proches et présentent un faible écart (de 21,7 % à 22,2). A l'état final, on observe une dispersion plus importante ; on passe de 28,7 % à 33,7 %. Ceci est probablement lié à l'hétérogénéité de l'échantillon.

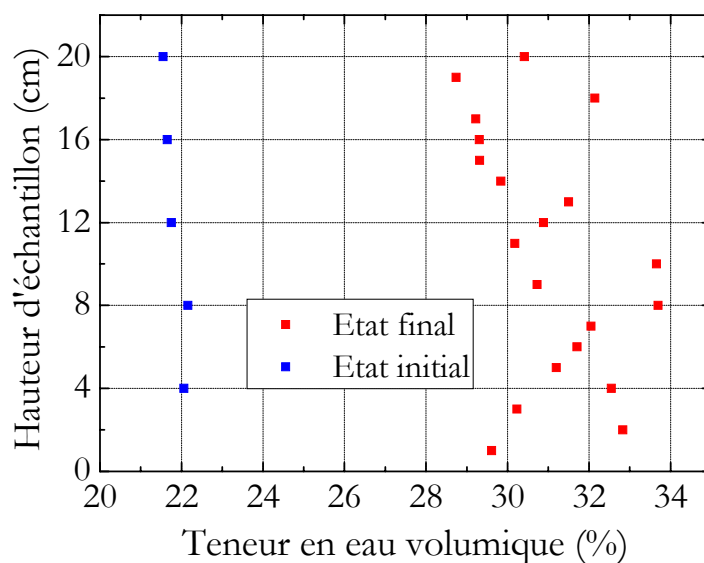


Figure III - 20. Teneurs en eau volumiques initiale et finale

3.2.2.3.5 Détermination des coefficients de perméabilité non saturé

Les coefficients de perméabilité à l'état non saturé sont calculés à partir des données présentées sur les graphiques des isochrones de la succion et de la teneur en eau volumique. La Figure III - 21 présente les coefficients moyens de perméabilité à différentes hauteurs de l'échantillon de sol et pour différents temps. On observe une diminution du coefficient de perméabilité en fonction de la hauteur de l'échantillon. Pour les hauteurs de 0 à 4 cm, on obtient des valeurs relativement constantes, la diminution semble s'accélérer après et c'est à 16 cm de hauteur que la diminution est la plus importante. Comme du haut vers le bas la teneur en eau est de plus en plus élevée, on en déduit par cette figure que la perméabilité diminue du bas vers le haut. Pendant la progression d'infiltration, la perméabilité diminue dans le temps avec l'augmentation de la teneur en eau.

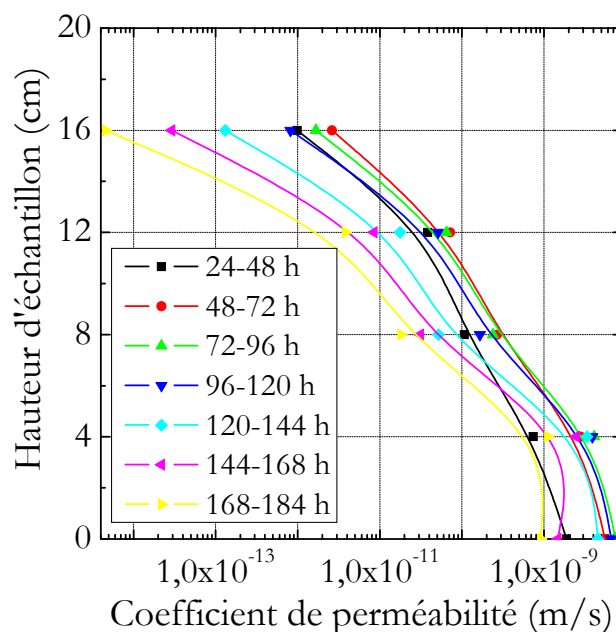


Figure III - 21. Coefficient de perméabilité à différentes hauteurs

La Figure III - 22 montre l'évolution dans le temps du coefficient de perméabilité à chaque niveau. On remarque que le coefficient de perméabilité à l'état non saturé diminue en fonction de la hauteur de l'échantillon, et que le sens des variations est identique. Pendant les trois premiers jours on observe une légère augmentation des valeurs et par la suite une diminution. Cette diminution dans le temps pourrait s'expliquer par le changement de la microstructure (donc du réseau poreux) dû à l'infiltration (hydratation de la fraction argileuse par exemple).

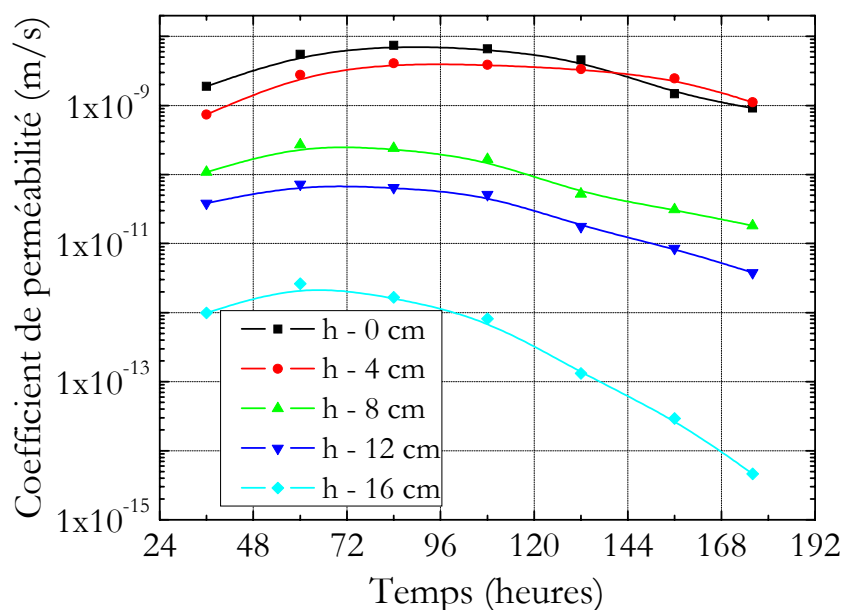


Figure III - 22. Coefficient de perméabilité dans le temps à différents niveaux

On représente sur la Figure III - 23 la relation succion – coefficient de perméabilité pour tous les points calculés. Les points représentés sur ce graphique ont une dispersion importante et leur nombre réduit ne permet pas d’obtenir une courbe de régression. Néanmoins, on observe que globalement la perméabilité diminue avec l’augmentation de la succion, ce qui est concordant avec les observations faites par Daniel (1982) et Loiseau (2001).

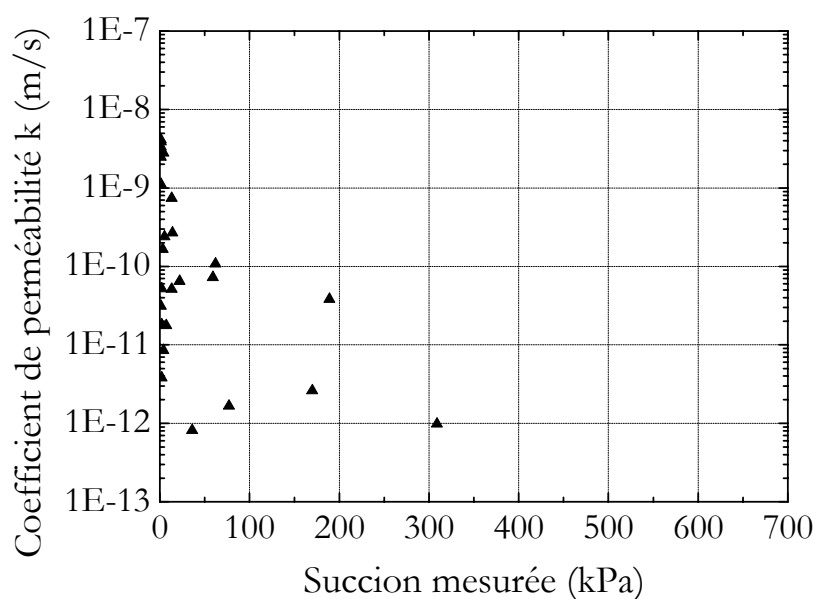


Figure III - 23. Variation du coefficient de perméabilité k avec la succion

3.2.2.4 Résultats du 2^{ème} essai d'infiltration

On a visé pour cet essai une teneur en eau volumique initiale plus faible, ce qui a nécessité une durée de séchage nettement plus importante que pour le premier essai.

Il semble que ce séchage plus soutenu a provoqué une hétérogénéité plus prononcée des teneurs en eau, comme cela a été observé au carottage ou indiqué par les tensiomètres (les valeurs de succion initiale du bas vers le haut sont 868, 946, 995 et 1030 kPa).

Pour la réalisation de l'essai on place la charge d'eau dans le tube au même niveau que la hauteur d'échantillon. La charge appliquée est moindre par rapport au premier essai, car les résultats obtenus (1^{er} essai) ont montré qu'une charge moins importante entraînerait une infiltration plus homogène d'une durée plus importante.

En effet, cet essai a duré 430 heures (presque 18 jours), dont 24 heures pour la stabilisation des succions initiales et 404 heures pour permettre l'infiltration. L'essai a été arrêté au moment où le niveau d'eau dans le tube ne variait plus. A la fin de l'essai les valeurs finales de la succion étaient entre 0 et 6 kPa. On a démonté l'essai et on a, comme dans l'essai précédent, effectué plusieurs mesures de la teneur en eau finale à différentes hauteurs.

3.2.2.4.1 Stabilisation des succions initiales

Pour des raisons pratiques, la mise en place des tensiomètres s'est faite en deux fois. La stabilisation des valeurs mesurées par les tensiomètres (Figure III - 24) a été atteinte après 8 à 10 h. on note que le temps de stabilisation pour cet essai est plus important (2 à 3 h plus long) par rapport au 1^{er} essai ce qui est normal sachant que la succion initiale est beaucoup plus importante dans le 2^{ème} essai (plus de deux fois supérieure). Le temps de stabilisation a été prolongé jusqu'à 24 heures.

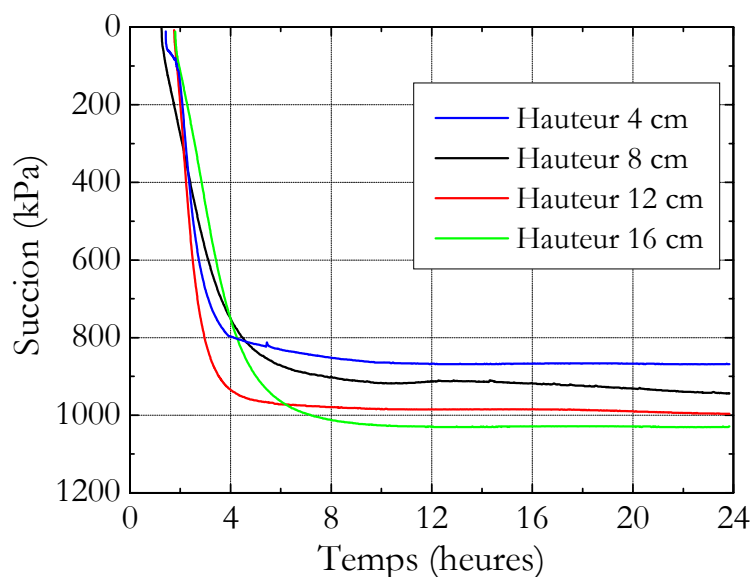


Figure III - 24. Stabilisation de la succion à 4 hauteurs différentes

3.2.2.4.2 Infiltration

Le résultat des mesures de la succion à quatre niveaux est présenté sur la Figure III - 25. L'état de saturation complète (suction nulle) est atteint d'abord au 1^{er} niveau, puis progressivement aux niveaux suivants. Le 1^{er} niveau à 4 cm de hauteur a atteint la saturation après seulement 100 heures (4 jours) ; le niveau à 8 cm de hauteur nécessitait 150 heures (6 jours). Le temps nécessaire à la saturation complète des deux parties supérieures est beaucoup plus important. On passe à 280 heures (11,6 jours) pour le niveau à 12 cm et à 320 heures (13,3 jours) pour le dernier niveau à 16 cm. On observe que les 4 courbes de mesures sont lisses et continues.

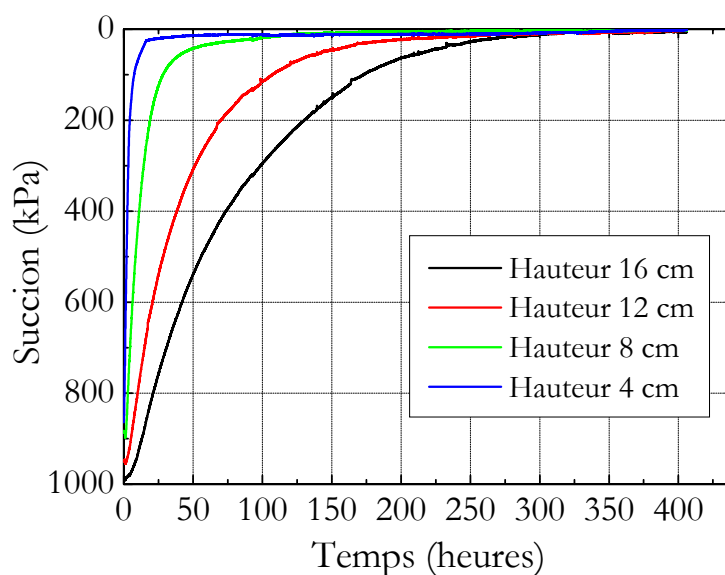


Figure III - 25. Infiltration de l'échantillon

La Figure III - 26 présente les données du volume d'eau infiltré dans l'échantillon. On remarque une infiltration rapide pour les premiers jours (100 h) avec plus de la moitié du volume total d'eau infiltrée. Le taux d'infiltration diminue notablement après 350 heures.

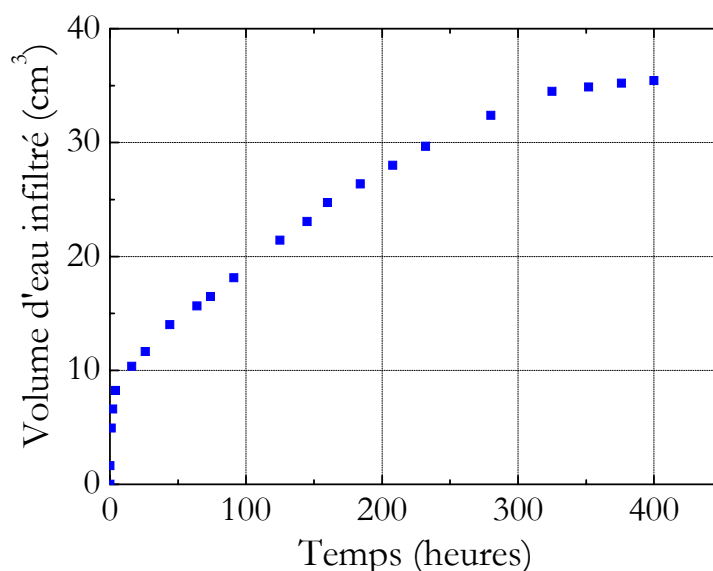


Figure III - 26. Volume d'eau infiltré dans l'échantillon

3.2.2.4.3 Isochrones de succion et de teneur en eau volumique

La Figure III - 27 présente les isochrones de succion qui sont construites de la même façon que pour le 1^{er} essai. On s'est basé pour cela sur les 5 points connus à un temps donné. On garde toujours les mêmes instants : le premier instant initial à 0 h et l'intervalle de temps de 24 h.

L'état initial juste avant infiltration est représenté par les quatre points séparés (couleur noire). Les isochrones sont plus nombreuses cette fois et elles se serrent vers les derniers jours d'infiltration. On observe clairement que la succion dans l'échantillon varie principalement dans la première semaine : à 16 cm de hauteur, la succion est passée de 1000 kPa environ à 100 kPa en 7 jours.

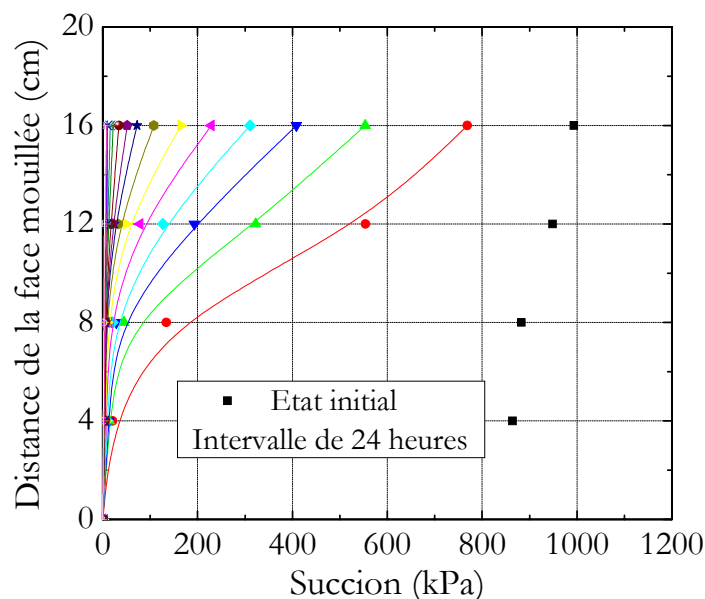


Figure III - 27. Isochrones de succion

Les isochrones de la teneur en eau volumique calculée sont présentées sur la Figure III - 28. On les obtient à l'aide des données mesurées de la succion et des relations succion – teneur en eau de la courbe de rétention d'eau. L'état initial de l'échantillon est représenté avec 4 points séparés (couleur noire). La partie entre 16 et 20 cm a été tracée par extrapolation (traits pointillés). Les isochrones de la teneur en eau (Figure III - 28) commencent à l'instant $t = 24$ h (courbe rouge) jusqu'à l'instant $t = 406$ h. Ces isochrones ont la même allure que celles des succions, et elles se serrent après le 11^{ème} jour d'infiltration (après la 10^{ème} isochrone).

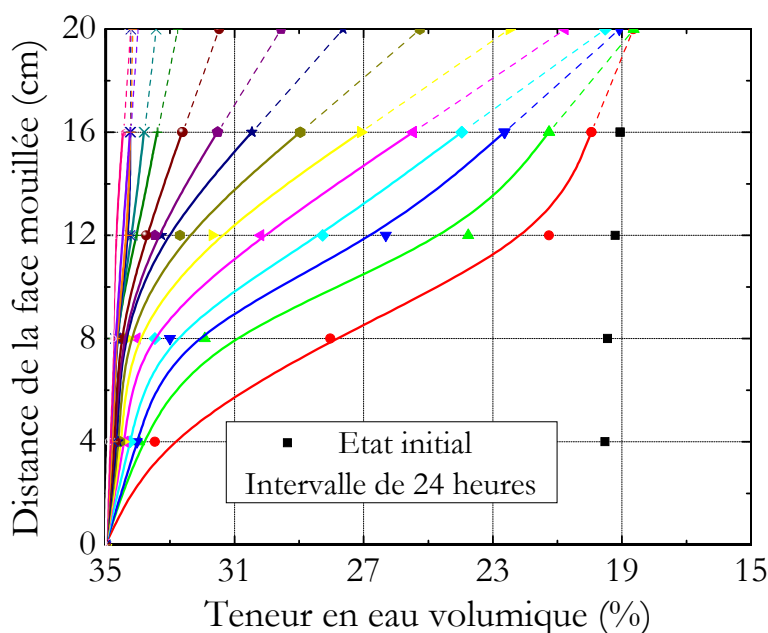


Figure III - 28. Isochrones de teneur en eau volumique

3.2.2.4.4 Teneur en eau volumique à l'état initial et final

Les deux photos de la Figure III - 29 montrent l'échantillon de limon après l'essai d'infiltration. On a utilisé une presse manuelle et un piston pour sortir l'échantillon de la colonne d'infiltration. Lors de cette opération, il était nécessaire de prendre soin de ne pas densifier l'échantillon.

On observe sur la Figure III - 29 b que sa longueur finale reste pratiquement inchangée (on n'a perdu que 2 mm de longueur), ce qui atteste de l'efficacité des précautions prises pour retirer l'échantillon de la colonne d'infiltration.

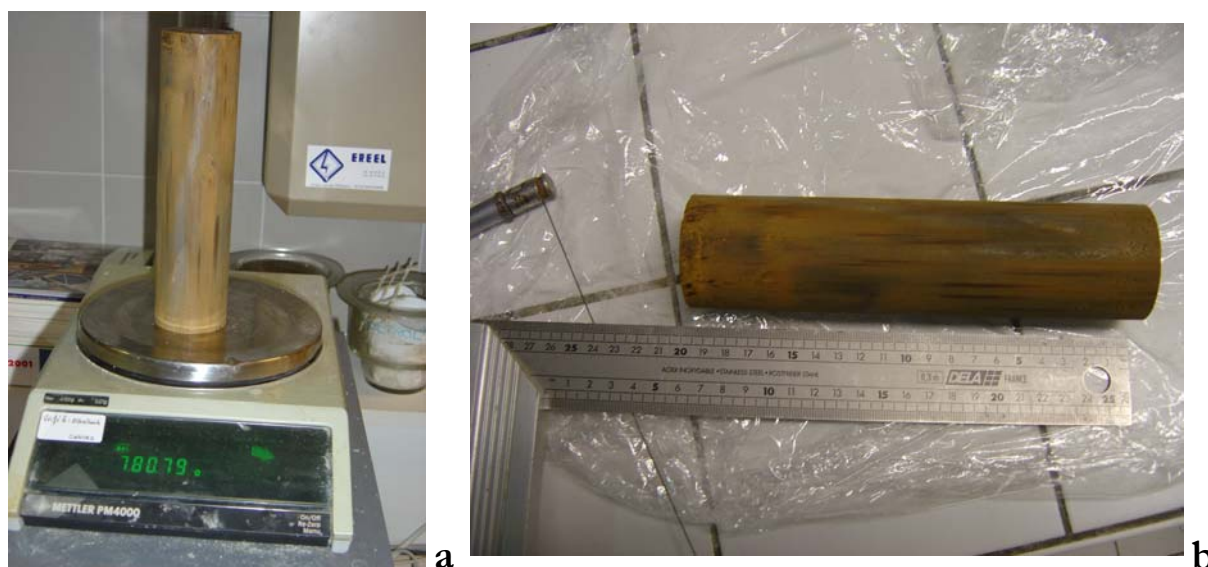


Figure III - 29. Echampion de sol après le 2^{ème} essai d'infiltration

La Figure III - 30 présente la teneur en eau volumique aux deux états limites. Un faible écart de 0,5% (19,05 à 19,52 %) sépare les quatre valeurs de la teneur en eau volumique à l'état initial. L'écart est plus important pour les valeurs de la teneur en eau volumique à l'état final. Il passe de 30,34 % à 34,74 %. Le profil de la teneur en eau finale présente moins de disparités par rapport au premier essai ; de plus, il indique bien que la teneur en eau diminue avec la distance de la face mouillée.

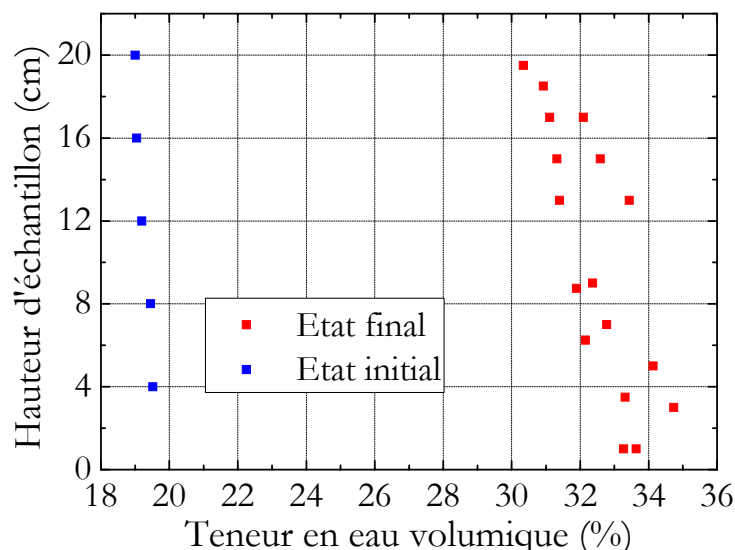


Figure III - 30. Teneur en eau volumique initiale et finale

3.2.2.4.5 Détermination des coefficients de perméabilité

On calcule les coefficients de perméabilité non saturée à partir des profils de succion et de teneurs en eau volumique. On présente sur la Figure III - 31 les coefficients moyens de perméabilité non saturée à différentes hauteurs et différents temps. On a construit deux graphiques pour s'assurer de la lisibilité. Le 1^{er} graphique présente les courbes de l'intervalle de temps de 24 à 216 h et le 2^{ème} pour le reste des courbes (216 à 406 h).

On observe généralement une diminution du coefficient de perméabilité en fonction de la hauteur de l'échantillon. Les coefficients de perméabilité à $h=0$ et 4 cm ont des valeurs similaires, une augmentation du coefficient de perméabilité pendant la progression d'infiltration dans le temps est observée pour les courbes dans le 1^{er} graphique (Figure III - 31 a). Pour les courbes du 2^{ème} graphique (Figure III - 31 b), on observe les mêmes tendances générales malgré le manque de continuité vers la fin. On note une dispersion des mesures entre 0 et 12 cm de hauteur et au contraire une homogénéisation à 16 cm.

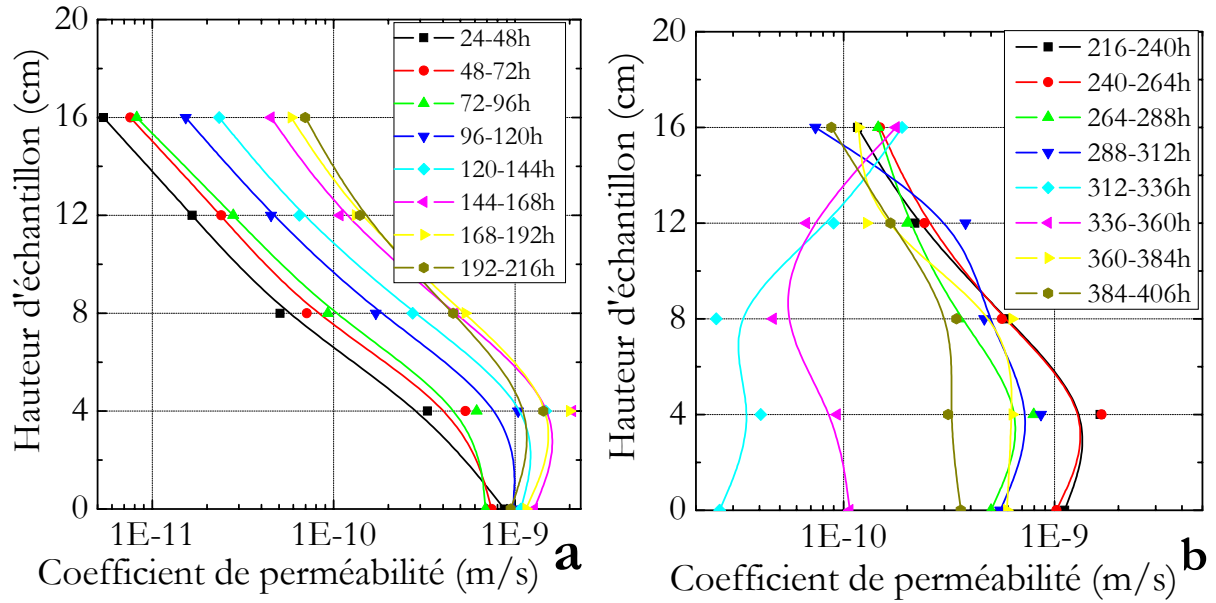


Figure III - 31. Coefficient de perméabilité à différentes hauteurs ; a) 24 – 216 h ; b) 216 – 406 h

L'évolution temporelle du coefficient de perméabilité à chaque niveau de mesures est présentée sur la Figure III - 32. On observe globalement une augmentation à tous les niveaux pendant les premières 288 h, et une diminution après. L'augmentation dans le temps est liée à l'augmentation du degré de saturation des échantillons, alors que la diminution pourrait être due au changement de la microstructure du sol.

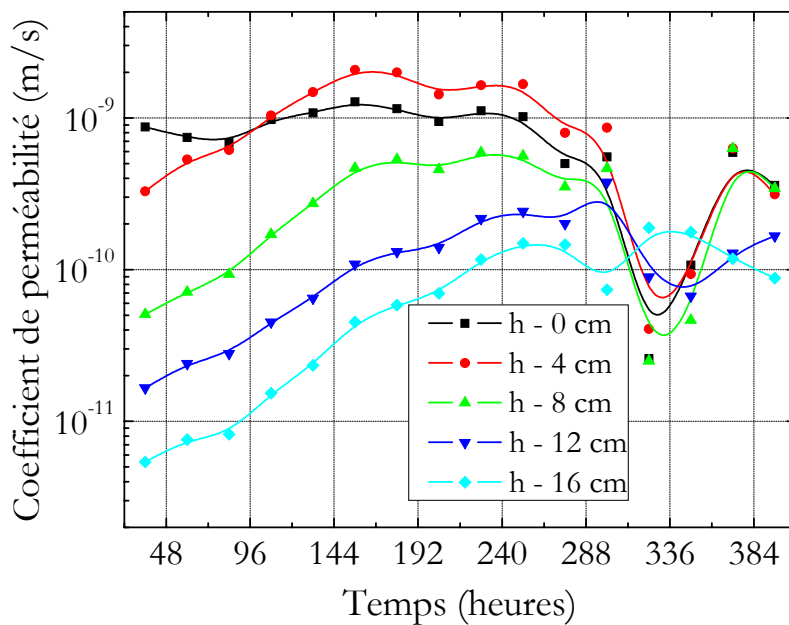


Figure III - 32. Variation du coefficient de perméabilité à différentes hauteurs

La relation succion – coefficient de perméabilité déterminée avec l'ensemble des points calculés est présentée sur la Figure III - 33. Les points présentés ont une meilleure cohérence, et on observe clairement la diminution de la perméabilité avec l'augmentation de la succion.

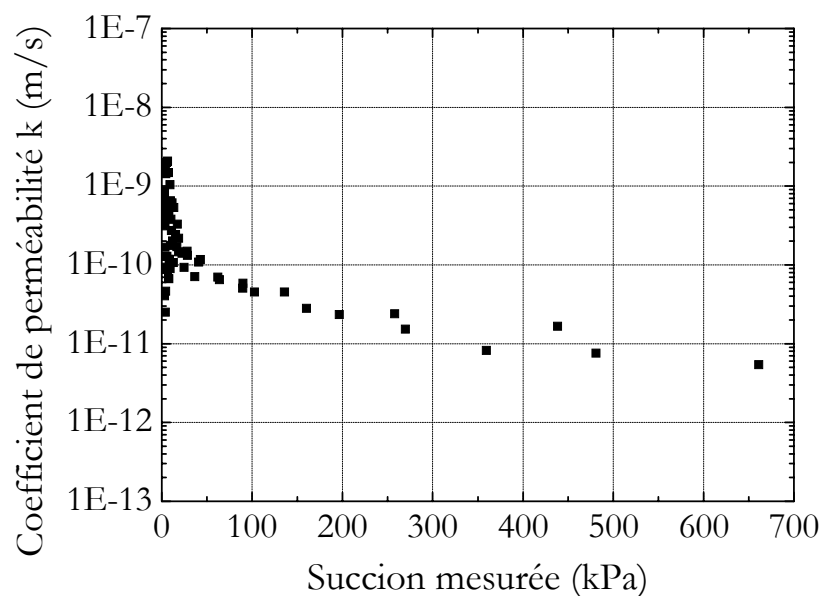


Figure III - 33. Variation du coefficient de perméabilité k avec la succion

3.2.2.5 Résultats du 3^{ème} essai d'infiltration

D'abord on présente quelques particularités du 3^{ème} essai par rapport aux deux essais précédents. Les suctions initiales étaient élevées mais inférieures à celles du 2^{ème} essai. La charge d'eau a été placée au niveau de la côte supérieure de l'échantillon, comme pour le deuxième essai.

Cet essai a duré au total 445 heures (18,5 jours). On a gardé la même durée de stabilisation des valeurs des tensiomètres (24 heures) ; et l'infiltration complète de l'échantillon a duré 420 heures. Les valeurs finales de la succion varient de 0 à 10 kPa. On a effectué également des mesures de la teneur en eau finale à différentes hauteurs après le démontage de l'essai.

3.2.2.5.1 Stabilisation des valeurs mesurées des tensiomètres

Une période de temps plus importante (comprise entre 10 et 16 h) que pour les deux autres essais est nécessaire pour la stabilisation des valeurs mesurées par les tensiomètres (Figure III - 34).

L'écart (20 kPa) entre les valeurs initiales de la succion au sein de l'échantillon est faible entre $h = 8$ cm et $h = 16$ cm : on passe de 775 kPa à 795 kPa. Par contre à $h = 4$ cm la valeur initiale de la succion est plus importante : 835 kPa.

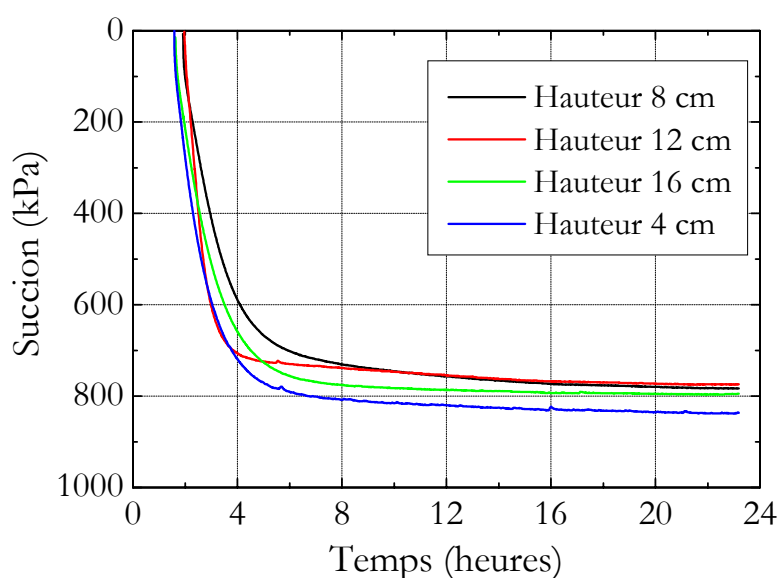


Figure III - 34. Stabilisation de la succion à 4 hauteurs différentes

3.2.2.5.2 Infiltration

La Figure III - 35 présente les variations de la succion à quatre niveaux de mesures : 4, 8, 12, 16 cm. Le premier niveau de mesure à 4 cm de hauteur a atteint la saturation après 90 heures (4 jours) ; le deuxième niveau à 8 cm de hauteur est saturé au bout de 120 heures (5 jours). L'autre moitié de l'échantillon a nécessité un temps beaucoup plus long. Il fallait 240 heures (10 jours) pour la saturation du troisième niveau à 12 cm de hauteur et 300 heures (12,5 jours) pour le dernier niveau à 16 cm. On n'a pas changé la charge d'eau pendant le déroulement de l'essai.

On remarque que la courbe rouge (à $h = 8$ cm) présente une légère déviation entre 40 et 70 h. Celle-ci est due par omission de l'ouverture de la purge d'air (robinets de l'embase supérieure) pendant une période de temps de 40 à 70 h. Le résultat est surtout visible sur la courbe rouge ($h = 8$ cm), l'effet sur les deux autres courbes (à $h = 12$ cm et $h = 16$ cm) est très faible. Ceci peut s'expliquer par le fait que le front d'infiltration se trouvait très proche du tensiomètre à 8 cm.

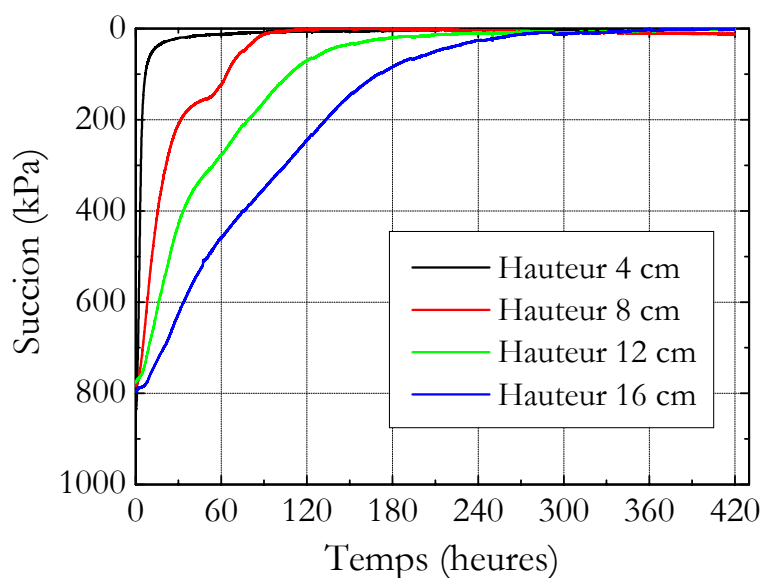


Figure III - 35. Variations des succions à différentes hauteurs

Les données du volume d'eau infiltrée à l'intérieur de l'échantillon sont présentées sur la Figure III - 36. Le taux d'infiltration tend vers zéro après 390 heures.

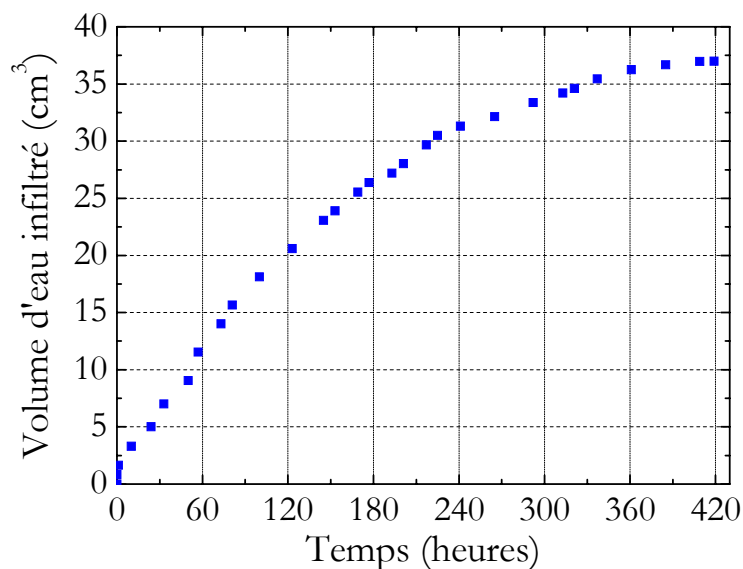


Figure III - 36. Volume d'eau infiltré dans l'échantillon

3.2.2.5.3 Isochrones de succion et de teneur en eau volumique

Les isochrones de succion sont présentées sur la Figure III - 37. On observe que les courbes sont plus étalées par rapport aux deux essais précédents. Encore une fois, la succion varie principalement pendant la première semaine : à 16 cm de hauteur, en une semaine, la succion a passée de 800 kPa à 100 kPa.

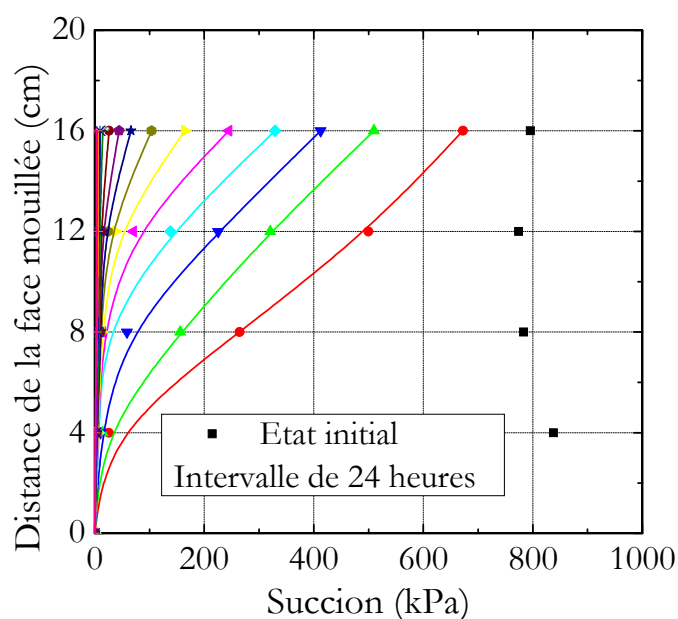


Figure III - 37. Isochrones de succion

La Figure III - 38 présente les isochrones de la teneur en eau volumique calculée à partir des données mesurées de la succion et de la courbe de rétention d'eau. Les quatre points séparés (couleur noire) présentent l'état initial de l'échantillon. L'extrapolation des cinq valeurs connues (à 0, 4, 8, 12 et 16 cm de hauteur) permet de compléter les profils jusqu'à 20 cm. Les extrapolations sont présentées en traits pointillés. Les isochrones de la teneur en eau commencent à l'instant $t = 24$ h (courbe rouge) jusqu'à l'instant $t = 420$ h. On observe qu'elle se resserrent après le 11^{ème} jour d'infiltration (la 10^{ème} isochrone).

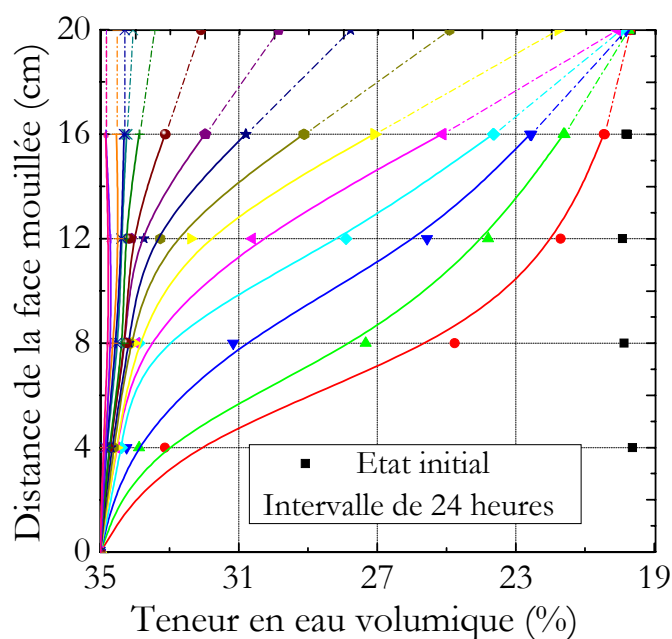


Figure III - 38. Isochrones de teneur en eau volumique

3.2.2.5.4 Teneur en eau volumique à l'état initial et final

La Figure III - 39 présente la teneur en eau volumique aux états initial et final. Les valeurs de la teneur en eau volumique à l'état initial sont proches (de 19,63 à 19,81 %). Les valeurs de la teneur en eau à l'état final présentent un écart plus important, entre 30,90 et 34,8 %. La teneur en eau dans la zone entre 8 et 12 cm paraît plus importante.

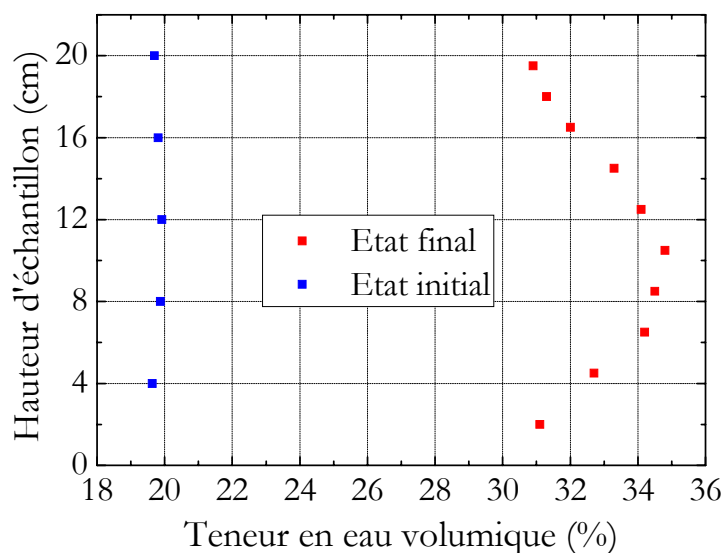


Figure III - 39. Teneur en eau volumique initiale et finale

3.2.2.5.5 Détermination des coefficients de perméabilité non saturé

La Figure III - 40 présente les coefficients de perméabilité non saturée déterminés à différents intervalles de temps tous les 24 heures. La présentation se fait en deux parties (24 – 192 h et 192 – 384 h) pour une raison de visibilité.

Une diminution du coefficient de perméabilité est observée en fonction de la hauteur de l'échantillon, ce qui est compatible avec l'augmentation de la succion suivant la hauteur constatée sur la Figure III - 37.

Pour les courbes dans la Figure III - 40 a on observe une augmentation de la perméabilité pendant la progression d'infiltration dans le temps (liée à l'augmentation de la teneur en eau). Pour les courbes dans la Figure III - 40 b on peut faire la même remarque que précédemment pour le hauteur 16 cm. Pour les autres hauteurs on observe plutôt la tendance inverse, même si une dispersion importante est à souligner.

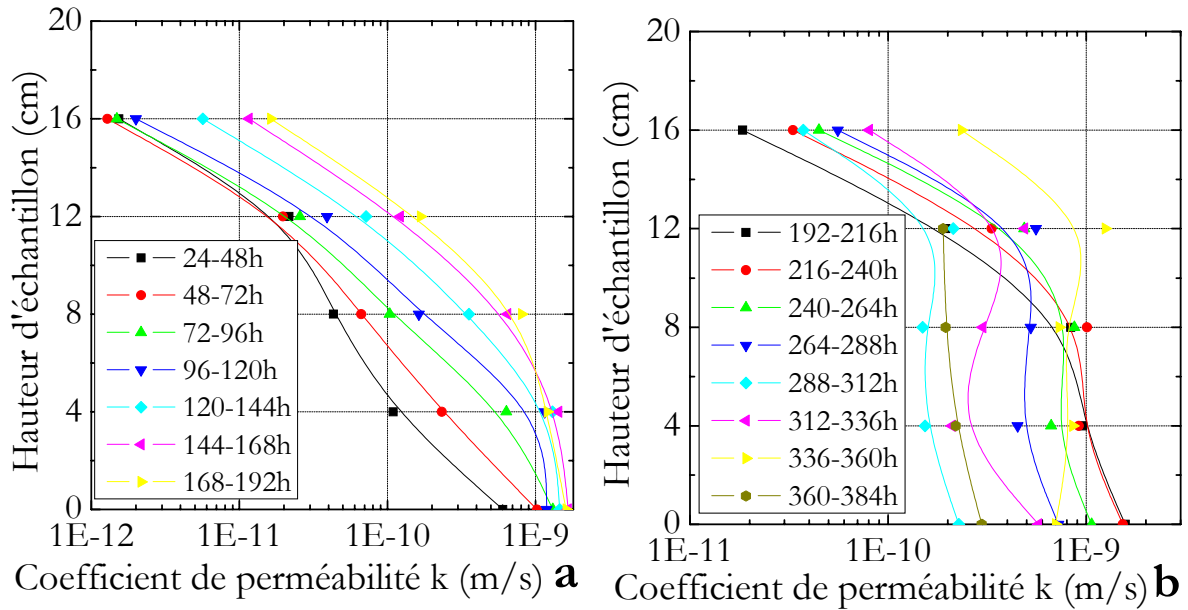


Figure III - 40. Coefficient de perméabilité à différentes hauteurs ; a) 0 – 192 h, b) 192 – 384 h

La Figure III - 41 présente l'évolution temporelle du coefficient de perméabilité à chaque niveau de mesures. Les observations sont similaires à celles du 2^{ème} essai : une diminution du coefficient de perméabilité vers le haut de l'échantillon. Une chute des valeurs des coefficients de perméabilité est observée à 300 h. Entre 312 h et 384 une remontée et une autre chute des valeurs sont observées. Cette oscillation pourrait être reliée encore à la modification de la microstructure de l'échantillon.

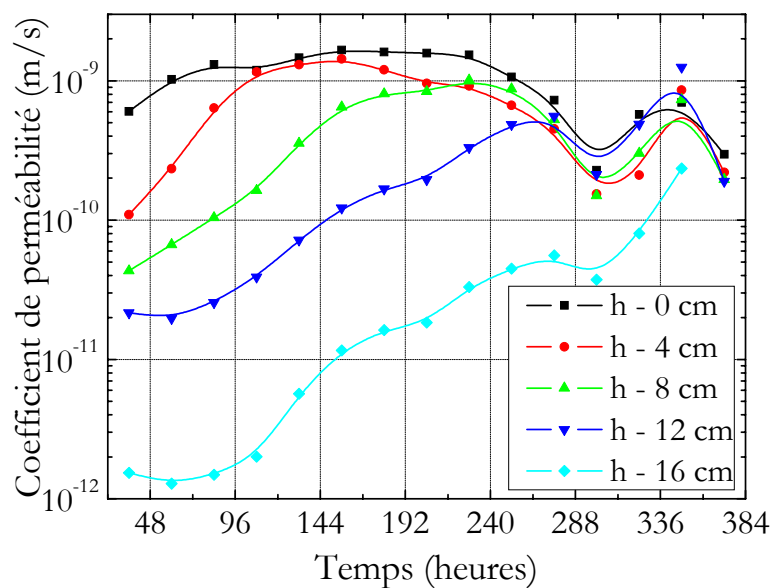


Figure III - 41. Variation du coefficient de perméabilité à différentes hauteurs

La relation succion – coefficient de perméabilité représentée pour l'ensemble des points est présentée sur la Figure III - 42. Les points présentés ont une bonne cohérence mais avec une dispersion plus marquée par rapport au deuxième essai.

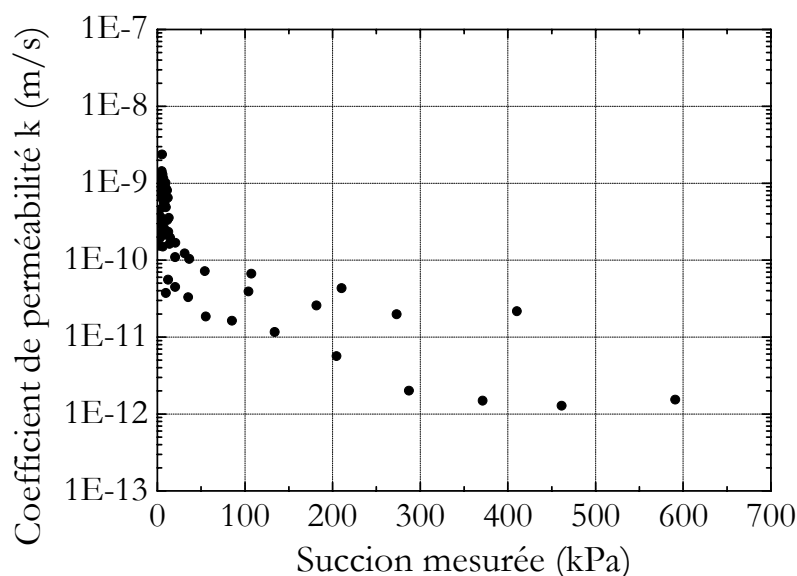


Figure III - 42. Variation du coefficient de perméabilité k avec la succion

3.2.2.6 Synthèse des résultats

La Figure III - 43 présente les résultats des trois essais. On remarque que pour des faibles succions (proche de la saturation du limon), les coefficients de perméabilité sont proches, mais pour des fortes succions une dispersion plus importante est observée. La dispersion est principalement due au premier essai. Les résultats des deux derniers essais, présentés sur la Figure III - 44, présentent une bonne cohérence.

Sur la Figure III - 43 et la Figure III - 44 on a figuré aussi le point correspondant à l'état saturé. Ce point a été déterminé à l'aide d'un oedomètre relié à un perméamètre sur le limon initialement saturé. On observe que cette valeur à l'état saturé est légèrement plus grande que celle à succion nulle déterminée par la méthode des profils instantanés.

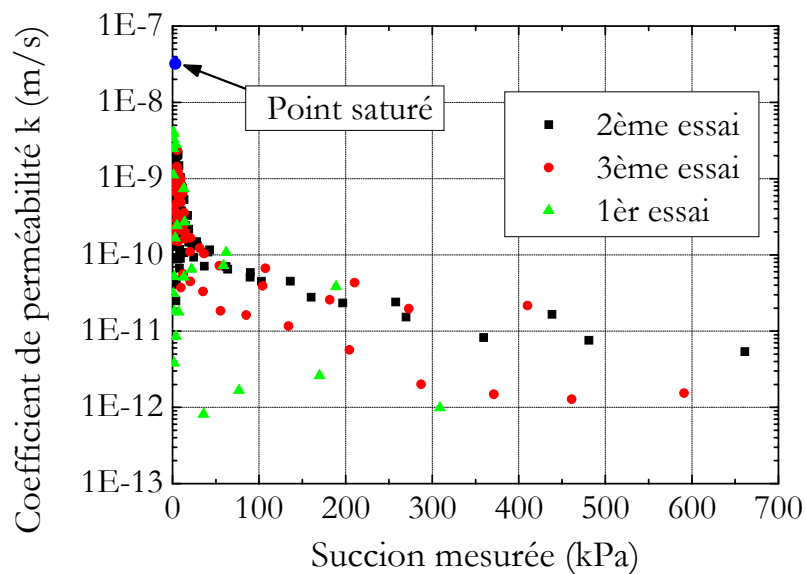


Figure III - 43. Variation du coefficient de perméabilité avec la succion pour les 3 essais

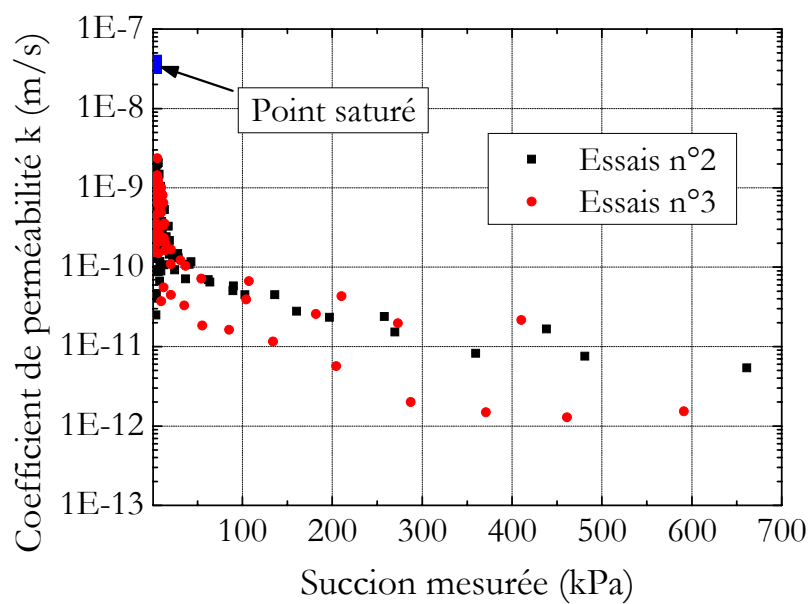


Figure III - 44. Variation du coefficient de perméabilité avec la succion – 2^{ème} & 3^{ème} essai

3.3 Mesure directe de la succion in situ

Il s'agit de l'utilisation des tensiomètres développés en conditions in situ pour suivre la succion. La période des mesures (mai – juin 2004) couvre le passage de la saison froide à chaude, permettant ainsi d'observer de plus grandes variations de succion.

On présente d'abord les données météorologiques afin d'avoir une idée de l'ordre de grandeur de ces paramètres. On présente ensuite les données du sol comme la teneur en eau volumique et la température du sol à différentes profondeurs. Les mesures de la succion sont comparées avec les teneurs en eau volumiques correspondantes afin de vérifier la qualité des mesures.

3.3.1 Données météorologiques en mai – juin 2004

Les principales données météorologiques pour les deux mois de mesures (mai – juin 2004) ont été fournies par le Cemagref. Ces données sont journalières et dans la présentation adoptée une journée de mesure est représentée par une moyenne. Les paramètres considérés sont : les précipitations, l'humidité relative de l'air, la température de l'air mesurée à 2 m de la surface de sol, la vitesse du vent mesurée à 8 m de la surface de sol, le rayonnement solaire et l'évapotranspiration Penman – Monteith.

Les données de la plupart des paramètres sont complètes pour toute la période prise en compte à l'exception des données des précipitations et de la vitesse du vent, qui sont absentes dans l'intervalle de temps du 20 mai au 10 juin.

On peut utiliser les valeurs moyennes de ces paramètres (Tableau III - 3) afin de caractériser le climat de cette période. On remarque que les valeurs du mois de juin sont en général supérieures aux valeurs mesurées pendant le mois de mai, ce qui confirme le passage vers la saison chaude de mai à juin.

Paramètre	Mai - juin	Mai	Juin
Rayonnement moyen (J/m ² s)	907,88	904,61	911,15
Evapotranspiration (mm/ jour)	32,06	28,45	35,67
Température de l'air (°C)	14,54	12,3	16,79
Humidité relative de l'air (%)	73,69	72,95	74,43
Vitesse du vent (à 8 m de hauteur) (km/h)	1,581	1,814	1,347

Tableau III - 3. Valeurs moyennes des paramètres pris en compte mai – juin

On présente sur la Figure III - 45 les précipitations. Cette période a été en général assez sèche : on remarque des précipitations assez importantes le 8 mai (25 mm) et quelques autres précipitations moins soutenues qui ne dépassent pas les 10 mm. Il manque des données entre le 22 mai et 03 juin (on constate à partir des données des autres graphiques qu'il y a eu au moins deux pluies le 29 et le 31 mai). Cependant on estime que ces données sont presque complètes.

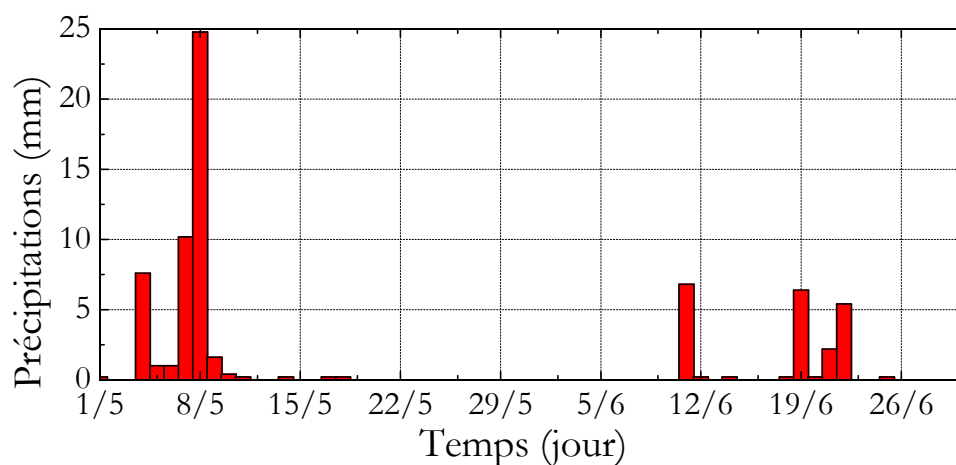


Figure III - 45. Précipitations pendant la période mai – juin 2004

Le graphique de l'humidité relative de l'air (Figure III - 46) confirme et complète les données des précipitations. La valeur moyenne de l'humidité relative est quasi constante pour les deux mois avec un écart moyen de 1,5%. On observe toujours une augmentation de l'humidité relative après les jours de pluie. L'humidité relative a frôlé la valeur de 100% le jour suivant la pluie la plus importante. L'humidité relative diminue graduellement jusqu'à la fin du mois de mai pour atteindre sa valeur minimale de 58,5% ; et elle augmente à nouveau suite à une autre pluie. Pendant le mois de juin la tendance est vers la diminution.

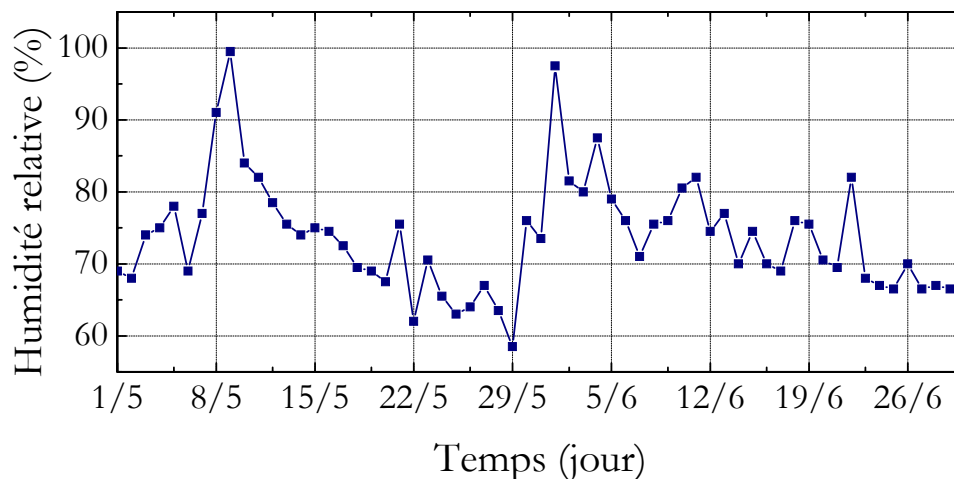


Figure III - 46. Humidité relative de l'air dans la période de mai – juin 2004

On observe (Figure III - 47) que les valeurs de la température de l'air (mesurée à 2 m de la surface du sol) augmentent graduellement en fluctuant. Si l'on compare les deux mois de mesures, on remarque une différence moyenne de 4,5 °C (la température moyenne passe de 12,3 °C à 16,8 °C) entre le mois de mai et juin.

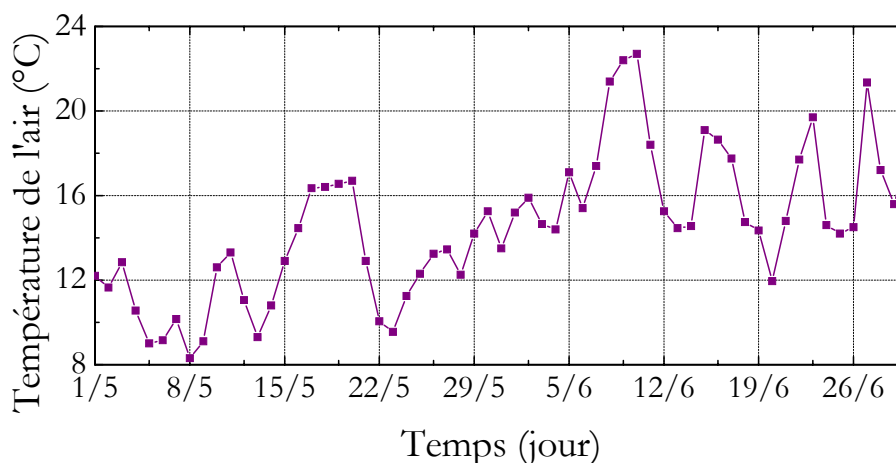


Figure III - 47. Température de l'air à 2 mètres de la surface pendant la période de mai - juin 2004

Les données de la vitesse du vent (Figure III - 48), obtenues à 8 m de la surface du sol, ne sont pas complètes (il manque les valeurs entre le 20 mai et le 10 juin). En examinant les données disponibles, on observe une diminution de la vitesse moyenne du vent (elle passe de 1,81 km/h au mois de mai à 1,35 km/h au mois de juin).

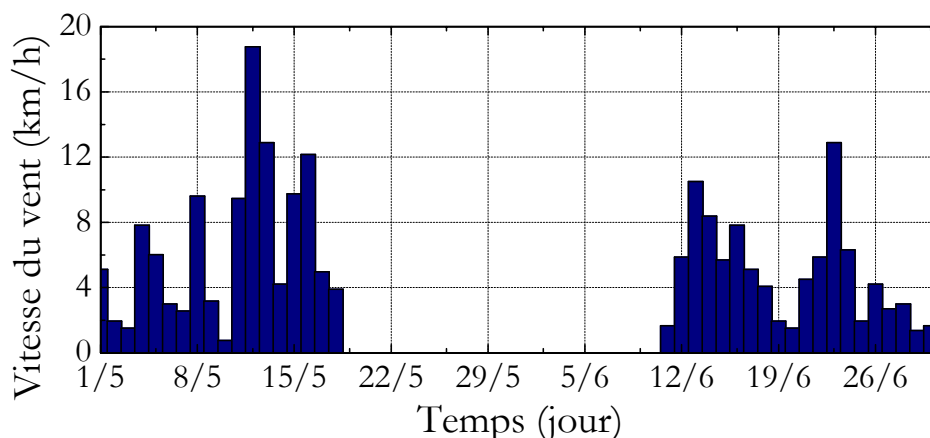


Figure III - 48. Vitesse du vent à 8 m de la surface pendant la période de mai – juin 2004

On remarque sur la Figure III - 49 et la Figure III - 50 que les valeurs du rayonnement solaire et de l'évapotranspiration présentent les mêmes oscillations. Ceci montre que l'évapotranspiration est étroitement liée au rayonnement. On observe que les valeurs du rayonnement solaire sont relativement stables (à l'exception de 8-9 mai et 1-4 juin), et que la différence entre les moyennes des deux mois est faible (on passe de 904,6 J/m²s au mois de mai à 911,2 J/m²s au mois de juin).

Concernant l'évapotranspiration, on remarque une augmentation importante entre les deux mois. Elle passe de 28,45 mm/jour pour le mois de mai à 35,67 pour le mois de juin, ce qui montre que d'autres paramètres que le rayonnement jouent également un rôle non négligeable dans le processus de l'évapotranspiration.

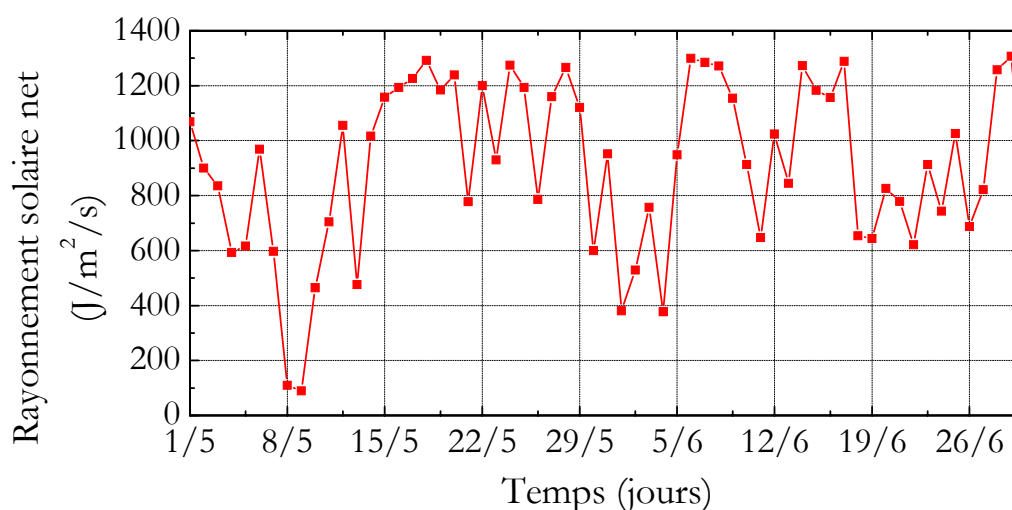


Figure III - 49. Rayonnement solaire net dans la période de mai – juin 2004

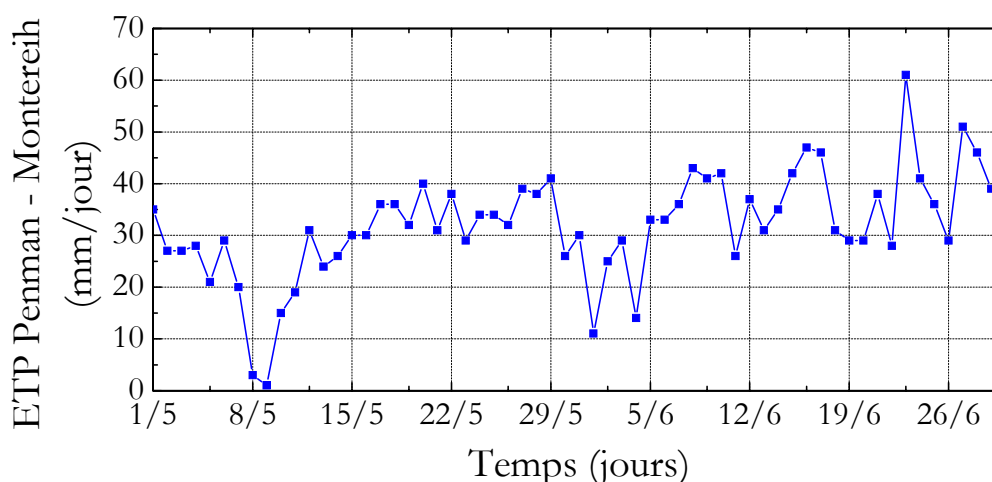


Figure III - 50. Evapotranspiration Penman – Monteireih dans la période de mai – juin 2004

3.3.2 Données des paramètres du sol

On présentera les données de la teneur en eau volumique du sol à 7 profondeurs et la température de sol à trois profondeurs. Les données de la teneur en eau volumique sont disponibles à partir du 7 mai et les données de la température du sol à partir du 13 mai. Les valeurs journalières de la teneur en eau volumique (des TDR) sont fournies par le Cemagref. En revanche, les températures du sol ont été mesurées à l'aide des sondes de notre station météo Opus 208 avec une fréquence de mesure de 5 min.

3.3.2.1 Teneur en eau volumique

Les profils de la teneur en eau volumique à 7 profondeurs (de 5 cm à 115 cm) montrent clairement que la période devient de plus en plus sèche (Figure III - 51). Les effets de quelques pluies (8 mai, 29 et 31 mai) se traduisent par une augmentation de la teneur en eau sur toute la profondeur du sol étudiée. L'influence de ces pluies est enregistrée jusqu'à une profondeur de 50 cm environ. Les pluies ont eu des effets de courte durée ; on observe une reprise rapide de la diminution de la teneur en eau jusqu'à la fin de la période étudiée (fin juin), et cela plus particulièrement pour une faible profondeur de sol (0 – 25 cm).

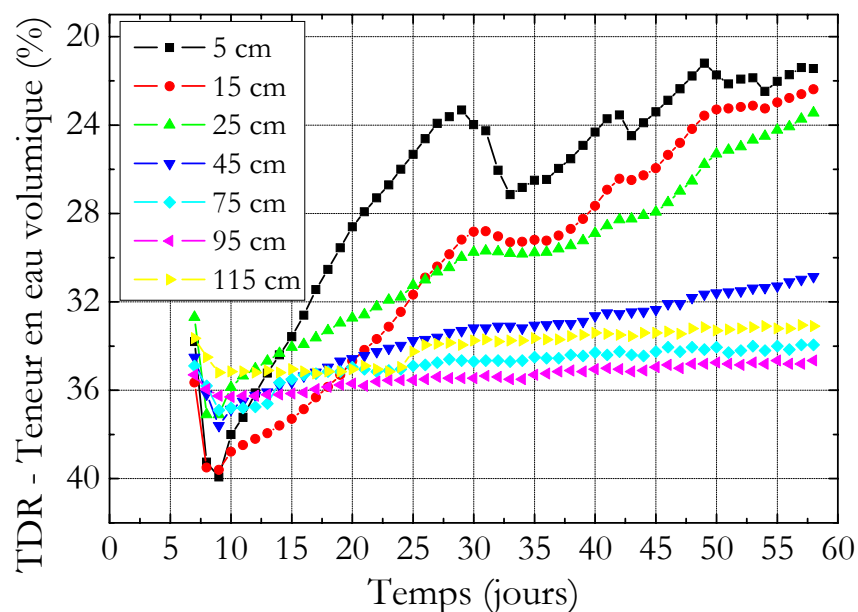


Figure III - 51. Teneur en eau volumique à différentes profondeurs dans la période de mai – juin 2004

On présente sur la Figure III - 52 le profil de la teneur en eau volumique (0 – 115 cm) pour les deux mois de mesures. On observe une variation importante des valeurs proches de la surface (entre 21 et 40 %), ce qui est normal sachant que pour cette partie du sol l'effet des échanges sol – atmosphère est le plus prononcé. Par contre à partir de 75 cm de profondeur on observe que les valeurs mesurées varient très peu (2-3 %), elles sont indépendantes de ce qui se passe dans l'atmosphère et à l'interface sol – atmosphère.

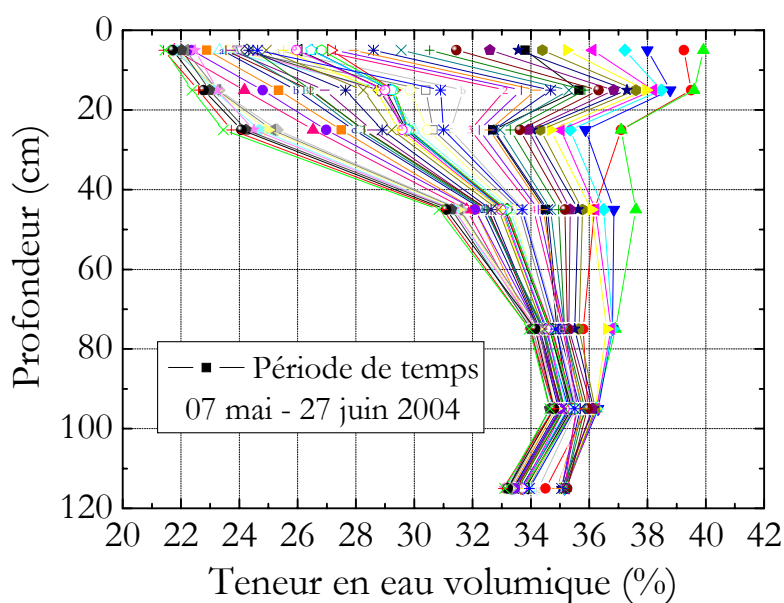


Figure III - 52. Profils de la teneur en eau volumique dans la période de mai – juin 2004

3.3.2.2 Température du sol

Les valeurs mesurées de la température à trois profondeurs sont complètes à partir du 13 mai (Figure III - 53). Dans la présentation, le temps est présenté en deux échelles différentes : heures et jours.

La température augmente de manière continue pendant tous le mois de mai et elle se stabilise pendant le mois de juin. On note un écart moyen de 4 °C entre les deux mois. On observe clairement l'effet des cycles jour – nuit ainsi que l'influence de la profondeur où se sont effectués les mesures.

La température du sol à 1 cm est très influencée avec une amplitude importante entre le jour et la nuit, de 4 à 9 °C. Cette influence diminue à 10 cm de profondeur ; les changements journaliers se situent entre 2 et 5 °C. L'influence de l'interface a presque disparu pour la température à 25 cm de profondeur.

Les mouvements journaliers de la température ne dépassent pas 0,5°C. On remarque que la température moyenne est plus importante à 1 cm de profondeur et elle diminue en profondeur. Cela signifie que le flux de chaleur est dirigé vers la profondeur du sol et vérifie que l'on est bien dans la période dite de saison chaude.

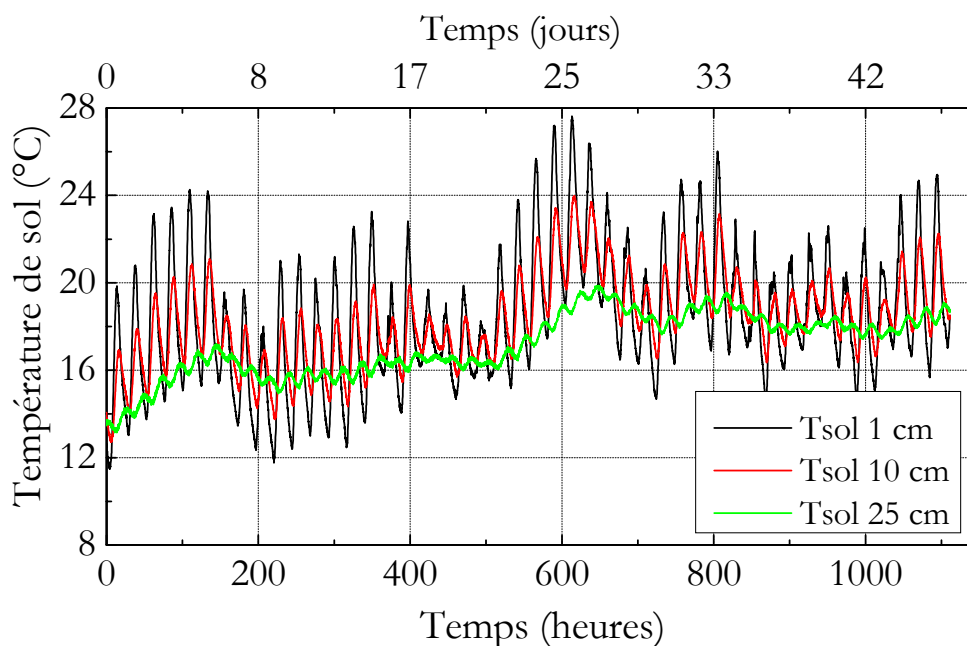


Figure III - 53. Température de sol mesurée à trois profondeurs différentes dans la période de mai – juin 2004

3.3.3 Suivi de la succion

On fera une explication détaillée des résultats pendant la période des mesures (mai – juin 2004) à deux profondeurs (25 et 45 cm) et on parlera en particulier de l'effet des pluies.

3.3.3.1 Résultats obtenus

La Figure III - 54 présente les résultats de mesures de la succion à deux profondeurs (25 et 45 cm) pendant les deux mois d'observation (29 avril – 30 juin). La fréquence de mesures était de 5 min. La succion augmente progressivement tout au long de cette période de temps à l'exception des jours de pluies : la succion passe de 34 kPa (29 avril) à 160 kPa (30 juin) à 25 cm de profondeur, et elle passe de 30 kPa (29 avril) à 119 kPa (30 juin) à 45 cm de profondeur. Les variations des valeurs mesurées entre le jour et la nuit sont faibles, de l'ordre de 2 à 4 kPa. On remarque que la variation est plus importante à 25 cm.

On remarque également sur la Figure III - 54 plusieurs pulses verticaux sur les deux courbes qui donnent l'impression d'une chute instantanée des valeurs mesurées. Ces artéfacts correspondent au moment de changement des tensiomètres. Les mesures étaient arrêtées durant 30 à 60 min, le temps d'effectuer le changement de tensiomètre.

L'effet du changement des tensiomètres peut être mieux observé sur la Figure III - 56, où il est présenté à 25 cm de profondeur vers 385 h, suivi de plusieurs jours de mesures, et le changement d'un autre à 45 cm vers 600 h.

L'effet des pluies se traduit par une baisse des valeurs de succion. Seules les dates des pluies : 8 mai, 29 – 31 mai et 10 – 12 juin seront prises en compte. Ces trois pluies sont numérotées respectivement en I, II et III sur le graphique de la Figure III - 54. D'autres phénomènes pluvieux ont été observés mais de très faibles amplitudes, leurs effets n'ont pas dépassé une journée, et la diminution de la succion engendrée est restée très faible.

On présente sur la Figure III - 55 les résultats des données de la teneur en eau volumique. Les données sont disponibles du 7 mai au 27 juin. Malgré l'absence des données des premiers jours, des comparaisons entre les deux paramètres – succion et teneur en eau – peuvent être faites.

On observe une augmentation rapide de la teneur en eau le jour de la pluie du 8 mai, et par la suite une diminution progressive. La diminution est légèrement plus importante pour la teneur en eau à 25 cm de profondeur. Les effets des deux autres pluies, bien qu'ils soient perceptibles, sont moins accentués. Ils se traduisent par un ralentissement de la diminution de la teneur en eau volumique pendant 3 à 4 jours.

Une diminution plus importante de la teneur en eau volumique à 25 cm est observée après le 10 juin. On pense que c'est l'influence directe de la saison chaude, car elle touche les deux profondeurs et elle devrait s'accroître au-delà de notre période limitée d'observation.

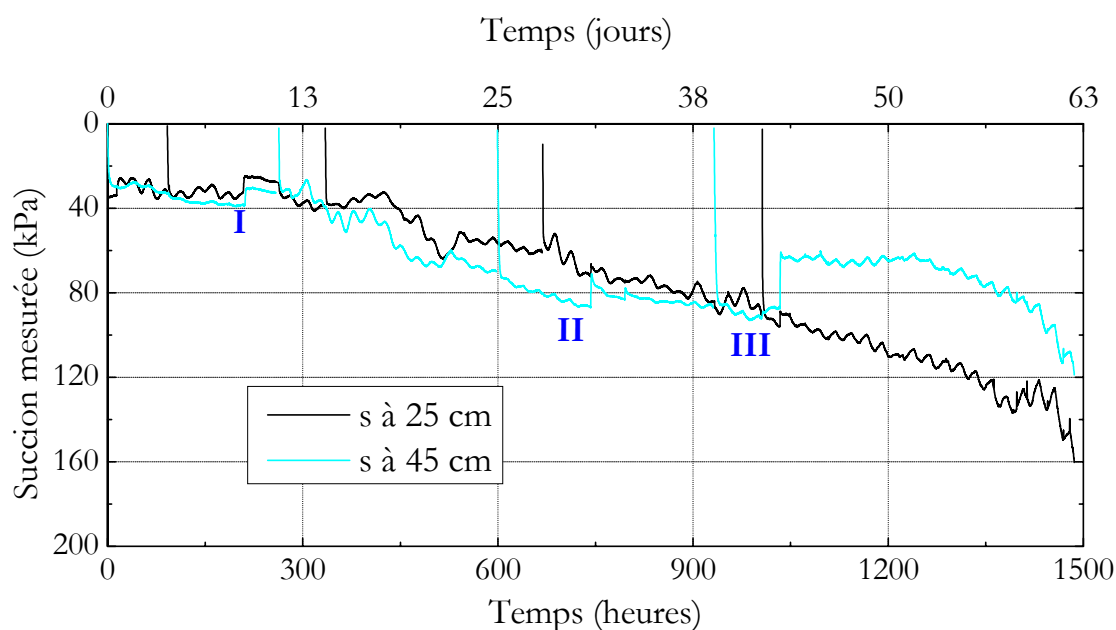


Figure III - 54. Succion mesurée à deux profondeurs de sol dans la période de mai – juin 2004

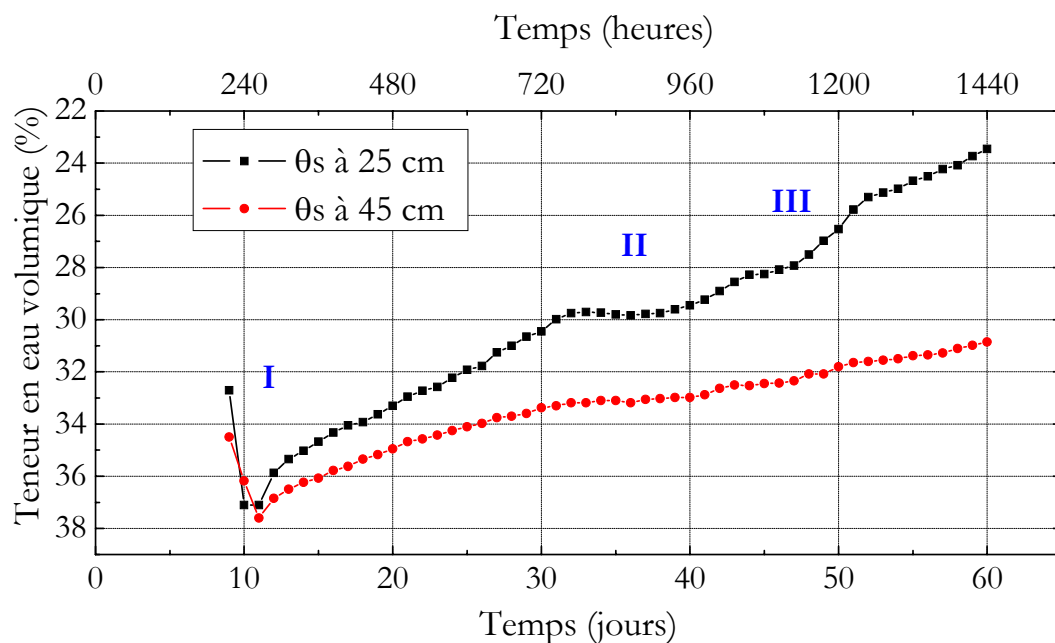


Figure III - 55. Teneur en eau volumique à 25 et 45 cm de profondeur – mai – juin 2004

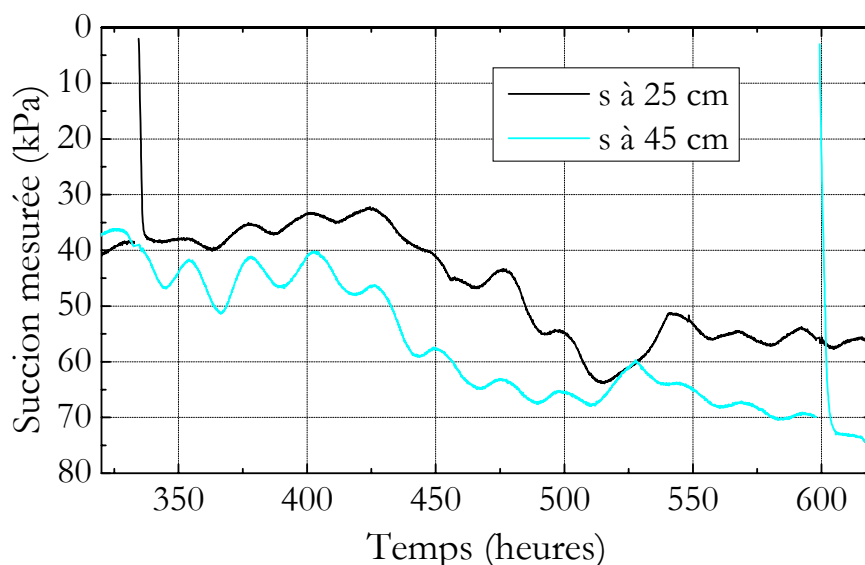


Figure III - 56. Illustration de l'effet du changement des tensiomètres *in situ*

3.3.3.2 Effet des pluies

On examine ici les effets de chacun des épisodes pluvieux, car le processus d'infiltration renseigne sur l'état du sol. Pour la première pluie, on observe qu'elle pénètre graduellement dans le sol et que son effet n'est significatif qu'après un certain laps de temps (Figure III - 57). On remarque d'abord cet effet à 25 cm et après un intervalle de temps de 2 heures, il se ressent à 45 cm. La suction à 25 cm de profondeur baisse en premier et continue à diminuer pendant 160 minutes : elle passe de 32 kPa à 25 kPa. Les valeurs suivantes semblent plus stables. La durée de la baisse de suction à 45 cm est de 170 minutes ; la suction passe de 39 kPa à 31 kPa.

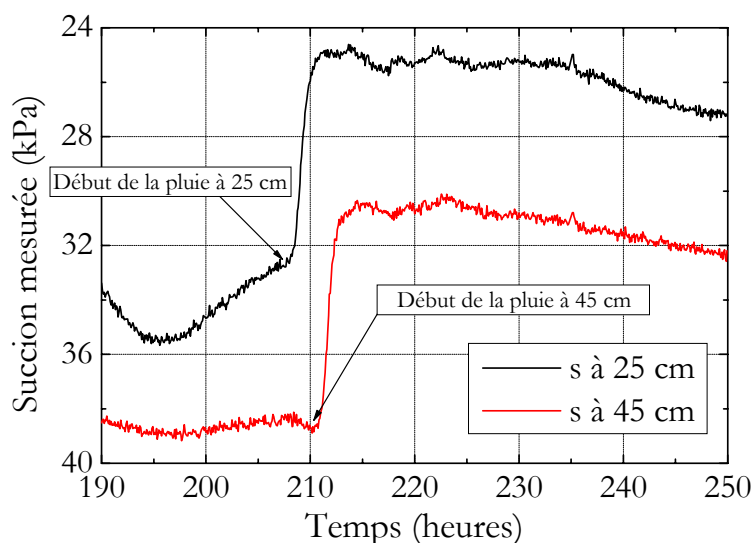


Figure III - 57. Effet de précipitations sur la suction mesurée dans la période du 07 – 09 mai 2004

L'effet de la deuxième pluie est différent. On enregistre deux pluies à intervalle de 2 jours, mais seule la première semble être utile pour fournir une information complète concernant l'infiltration (Figure III - 58). Dans ce cas, l'infiltration est plus rapide et dure moins longtemps que dans le cas précédent. L'effet est observé presque en même temps à 25 et à 45 cm de profondeur. La succion à 25 cm de profondeur passe de 72 kPa à 66 kPa, cette diminution a une durée limitée de 35 minutes. A 45 cm de profondeur, la durée est plus importante (95 minutes) avec des valeurs mesurées passant de 87 kPa à 71 kPa. On constate en comparant la baisse de la succion aux deux profondeurs, qu'elle est plus importante à 45 cm. Ceci montre que cet épisode pluvieux est survenu durant une période plus sèche que dans le cas précédent, l'infiltration c'est donc faite plus rapidement.

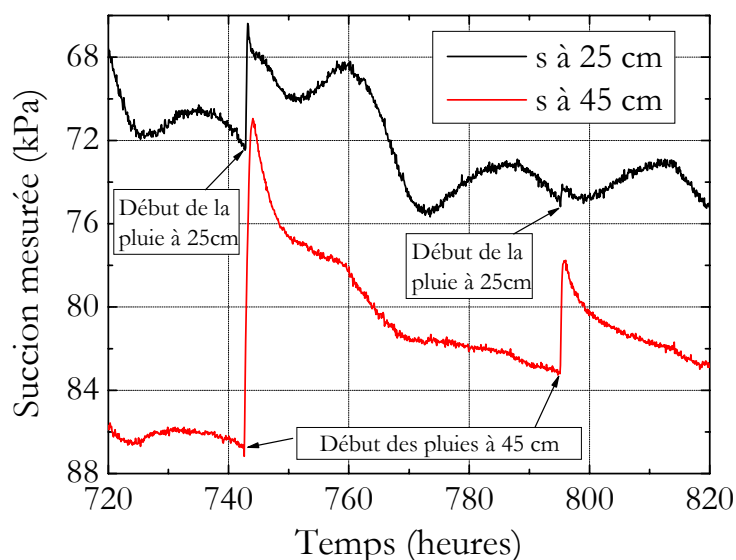


Figure III - 58. Effet de précipitations sur la succion mesurée dans la période du 29 – 31 mai 2004

Pour la troisième pluie, on a le même constat que pour la pluie précédente : l'infiltration est rapide. La baisse de la succion est observée en même temps pour les deux niveaux de mesures (Figure III - 59). A 25 cm de profondeur la baisse continue sur 35 minutes et la valeur mesurée passe de 96 kPa à 89 kPa. On a une durée plus importante à 45 cm de profondeur (95 minutes) et une baisse plus importante (la valeur de la succion passe de 87 kPa à 61 kPa). Ces résultats confirment que le sol se trouvait dans un état relativement sec pendant cette période.

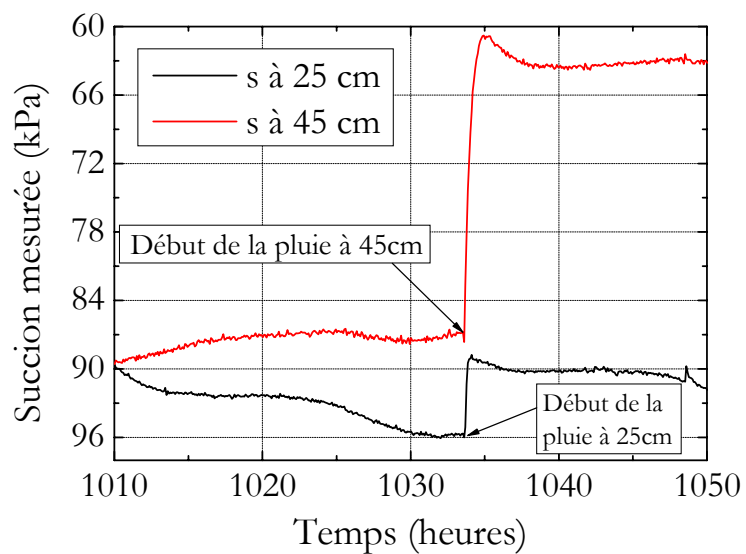


Figure III - 59. Effet de précipitations sur la succion mesurée dans la période du 10 – 12 juin 2004

3.4 Conclusions

L'étude expérimentale a permis de déterminer les paramètres de la rétention d'eau pour les deux matériaux étudiés (argile verte de Romainville et limon de Boissy le Châtel). La méthode osmotique ainsi que la méthode de contrôle de succion par phase vapeur ont été utilisées pour l'argile verte. Par contre la méthode des mesures directes de la succion à l'aide du tensiomètre a été utilisée pour le limon.

La méthode osmotique a permis de définir des points de la courbe de rétention pour les succions faibles entre 1 et 6,1 MPa. En revanche la méthode de contrôle de succion par phase vapeur a couvert une large plage de succions entre 6,1 et 216 MPa. D'abord on a commencé à appliquer les paliers de succions en suivant le chemin de séchage des échantillons, puis en suivant le chemin de remouillage. Pour chaque palier de succion appliquée, les variations de l'indice des vides (entre 0,33 et 1,04) et du degré de saturation (entre 24 et 100 %) ont été déterminées. Globalement on a observé trois parties dans les courbes caractéristiques : une première partie caractérisée par une variation de l'indice des vides importante, une deuxième partie avec une variation de l'indice des vides modérée et une troisième partie avec une faible variation. Les points de séparation correspondent au point d'entrée d'air ($s = 13,1$ MPa) et au changement de régime ($s = 113$ MPa). Pour la deuxième partie une hystérésis est mieux observée dans le graphique $s - S_r$. Pour la troisième partie la réversibilité est mise en évidence dans les différents graphiques.

La méthode des mesures directes de la succion a permis de réaliser une série de mesures situées entre 35 et 1900 kPa (les teneurs en eau volumiques correspondantes varient entre 17,3 et 27,3%). Dans ce cas, seul le chemin de séchage a été suivi.

La perméabilité du limon de Boissy le Châtel a été déterminée en utilisant deux méthodes. La première, classique, avec un perméamètre à charge variable a permis de trouver le coefficient de perméabilité à l'état saturé. L'autre méthode, celle des profils instantanés, a permis de définir les profils du coefficient de perméabilité à l'état non saturé.

La perméabilité du limon à l'état saturé a été déterminée en utilisant un oedomètre relié à un perméamètre à charge variable et à plusieurs niveaux de chargement (10 à 800 kPa). La

valeur du coefficient de perméabilité à l'état saturé est $k_w^s = 1,03 \times 10^{-8}$ m/s et au dernier niveau de chargement (800 kPa), il passe à $6,14 \times 10^{-11}$ m/s.

Le développement de la colonne d'infiltration a permis de réaliser des essais de perméabilité à l'état non saturé. Trois essais sont réalisés à différentes succions initiales (entre 460 et 1030 kPa). Le temps d'infiltration complet dépend des valeurs initiales de succion (entre 9 et 18,5 jours). A l'aide des isochrones de succion et de teneur en eau on a déterminé les coefficients de perméabilité à l'état non saturé. On observe les variations de la perméabilité dans le temps (pendant l'infiltration de l'échantillon) et en fonction de sa hauteur. Les trois essais d'infiltration donnent un coefficient de perméabilité compris entre $k_w^{\min} = 8,2 \times 10^{-13}$ m/s et $k_w^{\max} = 4,1 \times 10^{-9}$ m/s. La plupart des valeurs de perméabilité à l'état non saturé pour les trois essais d'infiltration se situent entre 10^{-10} et 10^{-11} m/s.

Les mesures directes de la succion in situ pour la période mai – juin 2004 ont fourni des informations riches et complètes. Les mesures à deux profondeurs différentes (25 et 45 cm) ont permis de faire un suivi des variations de la succion et de les mettre en relation directe avec les conditions météorologiques (telles que précipitations, rayonnement, évapotranspiration, température et humidité relative de l'air, vitesse du vent) et les données du sol (teneur en eau et température du sol). Le passage vers la saison dite chaude permet d'observer des variations importantes de la succion. A 25 cm de profondeur, on est passé de 34 kPa (29 avril) à 160 kPa (30 juin) ; à 45 cm de profondeur, on est passé de 30 kPa (29 avril) à 119 kPa (30 juin).

4 APPLICATION D'UN MODELE NUMERIQUE

Ce chapitre comporte deux grandes parties. La première partie théorique aide à comprendre la modélisation des échanges sol – atmosphère. On présentera à cet égard le modèle développé au Cermes par Cui et al. (2003), qui est basé principalement sur les travaux de Wilson et al. (1990, 1994) et de Blight (1997). Ce modèle permet de prendre en compte le couplage entre le transfert d'humidité (l'eau liquide ou vapeur) et le transfert de chaleur.

La deuxième partie est la simulation numérique. La période de simulation (mai 2004) correspond à celle de mesures in situ. Les données météorologiques du site expérimental de Boissy le Châtel ont été utilisées comme paramètres entrants du modèle. Les paramètres utilisés sont déterminés principalement à partir des essais réalisés au laboratoire. Les simulations effectuées ont permis notamment de mettre en évidence la sensibilité de certains paramètres comme ceux de la courbe de rétention d'eau et la courbe de perméabilité à l'état non saturé.

4.1 Modélisation des échanges sol – atmosphère

Le modèle de l'interface sol – atmosphère développé au Cermes (Cui et al. 2003) permet un couplage sol – atmosphère. Le modèle intègre les lois de Darcy et de Fick pour décrire les transferts d'eau en phase liquide ou en phase vapeur. Le transfert d'humidité est couplé au transfert de chaleur par l'intermédiaire de la pression partielle de vapeur d'eau. La méthode des différences finies a été utilisée pour la résolution numérique.

4.1.1 *Modèle de l'interface sol – atmosphère*

L'interface sol – atmosphère est un élément clé, car elle définit les conditions à la surface de sol en termes de température et de succion. On prendra en compte deux équations :

- 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.

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

- ⇒ Des précipitations (la pluie, la neige, le brouillard etc.) qui sont considérées comme une entrée et donc une valeur positive ;
- ⇒ De l'évaporation (pendant et après la pluie), de l'interception (pendant la pluie) par le feuillage des arbres et du ruissellement, qui sont considérés comme des pertes et donc une valeur négative.

Ce bilan d'eau (Figure IV - 1) peut s'exprimer par l'équation (IV - 1) :

$$B = P - (E + I_{\text{int}} + R_{\text{off}}) \quad (\text{IV} - 1)$$

Où :

- B : le bilan d'eau (mm/jour) ;
- P : les précipitations (mm/jour) ;
- E : l'évaporation (mm/jour) ;
- I_{int} : l'interception (mm/jour) ;
- R_{off} : le ruissellement (mm/jour)

Pour le site de Boissy le Châtel, en l'absence d'arbres, on prend $I_{\text{int}} = 0$.

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.

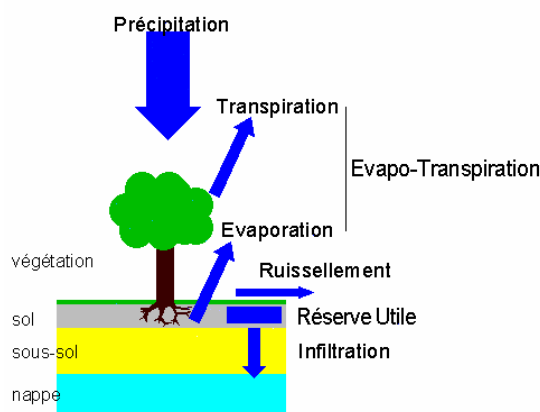


Figure IV - 1. Place de l'eau du sol dans le cycle de l'eau d'après Beauchamp (2002)

4.1.1.1 Détermination de l'évaporation – la formule de Penman

On peut calculer l'évaporation potentielle E à partir des conditions climatiques telles que la température, l'humidité relative, la vitesse du vent et les radiations solaires. Penman (1948) a proposé une approche semi empirique pour calculer l'évaporation potentielle basée sur le bilan de l'énergie à la surface du sol :

$$E = \frac{\Delta R_n / L_v + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (\text{IV} - 2)$$

Où :

- E : le taux d'évaporation potentielle (mm/jour)
- Δ : la pente de la courbe liant la température et la pression de vapeur d'eau saturante (Pa/°C)
- R_n : la radiation solaire nette entrante (W/m² ou J/m²s))
- L_v : la chaleur latente pour la vaporisation d'eau (J/kg)
- γ : le constant psychrométrique (66 Pa/°C)
- E_a : un paramètre (mm/jour) défini par :

$$E_a = 0,165 \times (P_{vs} - P_v) \times (0,8 + u_2/100)$$
- P_{vs} : la pression de vapeur d'eau saturante (mbar)
- P_v : la pression de vapeur d'eau réelle (mbar)
- u_2 : la vitesse du vent à 2 m d'altitude (km/jour)

4.1.1.2 Bilan d'énergie

Le rayonnement net est défini comme la quantité d'énergie radiative disponible à la surface de la terre pouvant être transformée en d'autres formes d'énergie par les divers mécanismes physiques ou biologiques de la surface (Figure IV - 2). En utilisant l'équation du bilan d'énergie (Taner 1960, Blight 1997) il est exprimé par :

$$R_n = G + H + L_e \quad (\text{IV} - 3)$$

- R_n : le flux de rayonnement net à la surface du sol (le rayonnement des rayons solaires directs et diffus moins le rayonnement de réflexion et le rayonnement des longues ondes terrestres (W/m² ou J/m²s))
- G : le flux de chaleur du sol (W/m² ou J/m²s) qui est la chaleur transmise dans le sol

- H : le 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_e : le 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

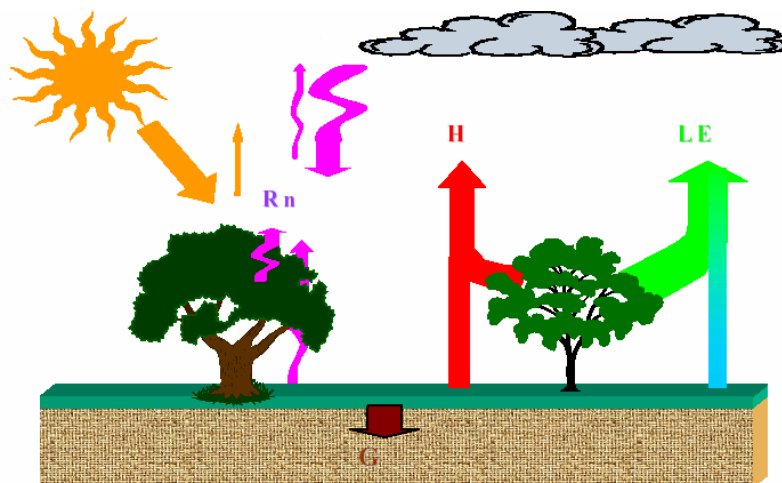


Figure IV - 2. Composants du bilan d'énergie d'après Demarty (2002)

On peut exprimer le flux de chaleur du sol (G) en fonction du coefficient de la conductivité thermique du sol λ ($W/m^{\circ}C$) et du gradient de la température du sol pour une teneur en eau quelconque :

$$G = \lambda_s \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{soil} \quad (IV - 4)$$

Où :

- $(\partial T / \partial y)_{soil}$: le gradient de température du sol à la surface du sol (l'axe des y est dirigé vers le haut)
- λ : le coefficient de la conductivité thermique du sol ($W/m^{\circ}C$)

La conductivité thermique du sol représente la facilité de propagation de la chaleur par conduction thermique. Elle dépend de la quantité d'eau (elle est sensible à la teneur en eau du sol) et de l'air.

Le flux de chaleur sensible dans l'air peut être écrit :

$$H = -\lambda_a \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{air} \quad (IV - 5)$$

Où :

- λ_a : le coefficient de la conductivité thermique de l'air (W/m°C)
($\lambda_a = 0.025$ W/m°C selon Campbell et Norman 1998)
- $(\partial T / \partial y)_{air}$: le gradient de la température dans l'air à la surface du sol

On note qu'il existe une discontinuité du gradient de la température à la surface de sol :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{air} \neq \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{soil}$$

Le flux de chaleur latente s'écrit selon l'expression :

$$L_e = \frac{L_v \rho_a \varepsilon D_{vap}}{P_a} \frac{\partial P_v}{\partial y} \quad (IV - 6)$$

Où :

- L_v : la chaleur latente de l'évaporation de l'eau (J/kg)
- ρ_a : la masse moléculaire d'air (kg/m³)
- ε : le rapport des poids moléculaire entre l'eau et l'air
- D_{vap} : la diffusivité thermique de la vapeur d'eau dans l'air (m²/s)
- P_a : la pression atmosphérique (kPa)
- $\partial P_v / \partial y$: le gradient vertical de pression de la vapeur d'eau dans l'air

Bowen (1926) a défini le rapport dit de Bowen entre le flux de chaleur sensible dans l'air H (Eq. 5) et le flux de chaleur latente L_e (Eq. 6)

$$\beta = \frac{H}{L_e} \quad (IV - 7)$$

Blight (1997) a noté que le flux net de radiation R_n se transforme en toute priorité en chaleur latente d'évaporation L_v ; H est toujours petit en comparaison avec G (Blight 2003).

4.1.2 Couplage entre le transfert hydraulique et le transfert thermique

Par l'évapotranspiration s'établit un flux d'eau transitoire de la nappe phréatique vers la surface du sol. Ce flux d'eau est accompagné par un flux de chaleur du au gradient de température ; le sol peut être susceptible de présenter des changements de volume sous les effets combinés de la succion et de la température. Le flux d'eau, le flux de chaleur et le changement de volume font partie d'un problème de couplage complexe multiphasique. Dans le but de simplifier le problème, le sol est considéré comme non déformable comme pour Wilson et al. (1994).

Sous conditions de contraintes nettes constantes, Wilson et al. (1994) ont utilisé l'expression suivante qui lie les changements de la teneur en eau aux changements de la succion :

$$\frac{\Delta V_w}{V} = m_2^w d(u_a - u_w) \quad (\text{IV} - 8)$$

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

4.1.2.1 Flux d'eau en phase liquide

Le flux d'eau comprend deux parties : le flux d'eau liquide et le flux de la vapeur d'eau. La loi généralisée de Darcy est utilisée dans le cas de l'eau liquide :

$$q_l = - \left[k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \right] \quad (\text{IV} - 9)$$

La charge hydraulique est définie :

$$h_w = \left(y + \frac{-s}{\gamma_w} \right) \quad (\text{IV} - 10)$$

Où :

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

4.1.2.2 Flux d'eau en phase vapeur

La loi de Fick est utilisée pour décrire le flux de vapeur d'eau (Philip and De Vries 1957) :

$$q_v = \frac{-1}{g\rho_{wv}} \left[D_v \left(\frac{W_v}{RT} \right) \frac{\partial P_v}{\partial y} \right] \quad (\text{IV} - 11)$$

Où :

- q_v : le flux de vapeur d'eau (m/s)
- D_v : la diffusivité de la vapeur d'eau dans le sol $D_v = \alpha(1 - S_r)nD_{vap} \frac{W_v}{RT}$
- α : le coefficient de tortuosité du sol,
- S_r : le degré de saturation
- n : la porosité du sol
- $(1-S_r)n$: la porosité occupée par l'air (ou la section de passage disponible pour le flux de vapeur)
- D_{vap} : la diffusivité moléculaire de la vapeur d'eau dans l'air
- W_v : le poids molaire de l'eau (0,018 kN/mol)
- R : la constante des gaz parfaits (8,314 J/mol. °K)
- T : la température absolue (°K)
- P_v : la pression partielle de vapeur d'eau (kPa)

Comme Lai et al. (1976), Wilson et al. (1994) ont suggéré de prendre le coefficient de tortuosité du sol égal à $[(1 - S_r) n]^{2/3}$ et ils ont adopté une expression de D_{vap} en fonction de la température donné par Kimball et al. (1976) :

$$D_{vap} = 0.229 \times 10^{-4} \left[1 + \frac{T}{273} \right]^{1.75} \quad (\text{IV} - 12)$$

4.1.2.3 Flux total

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

$$q = q_l + q_v \quad (\text{IV} - 13)$$

En égalisant la divergence du flux total de l'eau avec le différentiel de temps de la teneur en eau volumique $\Delta V_w/V$ donné par l'équation (IV - 9) et en considérant qu'il n'y a pas de

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 unidirectionnelle de transfert de l'eau liquide et de la vapeur d'eau dans un sol non saturé :

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} = C_w^1 \frac{\partial}{\partial y} \left(k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) + C_w^2 \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) \quad (\text{IV} - 14)$$

avec $C_w^1 = \frac{1}{\rho_w g m_2^w}$ et $C_w^2 = \frac{P + P_v}{P(\rho_w)^2 g m_2^w}$ (IV - 15)

Où :

- C_w^1 : module de déformation volumique de l'eau liquide
- C_w^2 : module de déformation volumique de la vapeur d'eau
- $(P+P_v)/P$: facteur de correction pour la diffusion de vapeur
- P : pression atmosphérique (kPa)
- P_v : pression partielle de la vapeur d'eau (kPa)
- P_{vs} : pression de vapeur d'eau saturante (kPa)

On note que P_v et h_w sont liés par l'équation de Kelvin qui lie la succion $s = u_a - u_w$ (où $u_a = 0$) à la charge hydraulique h_w et à la pression partielle de vapeur d'eau P_v :

$$s = -[\rho_w g (h_w - y)] = -\frac{RT}{W_v} \ln \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (\text{IV} - 16)$$

Où :

- P_v/P_{vs} : l'humidité relative h_r

4.1.2.4 Transfert de chaleur dans le sol

Wilson et al. (1994) ont couplé l'équation (13) avec l'équation du transfert de chaleur de Philip et De Vries (1957) :

$$C_b \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - L_v \frac{P + P_v}{P} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) \quad (\text{IV} - 17)$$

Où :

- C_h : la capacité calorifique apparente du milieu poreux ($J/m^3 \cdot ^\circ C$)
- λ : la conductivité thermique du sol ($W/m \cdot ^\circ C$)
- L_v : la chaleur latente de vaporisation de l'eau (J/kg)

- D_v : la diffusivité de la vapeur d'eau dans le sol (Equation IV – 12)

Selon Wilson et al. (1994), l'équation (IV – 14) s'applique seulement dans le cas du transfert de chaleur par conduction, sans flux de chaleur convective. Les équations différentielles IV – 14 et IV – 17 décrivent le transfert d'eau et de chaleur dans un milieu poreux. Mais ces équations sont dérivées en prenant en compte de nombreuses hypothèses (Wilson et al., 1994) :

- la phase solide, liquide et air peuvent être traité comme continu dans le milieu poreux ;
- la matrice solide est indéformable ;
- le transfert d'humidité dû au gradient de pression osmotique est négligeable ;
- le coefficient de perméabilité de l'eau est une fonction de la teneur en eau et du degré de saturation ;
- les phénomènes d'hystérésis sont négligés ;
- L'équilibre thermodynamique local règne dans tout le milieu poreux, et aussi entre la phase liquide et la phase vapeur ;
- la température au sein du sol reste supérieure à 0°C et inférieure à 100°C ;
- les transferts de chaleur par convection au sein du sol sont négligeables ;
- la dissolution d'air dans l'eau est négligée ;
- les effets secondaires dus à l'écoulement de l'air et au changement de stockage en phase liquide et gazeuse sont négligeables.

4.1.2.5 Méthode de résolution

Pour résoudre le problème, les équations de transfert d'eau et de chaleur (IV – 14 et IV – 17) sont résolues simultanément en utilisant un schéma d'éléments finies. Une procédure itérative a été utilisée de façon à convenir des conditions aux limites supérieures (la température et la charge hydraulique totale) définies à la surface de sol par les conditions climatiques.

Les valeurs mesurées de la radiation solaire nette entrante R_n , de l'humidité relative h_r et de la vitesse du vent u_2 ont été utilisées pour calculer l'évaporation potentielle E en utilisant

l'équation IV – 2. Cette valeur correspond à la valeur cible de flux d'eau qui doit être calculée par le modèle au niveau de la surface du sol.

L'équation d'équilibre de l'énergie exprimant le flux de radiation nette entrante R_n comme la somme de flux de chaleur du sol (G), le flux de chaleur sensible (H) et le flux de chaleur latent (L_e) est exprimée ici différemment en utilisant le rapport de Bowen β ($= H/L_e$) et un autre paramètre δ égale à G/H :

$$R_n = H \left(1 + \delta + \frac{1}{\beta} \right) \quad (\text{IV} - 18)$$

Il y a trois variables inconnues dans cette équation, qui contrôlent la répartition de la chaleur selon trois destinations possibles. En absence d'information appropriée et dans un but de simplifier, il a été trouvé raisonnable de réduire le nombre de variables inconnues en adoptant une valeur constante du paramètre δ , en indiquant que les flux de chaleur à travers le sol et l'air restent dans la même proportion.

Une approche alternative serait de supposer un rapport constant entre le flux de chaleur de sol G et la radiation nette entrante R_n ($G \approx 5-10\% R_n$ selon Verhoff et al, 1999). On remarque que si on a une information supplémentaire dans les données mesurées comme la température d'air à un autre niveau (1 m par exemple) ou la valeur de flux de chaleur de sol G obtenue par la mesure directe utilisant un radiomètre qui mesure directement le flux de chaleur de sol, la supposition concernant δ ne serait pas nécessaire. Avec une valeur constante de δ acceptée, les deux variables inconnues restantes (H et β) sont alors calculées par une procédure itérative, à partir d'une valeur initiale arbitraire de β prise égale à 0,1. En connaissant R_n à partir des données mesurées, l'équation IV – 18 donne les valeurs de H , permettant le calcul des valeurs initiales de G et L_e .

Les données mesurées disponibles incluent la température et l'humidité relative de l'air à 2m au-dessus de la surface du sol. En appliquant une variation linéaire de la température et de l'humidité relative de l'air et en prenant les valeurs de H (chaleur dans l'air) et L_e (flux de chaleur latente) précédemment calculé respectivement dans l'équation IV – 5 et l'équation IV – 6, on obtient la température et la pression de la vapeur partielle d'eau P_v à la surface de

sol. La valeur de la succion à la surface du sol est calculée en utilisant l'équation de Kelvin (IV – 16).

En se basant sur une valeur arbitraire initiale du paramètre β , on définit ainsi en termes de température et de succion une condition initiale aux limites supérieures. La définition de la condition à la limite inférieure est plus simple puisqu'elle correspond à la profondeur où la température T et la charge hydraulique d'eau h_w sont connues (une profondeur de 1.15 m dans cette étude). Une autre possibilité pourrait être la considération d'une valeur de succion zéro au niveau de la nappe phréatique avec une mesure de température à ce niveau.

Une fois que l'ensemble des conditions de frontière est défini, il est maintenant possible de considérer la résolution numérique des deux équations couplées IV – 14 et IV – 17. La résolution fournit un profil de la température T et de la pression de vapeur partielle P_v qui peut être converti en succion en utilisant la loi du Kelvin.

En considérant les valeurs calculées de h_w et de P_v pour deux points consécutifs au ras de la surface du sol, les gradients $\partial h_w / \partial y$ et $\partial P_v / \partial y$ sont calculés, permettant respectivement le calcul du flux liquide d'eau q_l (Eq. IV – 9) et le flux de vapeur d'eau q_v (Eq. IV – 11), donnant ainsi le flux total d'eau q (Eq. IV – 13).

Cette valeur de q a été comparée avec la valeur de E calculée à partir des données mesurées et la différence a été comparée à une valeur acceptable maximale prise égale à 0,01. Dans le cas où la différence est plus grande, le processus itératif a été renouvelé avec une valeur différente de β , ceci jusqu'à la convergence voulue. Les profils de la température, de la teneur en eau volumique (ou la succion) sont alors déterminés.

4.1.3 Détermination des paramètres

La détermination des paramètres est une tâche difficile qui exige des techniques expérimentales spécifiques incluant le contrôle ou la mesure de succion et la détermination de la conductivité thermique. Dans cette étude, les paramètres utilisés pour les simulations

de conditions in situ ont été pris des résultats de différents essais au laboratoire et in situ sur le limon de Boissy le Châtel.

4.1.3.1 Conductivité hydraulique du sol

La conductivité hydraulique du sol a été simulée au moyen du principe de proportionnalité naturelle (Juarez-Badillo, 1992) :

$$f = \frac{1}{k_w} - \frac{1}{k_s} \quad (\text{IV} - 19)$$

Où k_w est la perméabilité du sol à une succion donnée, k_s est la perméabilité du sol quand la succion $s = 0$. Quand s varie de zéro à l'infini, la fonction (f) varie dans le même intervalle. Ainsi pour chaque valeur de succion (s), il existe une seule valeur de (f), et pour chaque valeur de (f) il existe une seule valeur de la succion :

$$\frac{df}{f} = \xi \frac{ds}{s} \quad (\text{IV} - 20)$$

Où ξ est le coefficient de proportionnalité. En intégrant l'équation IV – 20 en un point donné (f_1, s_1) on obtient :

$$\frac{f}{f_1} = \left(\frac{s}{s_1}\right)^\xi \quad (\text{IV} - 21)$$

En remplaçant f et f_1 dans l'équation IV – 21 en utilisant l'équation IV – 19, on obtient le coefficient de perméabilité k_w :

$$k_w = \frac{k_s}{1 + \left(\frac{k_s}{k_{w1}} - 1\right) \left(\frac{s}{s_1}\right)^\xi} \quad (\text{IV} - 22)$$

Où k_{w1} est la conductivité hydraulique (m/s) correspondant à la succion s_1 .

4.1.3.2 Courbe de rétention d'eau du sol

D'une façon similaire, on détermine la courbe de rétention d'eau :

$$\theta_w = \frac{\theta_{ws}}{1 + \left(\frac{\theta_{ws}}{\theta_{wl}} - 1\right) \left(\frac{s}{s_1}\right)^\xi} \quad (\text{IV} - 23)$$

Où : θ_s

- θ_w : la teneur en eau volumique à succion s

- θ_{ws} : la teneur en eau volumique à succion zéro
- θ_{w1} : la teneur en eau volumique à succion s_1
- ζ : le coefficient de proportionnalité.

On observe dans la plupart des sols une teneur en eau résiduelle qui correspond à une succion infinie. Cette observation conduit à une modification de l'équation IV – 23 :

$$\theta_w = \frac{\theta_{ws} - \theta_r}{1 + \left(\frac{\theta_{ws} - \theta_r}{\theta_{w1} - \theta_r} - 1\right) \left(\frac{s}{s_1}\right)^\zeta} + \theta_r \quad (\text{IV} - 24)$$

Où θ_r est la teneur en eau résiduelle.

Le coefficient de conductivité thermique λ (W/m°C) est une fonction de la température, de la diffusivité d'eau, du coefficient de chaleur latente et de la pression de vapeur partielle. La méthode utilisée pour calculer la conductivité thermique est celle de De Vries (1963). Cette méthode a été utilisée également par Jame (1977) et Wilson et al. (1994).

4.1.3.3 Capacité thermique du sol

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

$$L_v = 4.186 \times 10^3 (607 - 0.7 \times T) \quad (\text{IV} - 25)$$

Où T est la température en °C. Le coefficient de chaleur spécifique volumique représente la capacité de stockage thermique d'un volume élémentaire considéré. L'équation suivante proposée par De Vries (1963) est utilisée pour sa détermination :

$$C_b = C_s \theta_s + C_w \theta_w + C_a \theta_a \quad (\text{IV} - 26)$$

Où :

- C_s : la capacité de chaleur spécifique volumique du sol solide
($2.24 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \text{ }^\circ\text{C}$)
- C_w : la capacité de chaleur spécifique volumique de l'eau liquide
($4.15 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \text{ }^\circ\text{C}$)
- C_a : la capacité de chaleur spécifique volumique de l'air qui peut être considérée comme négligeable

- $\theta_s, \theta_w, \theta_r$: les teneurs volumiques des solides, de l'eau et de l'air, respectivement.

4.1.4 Résolution numérique

On utilise une méthode numérique explicite en différences finies pour la résolution des équations de transferts. Le pas de temps choisi est de 0.1 secondes. A chaque pas de temps, les coefficients de stockage et de transports présents dans le système sont estimés initialement à chaque nœud, puis à leur position inter nodale à partir de la moyenne géométrique des deux valeurs aux nœuds qui l'encadrent. Une convergence de 0.001 a été adoptée pour la différence maximale entre deux calculs successifs ($i^{\text{ème}}$ et $i-1^{\text{ème}}$) dans la procédure itérative. La Figure IV - 3 montre schématiquement le mode de fonctionnement du programme.

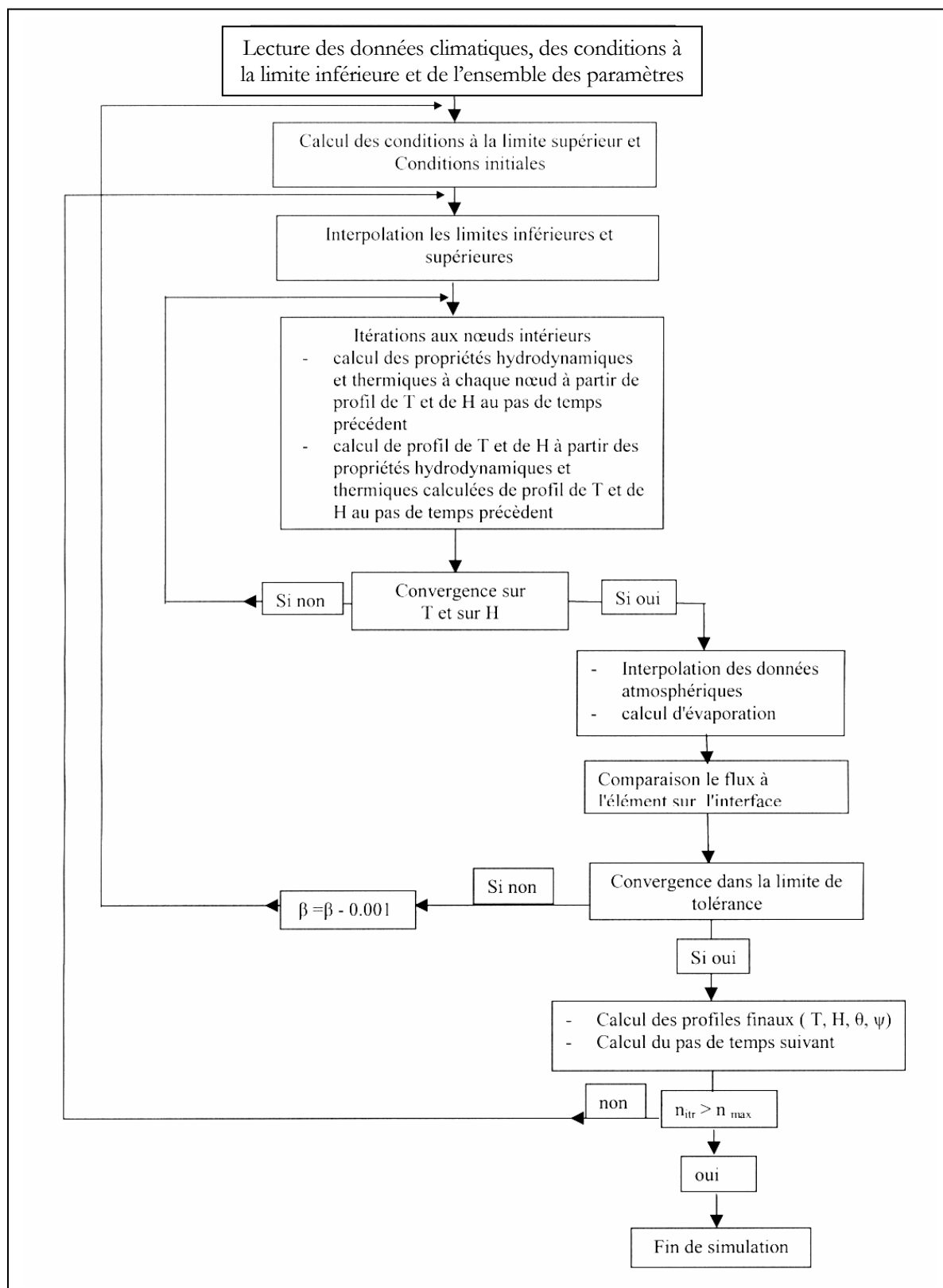


Figure IV - 3. Mode opératoire du programme de calcul (Geremew) 2004)

4.2 Résultats de simulations

La période du 01-26 mai 2004 a été choisie pour les simulations en raison de la disponibilité des données météorologiques in situ (site de Boissy le Château). La période relativement longue des mesures directes de la succion (mai – juin 2004) a permis de choisir un intervalle de temps de 26 jours avec des données météorologiques correspondantes presque complètes. On note que pendant le mois de juin, le niveau de la nappe phréatique a baissé et le piézomètre ne pouvait plus suivre la nappe (suivie limité à 1,23 m). Ceci rend les données incomplètes pendant cette période.

4.2.1 Détermination des paramètres

La plupart des paramètres utilisés sont issus des résultats expérimentaux du chapitre 3. Dans les simulations, les données utilisées sont la moyenne des mesures journalières. On a effectué trois types de simulations et les résultats obtenus ont été systématiquement comparés avec ceux des mesures. Les trois simulations ont été sélectionnées de sorte à mettre en évidence l'influence des facteurs importants tels que la courbe de rétention d'eau et la perméabilité à l'état saturée et non saturée. L'influence des paramètres de la perméabilité saturée et non saturée (k_s , k_1) est tellement importante qu'il a fallu faire plusieurs calculs avant de trouver les valeurs des paramètres appropriés.

Quelques paramètres utilisés restent les mêmes pour les trois simulations. Ils sont présentés dans le Tableau IV - 1. Les autres paramètres seront présentés à part pour chaque simulation.

Coefficient de chaleur spécifique C_h	C_s (J/(m ³ °C))	2,24 x 10 ⁶
	C_w (J/(m ³ °C))	4,15 x 10 ⁶
Coefficient de compression m_2^w	m_2^w (1/kPa)	9,1 x 10 ⁻³
Coefficient (δ)	(δ)	1,41
Coefficient (β)	(β)	0,12332

Tableau IV - 1. Paramètres utilisés pour les simulations des mesures in situ

Pour chaque simulation, le profil de sol a une épaisseur de 115 cm. Cette épaisseur est discrétisée en 115 nœuds donc une distance entre les nœuds constante de 1cm. Dans les

simulations, les deux paramètres δ (G/H) et β (H/Le) sont considérés comme des constantes et leurs valeurs sont définies en se basant sur les travaux de Blight (1997, 2003) et les précédentes simulations faites par Lu (2003) et Geremew (2004).

4.2.2 Présentation des données d'entrée du modèle

L'ensemble des données acquises sur le site de Boissy le Châtel a été présenté dans le chapitre 3. Dans cette partie, on reprend les données obtenues pendant une période limitée, du 1^{er} au 26 mai, qui correspond à une période avec toutes les mesures disponibles (météorologie, différentes mesures dans le sol). Ce sont des données qui seront utilisées pour la validation de l'approche théorique développée. Elles sont présentées sous forme graphique. Globalement, cette période de temps peut être caractérisée par la moyenne de quelques paramètres météorologiques :

- un rayonnement de 883 J/m²s ;
- une évapotranspiration de 27,23 mm/jour ;
- une température de l'air de 12 °C ;
- une humidité relative de 74% ;
- une vitesse du vent (mesurée à 8 m de haut) de 9,52 km/h.

Le graphique des précipitations (Figure IV - 4) montre que la période a été généralement sèche à l'exception de précipitations assez importantes le 8 mai. On voit l'impact de cette pluie sur la variation de la teneur en eau du sol (Figure IV - 6). D'autres petites pluies avant et après cette date ne semblent pas avoir une influence significative.

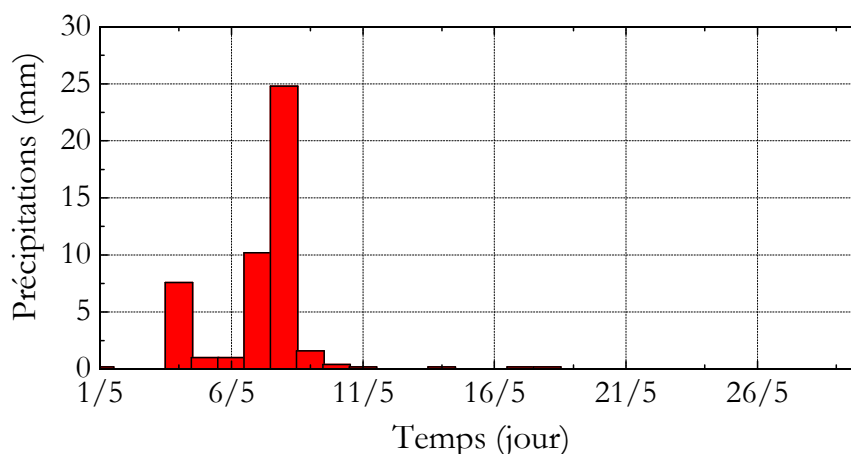


Figure IV - 4. Précipitations du 1^{er} au 26 mai 2004

L'influence de la pluie se reflète aussi sur le graphique de l'humidité relative de l'air (Figure IV - 5). On observe une augmentation de l'humidité relative pendant les jours peu pluvieux et elle atteint les 100% le jour des fortes précipitations. Après cet épisode la valeur de l'humidité relative diminue progressivement jusqu'à la fin de la période d'observation.

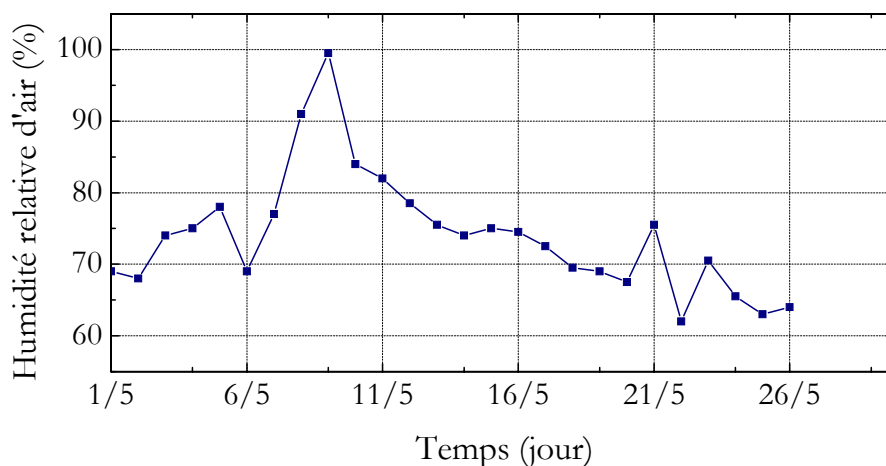


Figure IV - 5. Humidité relative de l'air du 1^{er} au 26 mai 2004

Le profil de la teneur en eau n'est pas complet et il commence le 7^{ème} jour (Figure IV - 6). On présente les profils à plusieurs profondeurs qui vont de 5 cm à 115 cm (profondeur maximale prise en compte pour le calcul). L'effet de la pluie du 8 mai est bien visible ; on observe une augmentation de la teneur en eau sur tout le profil en profondeur. Cette augmentation (entre 2 et 4 % en valeur absolue) est plus importante pour le sol à 5 cm (de l'ordre de 4 % en valeur absolue) ; elle est de 2 % environ pour les autres profondeurs. L'effet de la pluie disparaît vite et on observe pour le reste de la période une diminution de la teneur en eau. Cette diminution est particulièrement importante pour les premiers 25 cm de sol.

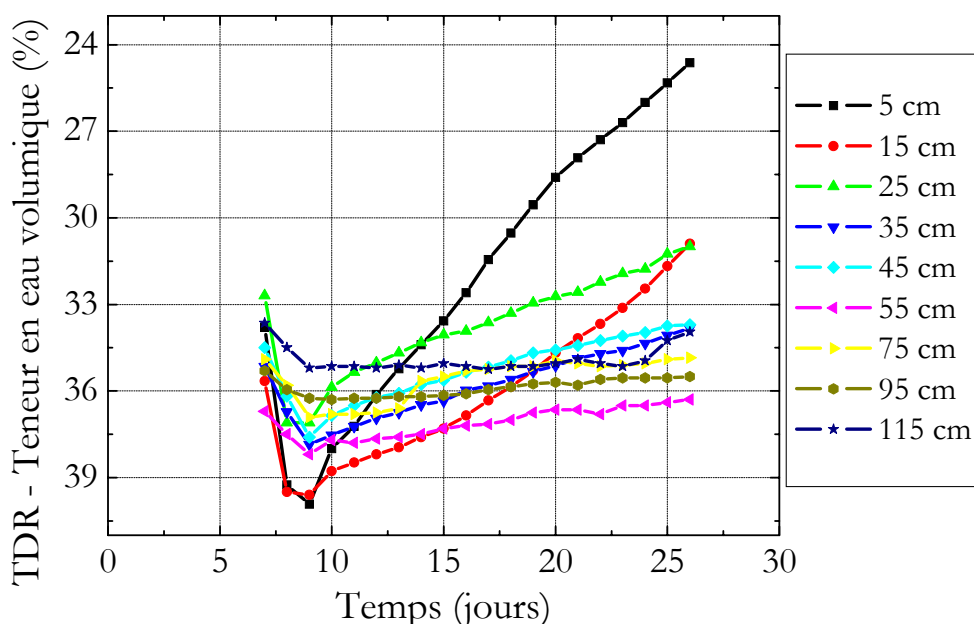


Figure IV - 6. Profil de la teneur en eau à plusieurs profondeurs du 1^{er} au 26 mai 2004

Les variations de la température du sol à deux profondeurs -50 cm et -100 cm sont présentées sur la Figure IV - 7. On observe que la température à -100 cm reste légèrement inférieure (entre 1 et 2 °C) à celle à -50 cm, ce qui signifie que le flux de la chaleur se propage vers la profondeur du sol (caractéristique de la saison chaude). On observe également que pendant la période de suivi, la température augmente dans le sol, ce qui confirme qu'il s'agit d'une saison chaude où le sol est réchauffé. Les variations de la température de l'air sont montrées sur la Figure IV - 8. On observe que l'amplitude de variation devient de plus en plus importante, alors que la température moyenne ne change pas de façon notable, elle semble augmenter légèrement dans la 2^{ème} partie (16/5).

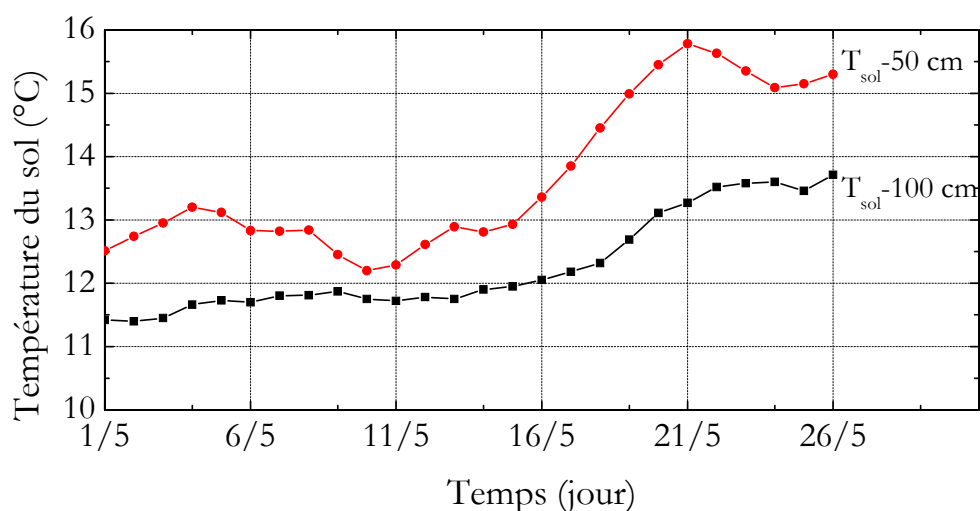


Figure IV - 7. Température du sol à deux profondeurs du 1^{er} au 26 mai 2004

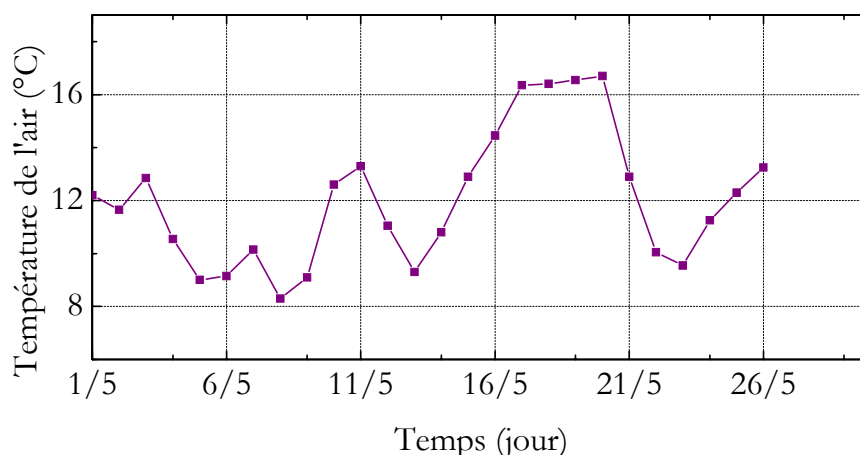


Figure IV - 8. Température de l'air à 2 m de la surface du 1^{er} au 26 mai 2004

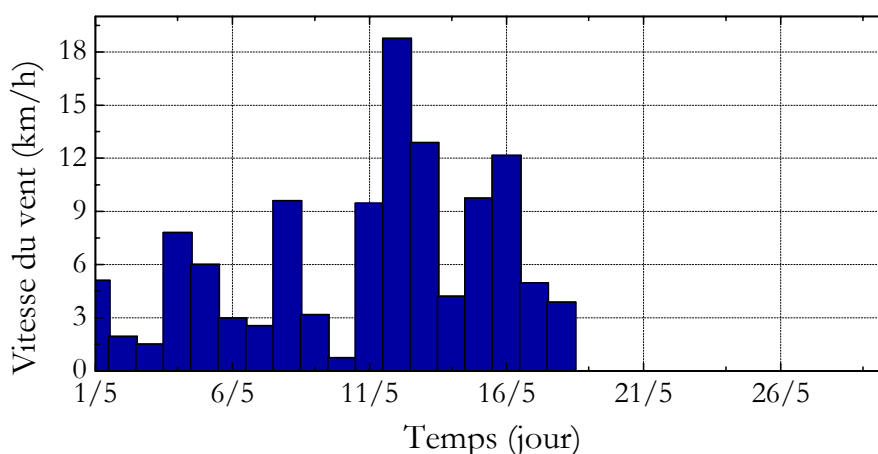


Figure IV - 9. Vitesse du vent à 8 m de la surface du 1^{er} au 26 mai 2004

Les données de la vitesse du vent (mesure effectuée à 8 m de la surface) ne sont pas complètes, ils manquent les 8 derniers jours (Figure IV - 9). On observe que le vent était assez soutenu pendant la période 11 au 17 mai.

Les graphiques du rayonnement solaire (Figure IV - 10) et de l'évapotranspiration (Figure IV - 11) ont exactement la même allure ce qui est logique, car l'évapotranspiration dépend directement du rayonnement. Une augmentation (diminution) du rayonnement amène systématiquement à une augmentation (diminution) de l'évaporation. Cette fluctuation qui est dépendante est proportionnelle à la variation journalière des valeurs.

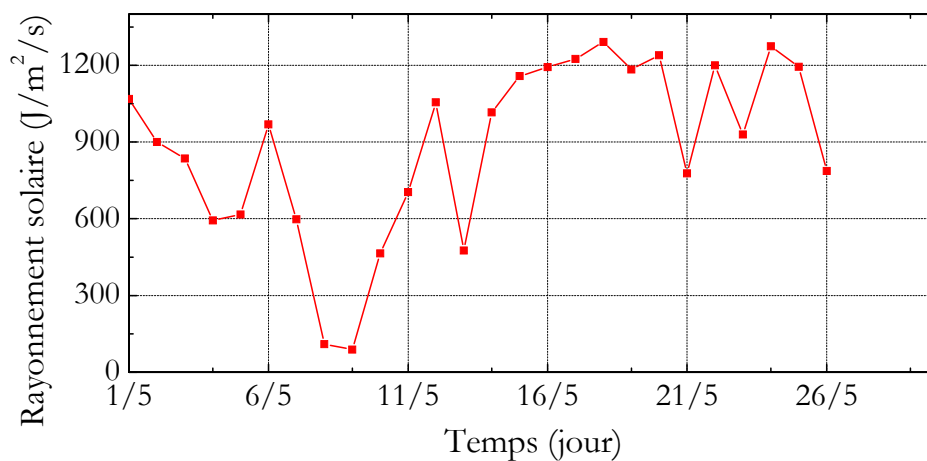


Figure IV - 10. Rayonnement solaire 01-26 mai 2004

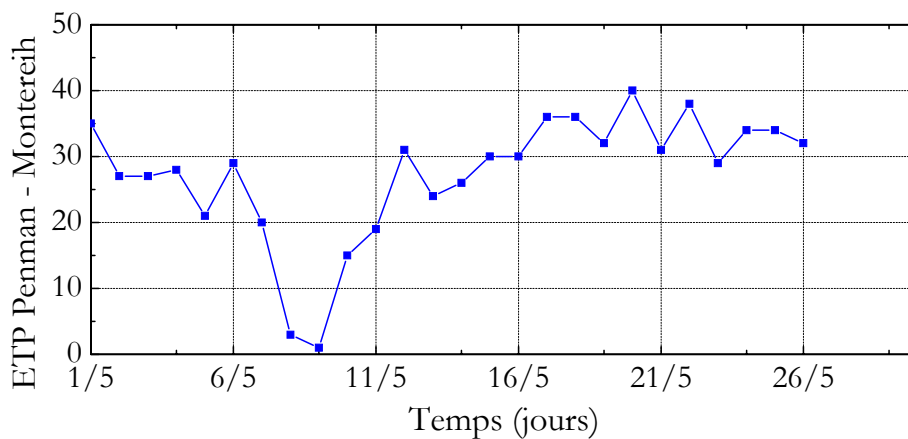


Figure IV - 11. Evapotranspiration Penman – Montereih 01-26 mai 2004

4.2.3 Première simulation

On a utilisé pour cette première simulation les paramètres communs du Tableau IV - 1 et d'autres paramètres qui étaient spécifiques à cette simulation. La détermination des paramètres spécifiques est basée sur les mesures. On les a séparés en deux groupes : les données qui concernent la courbe de rétention d'eau et les données qui concernent la perméabilité à l'état saturée. L'ensemble des paramètres spécifiques à cette simulation est présenté au Tableau IV - 2 :

Rétention d'eau	Perméabilité
$\theta_s=40\%$	$k_s=1,5 \times 10^{-9}$ m/s
$\theta_1=22,3\%$	$k_{w1}=1,15 \times 10^{-10}$ m/s
$s_1=500$ kPa	$s_1=40$ kPa
$\theta_r=15\%$	$\zeta=1,25$
$\zeta=1,00$	

Tableau IV - 2. Paramètres utilisés pour la 1^{ère} simulation

4.2.3.1 Simulation de la courbe de rétention d'eau

Le modèle numérique nécessite l'entrée des coefficients caractéristiques de la courbe de rétention d'eau. On a cherché à l'aide d'une formulation mathématique (expression IV – 24) la courbe qui simule le mieux possible les points mesurés (3.1.2). Pour cela on a fait varier plusieurs fois le coefficient de proportionnalité ζ , qui joue un rôle important sur la forme de la courbe. La courbe choisie est tracée sur la Figure IV - 12, les paramètres utilisés pour cette simulation sont donnés dans le Tableau IV - 2.

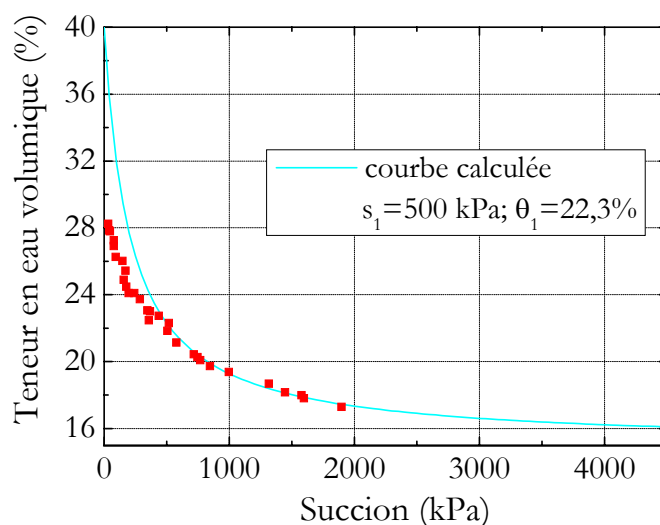


Figure IV - 12. Courbe simulée de rétention d'eau – 1^{ère} & 2^{ème} simulation

4.2.3.2 Simulation de la courbe $s - k$

On a mené la même opération pour les paramètres de la courbe $s - k$ à partir de l'expression mathématique (IV - 22). Les points mesurés utilisés étaient ceux du 2^{ème} et 3^{ème} essai d'infiltration (3.1.4.3). Les paramètres de la courbe choisie (Figure IV - 13) sont dans le Tableau IV - 2.

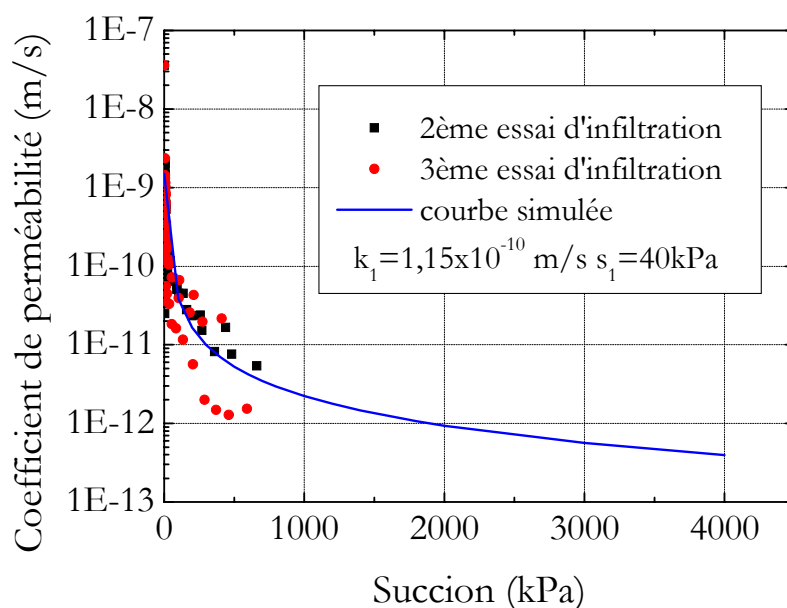


Figure IV - 13. Courbe simulée $s - k$ – 1^{ère} simulation

4.2.4 Résultats obtenus dans la 1^{ère} simulation

Dans ce paragraphe on présente les résultats obtenus de simulation des variations de la teneur en eau volumique, de la succion et de la température du sol. Une comparaison est faite entre les valeurs calculées et celles mesurées et plus particulièrement à 25 et à 45 cm de profondeur, ces deux valeurs correspondant à la profondeur des 2 tensiomètres in situ.

4.2.4.1 Variations de la teneur en eau volumique

La Figure IV - 14 et la Figure IV - 15 présentent l'ensemble des valeurs calculées et mesurées. On observe globalement que l'allure des courbes de simulation correspond bien à celles des mesures, mais que, les valeurs calculées sont assez loin des valeurs mesurées. Contrairement aux valeurs mesurées, les valeurs calculées présentent de grandes différences en fonction de la profondeur.

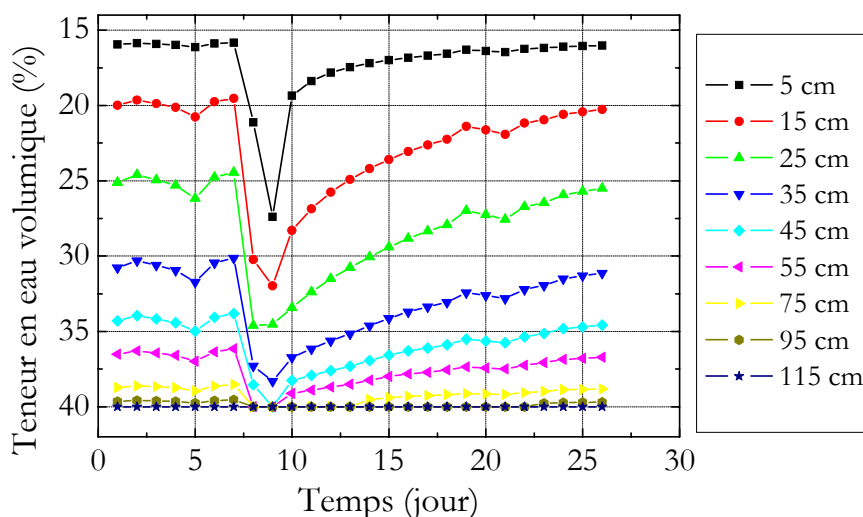


Figure IV - 14. Teneur en eau volumique calculée 01-26 mai

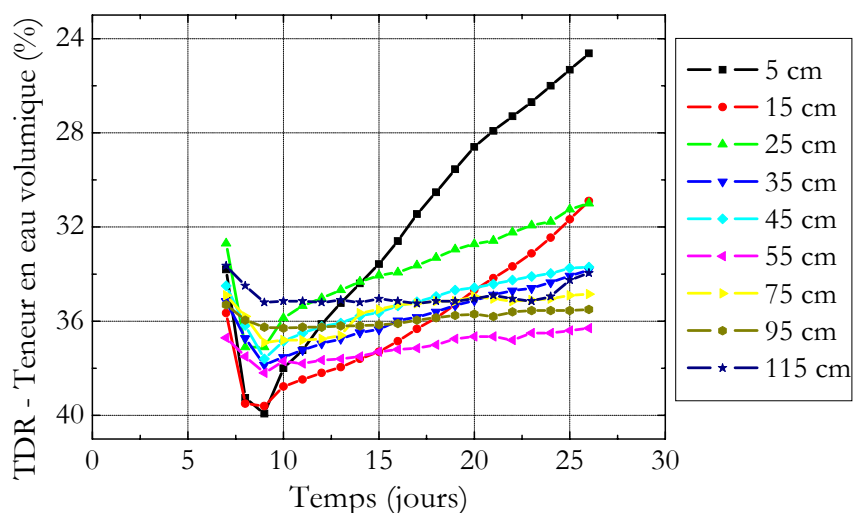


Figure IV - 15. Teneur en eau volumique mesurée in situ 01-26 mai

Intéressons-nous à la comparaison des valeurs mesurées et calculées en considérant trois graphiques distincts selon la profondeur. On note que les courbes des valeurs mesurées seront toujours représentées en traits pleins et les courbes des valeurs calculées en traits pointillés. Par souci de simplification la comparaison des valeurs entre calcul et mesure sera présentée en valeur absolue. Ceci est valable pour les trois simulations.

La Figure IV - 16 présente la comparaison des valeurs de teneur en eau volumique mesurées et calculées pour une profondeur de sol proche de la surface (5 et 15 cm). On remarque que les courbes des valeurs calculées ont la même allure que celles des valeurs

mesurées, ce qui atteste du bon fonctionnement du modèle adopté. Des écarts importants de l'ordre de 8,5 – 18 % et 8 – 15,5 % (en valeur absolue) sont observés pour les profondeurs 5 et 15 cm respectivement (les valeurs mesurées étant supérieures à celles calculées).

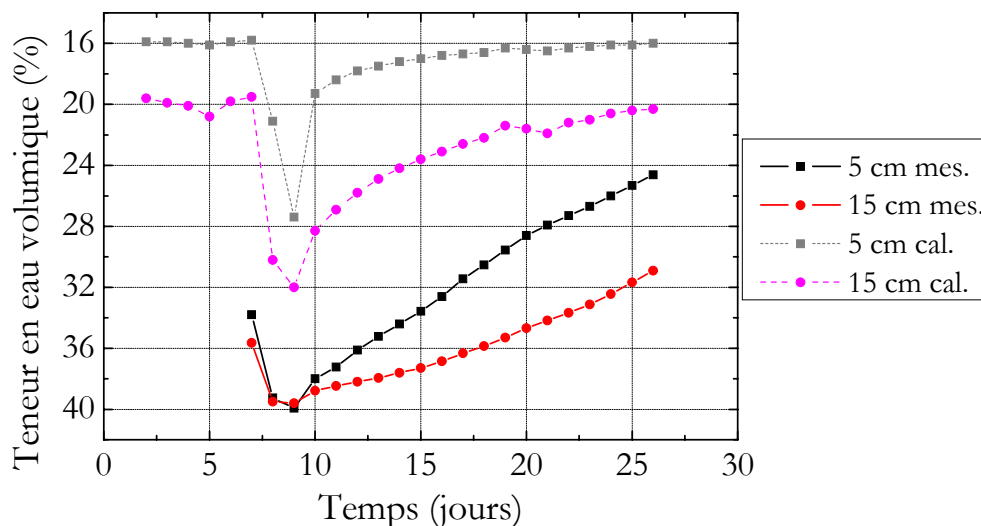


Figure IV - 16. Comparaison de la teneur en eau volumique à 5 et 15 cm – 1^{er} au 26 mai

Les résultats des comparaisons des valeurs de la teneur en eau volumique à 25 et 45 cm de profondeur sont présentés sur la Figure IV - 17. Elles correspondent aux deux profondeurs auxquelles sont placées les deux tensiomètres qui mesurent la succion. On observe une meilleure correspondance entre les valeurs mesurées et calculées. A 25 cm de profondeur, l'écart diminue sensiblement, il est entre 2 et 4 %. A 45 cm de profondeur on obtient une très bonne concordance entre les valeurs mesurées et calculées. L'écart est très faible, entre 0,5 et 2 %.

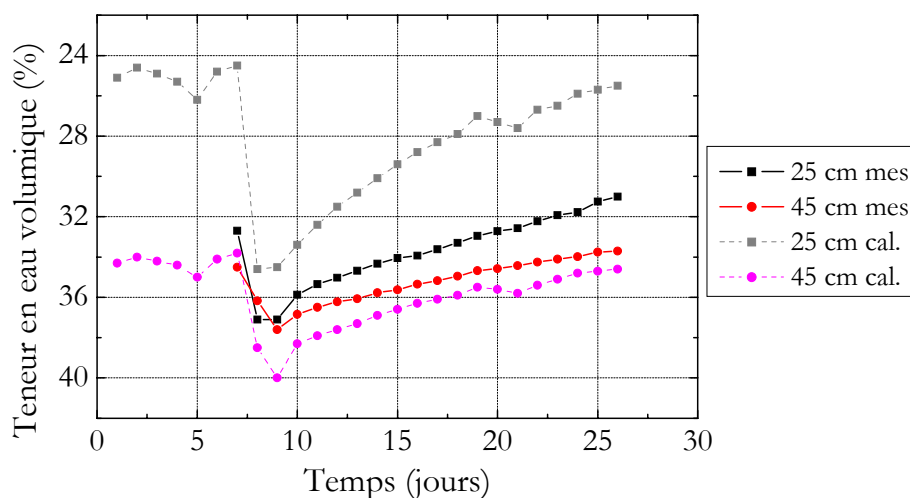


Figure IV - 17. Comparaison de la teneur en eau volumique à 25 et 45 cm – 1^{er} au 26 mai

Sur la Figure IV - 18 est représentée la comparaison de la teneur en eau volumique pour les profondeurs de 55 et 115 cm. Cette partie du sol est en général très humide (valeur minimale de teneur en eau volumique mesurée de 34%). Les comparaisons entre les courbes des valeurs mesurées et calculées montrent qu'elles ont des configurations très proches. Les écarts sont faibles, compris entre 1,5 et 5 %.

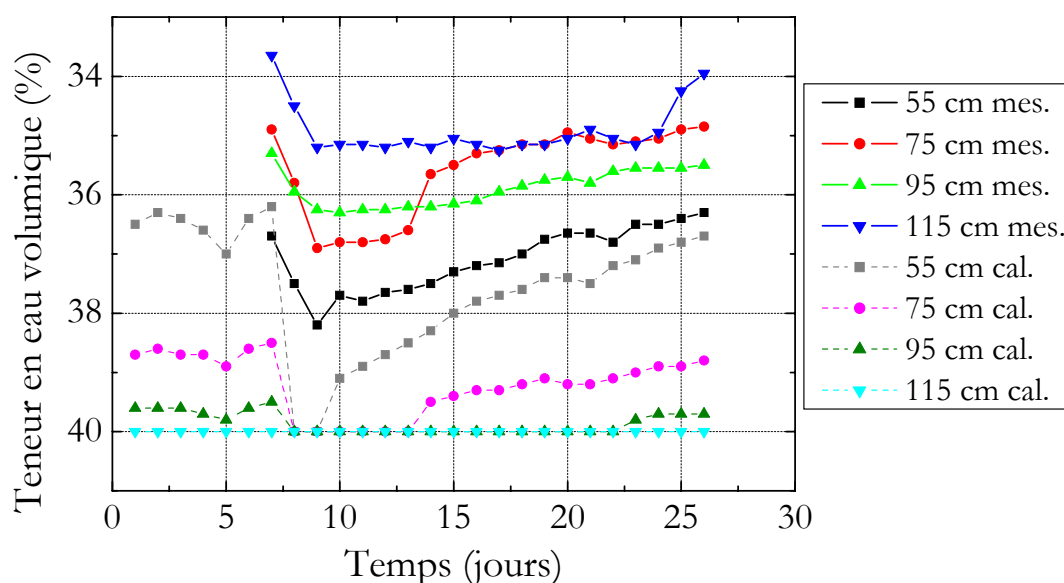


Figure IV - 18. Comparaison de la teneur en eau volumique à 55-115 cm – 1^{er} au 26 mai

4.2.4.2 Variation de la succion de sol

Le graphique de la Figure IV - 19 présente la succion calculée à 25 et 45 cm de profondeur. On observe à 25 cm de profondeur une baisse brusque et importante de la succion à cause d'un épisode de fortes précipitations, suivie d'une augmentation progressive à cause de l'évapotranspiration. Deux épisodes de faibles précipitations sont à l'origine d'une diminution plus faible mais sensible de la succion. Cette influence diminue avec la profondeur comme le montre le graphique de la succion à 45 cm de profondeur. D'autres résultats de calculs à différentes profondeurs le confirment.

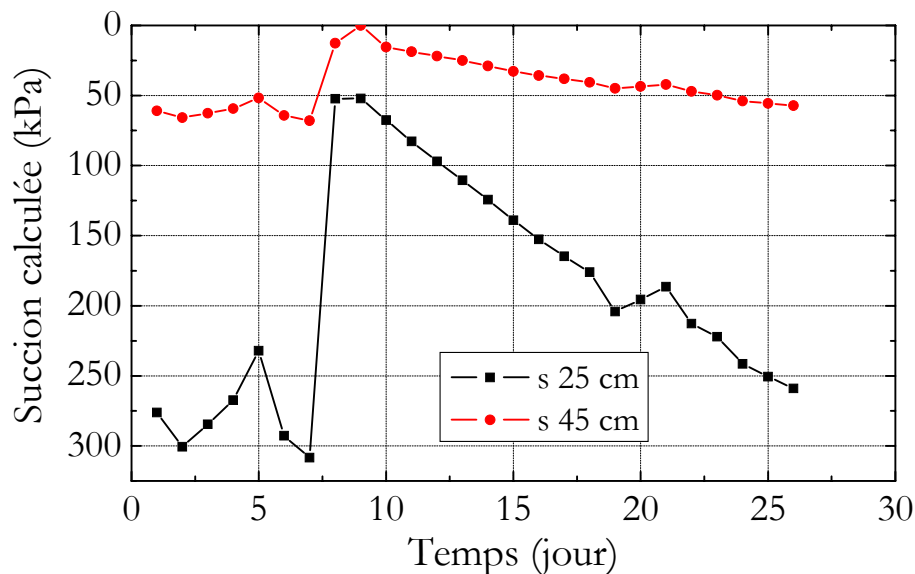


Figure IV - 19. Succion calculée à deux profondeurs – 1^{er} au 26 mai

On présente sur la Figure IV - 20 la comparaison des valeurs mesurées et calculées de la succion à 25 cm de profondeur. Le modèle simule bien l'influence de la pluie et la reprise de l'évapotranspiration. On observe bien sur la courbe des valeurs calculées une baisse de la succion due à une pluie importante, la montée progressive de la succion suite à l'évaporation, ainsi que deux autres petites baisses à cause des deux petites pluies à la 5^{ème} et la 21^{ème} journée. Cependant on remarque une surestimation de la variation par le modèle, l'écart important entre les valeurs calculées et mesurées est compris entre 20 et 280 kPa.

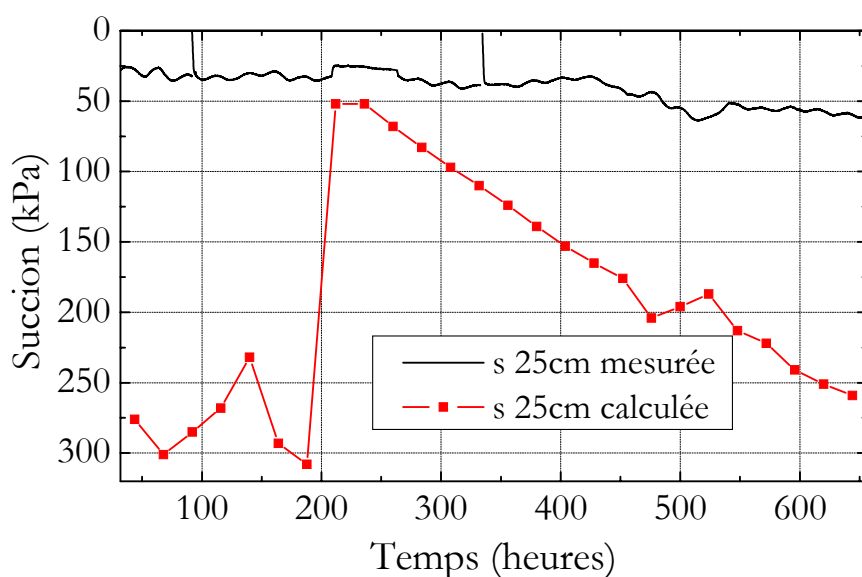


Figure IV - 20. Comparaison de la succion à 25 cm de profondeur – 1^{er} au 26 mai

La Figure IV - 21 présente la comparaison des valeurs de la succion mesurées et calculées à 45 cm de profondeur. On voit une meilleure concordance entre les courbes avec une différence de valeurs comprise entre 5 et 30 kPa. On remarque que pour les deux petites pluies (5^{ème} et 21^{ème} journée), on trouve la même amplitude de variation par rapport aux mesures. En comparant les deux graphiques on observe que la montée en succion (à cause de l'évaporation) est la même dans les deux cas (les courbes sont parallèles). Seule la variation de succion entre les valeurs calculées et mesurées à la période de fortes précipitations est très grande.

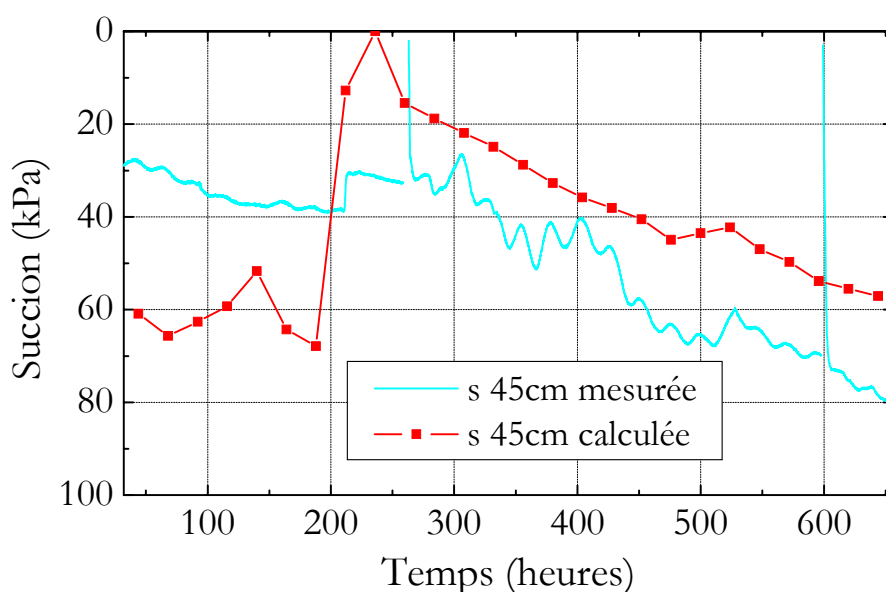


Figure IV - 21. Comparaison de la succion à 45 cm de profondeur – 1^{er} au 26 mai

4.2.4.3 Variations de la température de sol

La Figure IV - 22 montre les courbes de la température calculée à deux profondeurs (25 et 45 cm). On remarque que les valeurs calculées sont proches pour les deux profondeurs et que la température peut s'élever à 40 °C.

Faute de mesures on n'a pas fait de comparaison avec les valeurs mesurées à 45 cm de profondeur.

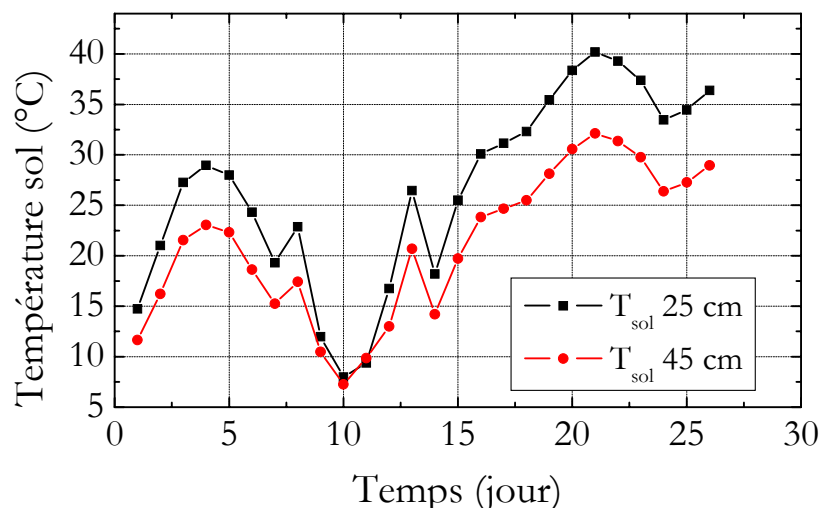


Figure IV - 22. Température calculée à deux profondeurs – 1^{er} au 26 mai

La Figure IV - 23 montre une comparaison partielle (pour la deuxième moitié de l'intervalle de temps) entre les valeurs de la température du sol calculées et mesurées à trois profondeurs proches de la surface (1 cm, 10 cm et 25 cm). Les courbes des valeurs mesurées représentent l'ensemble des mesures avec une fréquence de 5 min pour la période de temps prise en compte. On remarque l'influence des cycles jour – nuit dans les trois graphiques de mesures, essentiellement pour les profondeurs 1 et 10 cm, très proche de la surface de sol. Une différence très importante entre les valeurs mesurées et calculées est constatée. Cette différence reste importante même pour les autres simulations. C'est l'un des points faibles du modèle utilisé nécessitant une amélioration dans le futur.

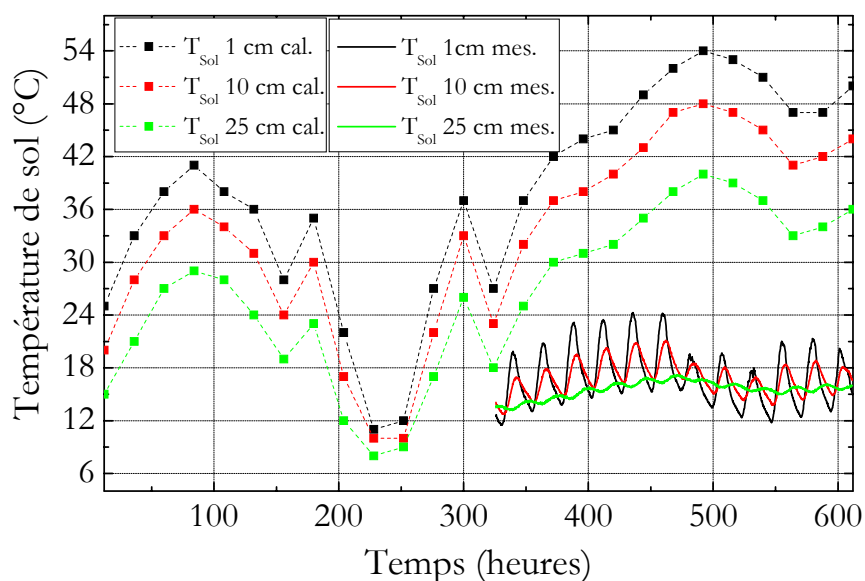


Figure IV - 23. Comparaison de la température à trois profondeurs – 1^{er} au 26 mai

4.2.5 Deuxième simulation

Les paramètres communs au Tableau IV - 1 sont utilisés, ils sont complétés par d'autres paramètres spécifiques à cette simulation. Ils sont obtenus en suivant la procédure décrite dans la partie 4.2.3 :

- calcul des valeurs des paramètres spécifiques en se basant sur les valeurs de mesures ;
- définition de la série de courbes qui représentent les points mesurés ;
- choix de la courbe qui représente le mieux les résultats expérimentaux ;
- utilisation des paramètres de cette courbe comme entrées du modèle numérique.

Par rapport à la première simulation on a modifié un paramètre de la courbe $s - k$. Les données qui concernent la courbe de rétention d'eau restent inchangées par rapport à la première. Les paramètres utilisés sont :

Données W		Données k
$\theta_s=40 \%$		$k_s=1,5 \times 10^{-9} \text{ m/s}$
$\theta_1=22,3 \%$		$k_{w1}=1,15 \times 10^{-10} \text{ m/s}$
$s_1=500 \text{ kPa}$		$s_1=40 \text{ kPa}$
$\theta_r=15 \%$		$\zeta=1,50$
$\zeta=1,00$		

Tableau IV - 3. Paramètres utilisés pour la 2^{ème} simulation

4.2.5.1 Simulation de la courbe $s - k$

On a simulé à l'aide de la même formulation mathématique (expression IV – 22) plusieurs courbes $s - k$ et on a obtenu quelques courbes qui encadrent bien les points mesurés (points du 2^{ème} et 3^{ème} essai d'infiltration (partie 3.2.2.6)). On a sélectionné celle correspondant au coefficient de proportionnalité $\zeta = 1,5$. Sur la Figure IV - 24 on a présenté cette courbe dont les paramètres sont consignés dans le Tableau IV - 3.

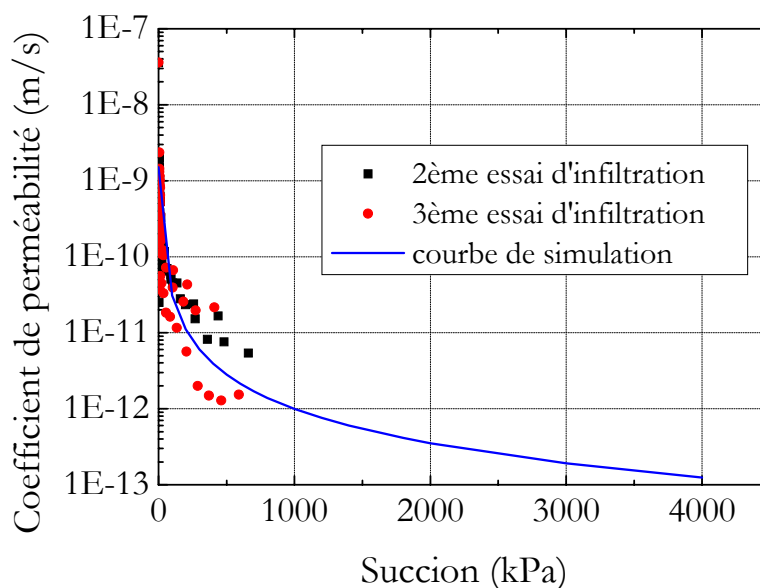


Figure IV - 24. Courbe simulée $s - k$

4.2.6 Résultats obtenus dans la 2^{ème} simulation

Comme pour la 1^{ère} simulation, on présentera les résultats sous forme graphique en termes de variations de la teneur en eau volumique, de la succion et de la température du sol. Une comparaison entre les valeurs calculées et les valeurs de mesures sera réalisée aux deux profondeurs de sol où on avait placé les 2 tensiomètres in situ (25 et 45 cm) et à certaines autres profondeurs.

4.2.6.1 Variation de la teneur en eau volumique

On présente l'ensemble des valeurs calculées sur la Figure IV - 25 et des valeurs mesurées sur la Figure IV - 26. Cette présentation donne un aperçu global. On observe que le modèle enregistre bien l'essentiel des variations telle que l'augmentation de la teneur en eau due à l'épisode de précipitation le plus important et la diminution progressive après cette pluie.

On remarque cependant que la différence entre les valeurs calculées et mesurées est importante et que les courbes à 15 et 25 cm des valeurs calculées présentent une anomalie. La teneur en eau diminue au lieu d'augmenter lors de l'épisode de fortes pluies. Il serait important de refaire des calculs en affinant le pas de mesure pour vérifier si cette anomalie disparaît.

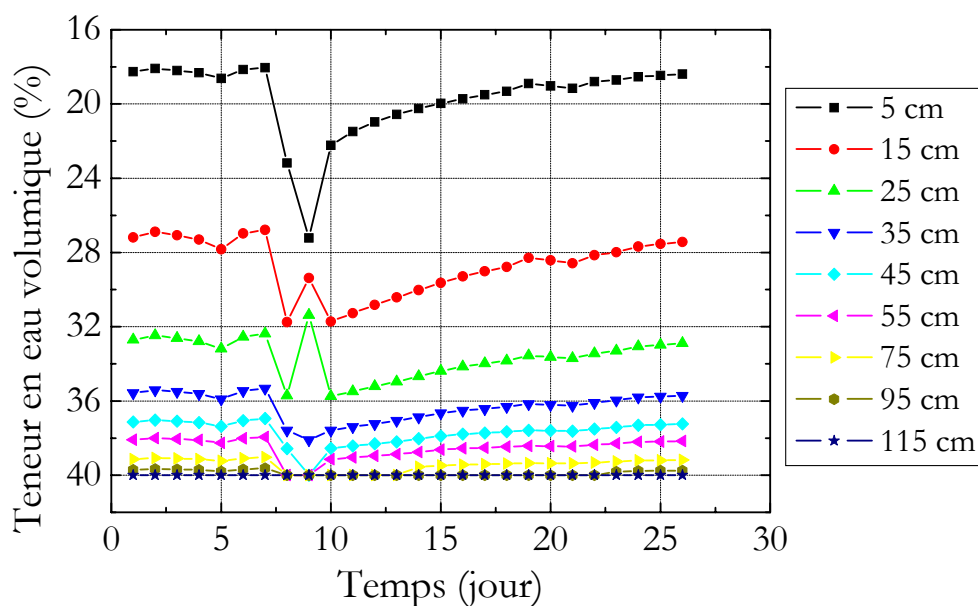


Figure IV - 25. Teneur en eau volumique calculée – 1^{er} au 26 mai

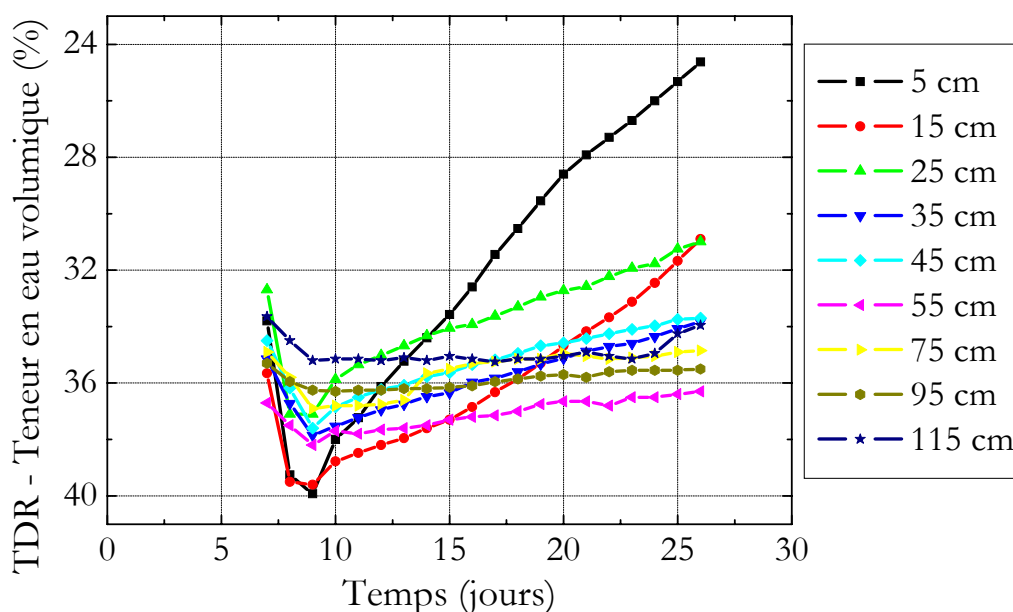


Figure IV - 26. Teneur en eau volumique mesurée in situ – 1^{er} au 26 mai

On présente sur la Figure IV - 27 la teneur en eau volumique calculée et mesurée à 5 et 15cm de profondeur. On observe que les quatre courbes ont la même allure à l'exception des points mentionnés précédemment. Un écart assez important de 6 à 16 % est observé à 5 cm de profondeur, il diminue à 15cm de profondeur, et est compris entre 3,5 et 8 %. Les valeurs calculées sont plus petites que celles mesurées.

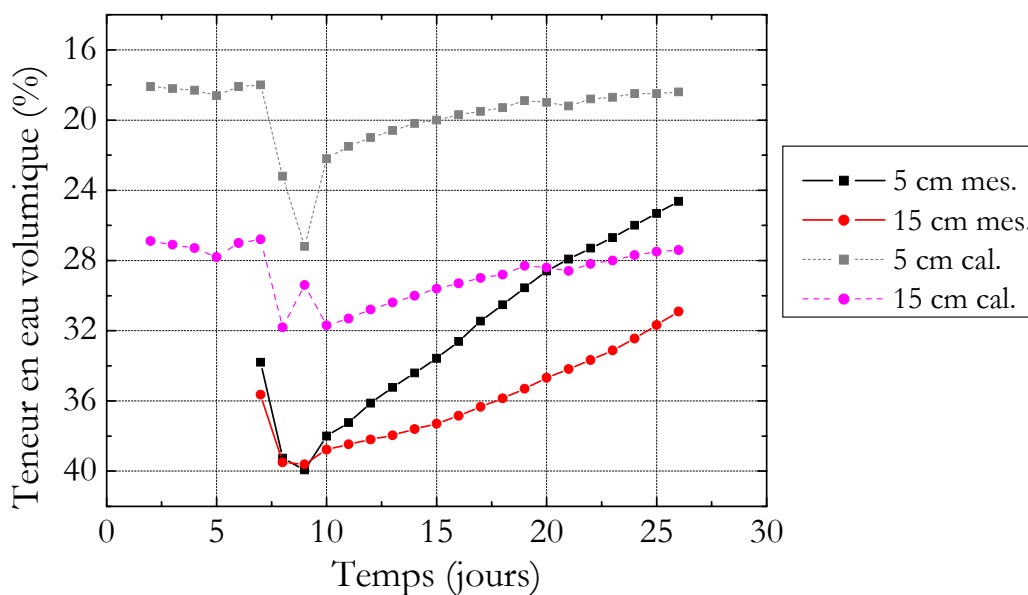


Figure IV - 27. Comparaison de la teneur en eau volumique à 5 et 15 cm – 1^{er} au 26 mai

On compare les résultats des valeurs de la teneur en eau volumique à 25 et à 45 cm sur la Figure IV - 28. A première vue les valeurs mesurées et calculées sont très proches les unes des autres à l'anomalie près constatée précédemment. A 25 cm de profondeur, on observe presque une superposition des courbes (entre 7^{ème} et 20^{ème} journée) avec un écart maximal de 2%. A 45 cm de profondeur, on remarque une bonne relation entre les valeurs mesurées et calculées avec un écart faible entre 2 et 3,5%.

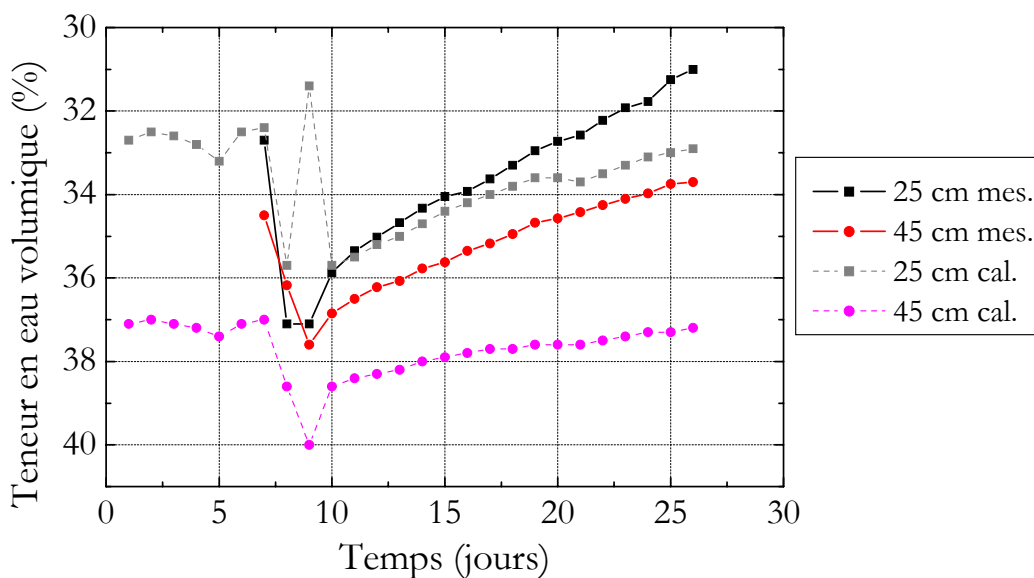


Figure IV - 28. Comparaison de la teneur en eau volumique à 25 et 45 cm – 1^{er} au 26 mai

La Figure IV - 29 présente la comparaison de la teneur en eau volumique pour des profondeurs du sol comprises entre 55 et 115 cm. On observe des valeurs importantes de la teneur en eau volumique (valeur minimale mesurée de 34%). Le calcul donne des teneurs en eau légèrement supérieures à celles mesurées. Les écarts semblent être relativement petits, compris entre 1 et 6 %.

On remarque que pour les deux dernières profondeurs (95 et 115 cm) les valeurs calculées sont très proches de la valeur de teneur en eau saturée ($\theta_s = 40\%$ définie comme donnée entrante). Le décalage entre les mesures et le calcul semble être le même pour toutes les profondeurs, ce qui signifie qu'on peut améliorer la simulation en modifiant la teneur en eau saturée.

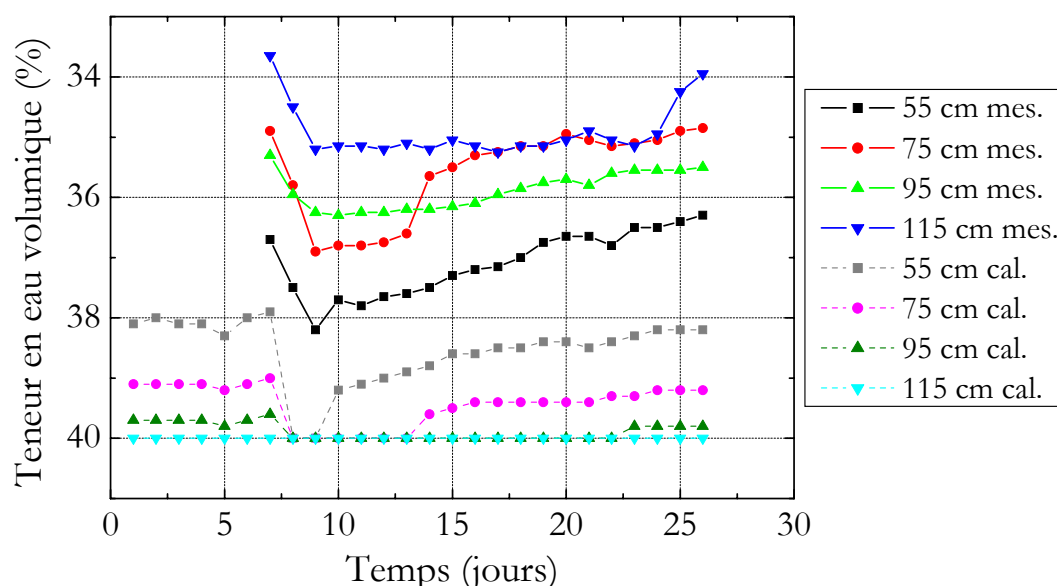


Figure IV - 29. Comparaison de la teneur en eau volumique à 55-115 cm – 1^{er} au 26 mai

4.2.6.2 Variation de la succion de sol

La succion calculée à deux profondeurs (à 25 et 45 cm) est présentée sur la Figure IV - 30. On voit que les deux courbes ont la même allure. L'effet de la pluie importante (9^{ème} jour) est bien mis en évidence.

La calcul de la succion tenant compte de la teneur en eau calculée, on retrouve ici la même anomalie que pour les courbes de la teneur en eau.

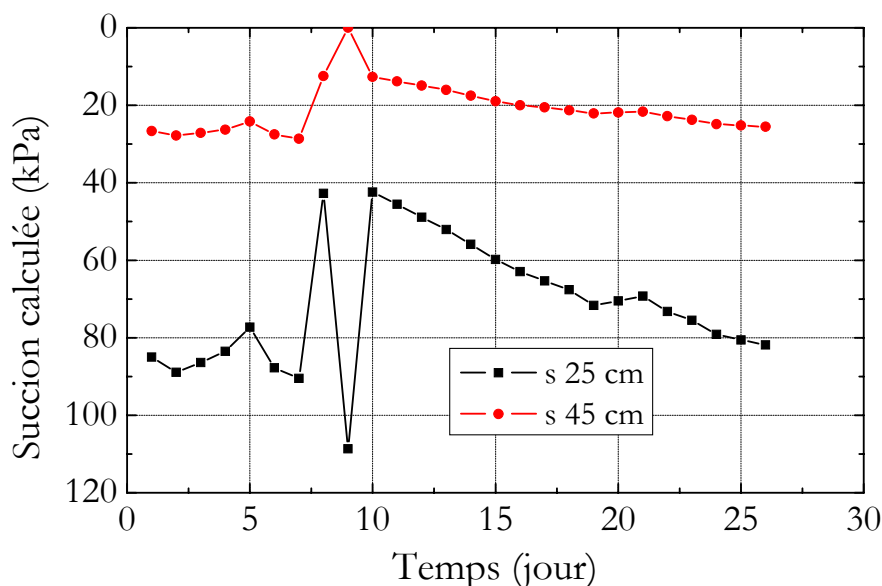


Figure IV - 30. Succion calculée à deux profondeurs – 1^{er} au 26 mai

Les variations de la succion mesurée et calculée à 25 cm de profondeur sont présentées sur la Figure IV - 31. Pour les premiers 10 jours, on observe une différence de valeurs de 50 kPa. Après la pluie au 8^{ème} jour et la reprise de l'évaporation, on remarque une montée graduelle de la succion (courbe calculée) et les deux courbes sont très proches l'une de l'autre (des écarts entre 5 et 25 kPa). L'influence de deux petites pluies au 5^{ème} et au 21^{ème} jour est reproduite, cependant un léger décalage pour la pluie du 21^{ème} jour est constaté. Cette constatation nous conforte dans l'idée qu'un affinage du pas de temps serait nécessaire.

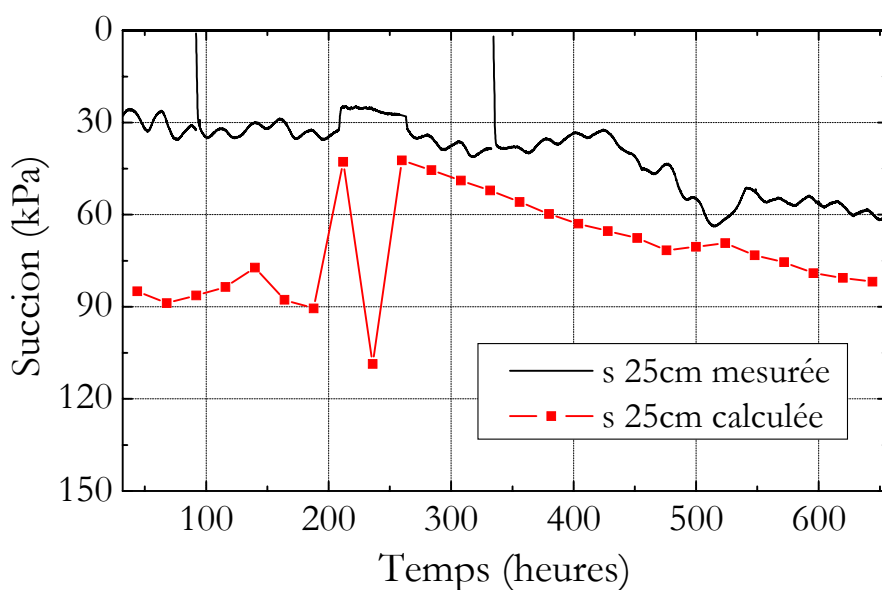


Figure IV - 31. Comparaison de la succion à 25 cm de profondeur – 1^{er} au 26 mai

On présente sur la Figure IV - 32 les variations de la succion mesurée et calculée à 45 cm de profondeur. Pendant les premiers 7 jours on observe une bonne correspondance entre le calcul et la mesure (écarts faibles entre 0 et 12 kPa). Après la pluie importante, la valeur mesurée tombe à zéro et sous l'effet d'évaporation elle augmente mais très légèrement. L'augmentation par le calcul paraît plus importante ; l'écart entre les deux courbes est entre 20 et 50 kPa.

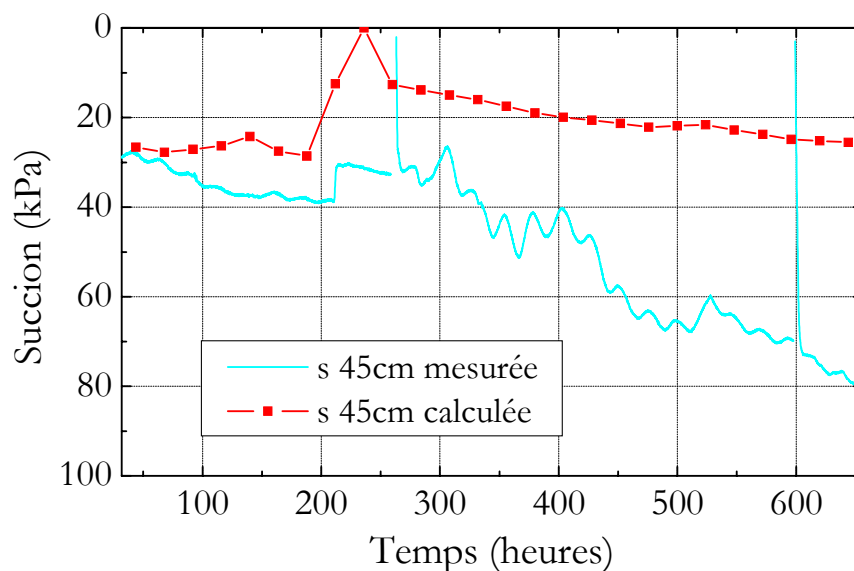


Figure IV - 32. Comparaison de la succion à 45 cm de profondeur – 1^{er} au 26 mai

4.2.6.3 Variations de la température de sol

On a représenté sur la Figure IV - 33 les variations de la température calculée à deux profondeurs (25 et 45 cm). Les deux courbes sont proches avec des valeurs très grandes allant jusqu'à plus de 40 °C).

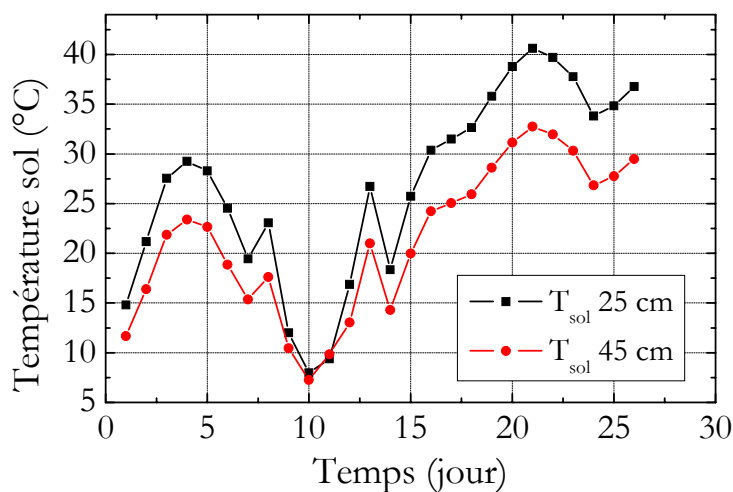


Figure IV - 33. Température calculée à deux profondeurs différentes – 1^{er} au 26 mai

Une comparaison (seulement du 13^{ème} au 26^{ème} jour) de la température du sol calculée et mesurée est faite à trois profondeurs proches de la surface : 1 cm, 10 cm et 25 cm (Figure IV - 34). La différence très importante entre les valeurs mesurées et calculées mise en évidence à la première simulation est retrouvée.

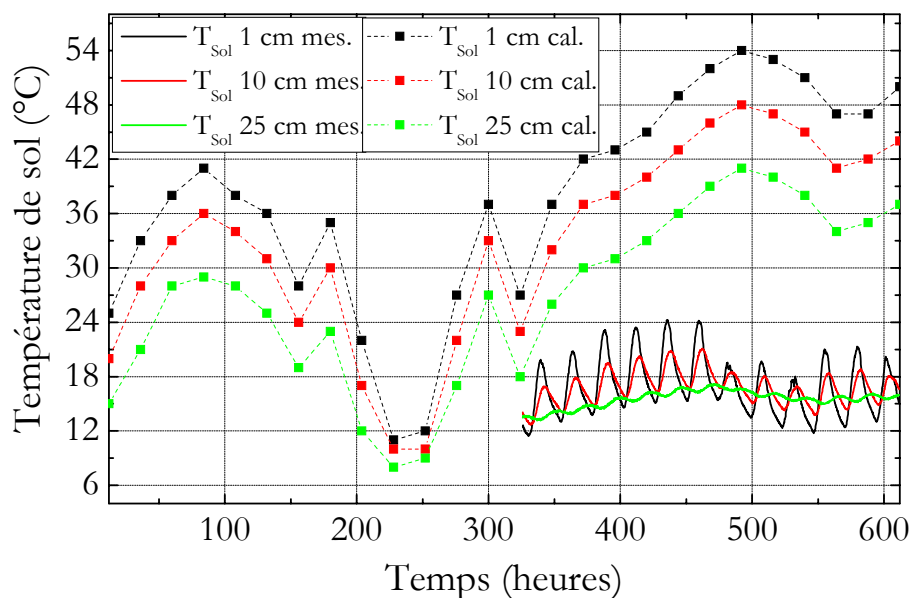


Figure IV - 34. Comparaison de la température de sol à trois profondeurs – 1^{er} au 26 mai

4.2.7 Troisième simulation

Pour cette simulation, on utilise également les paramètres communs au Tableau IV - 1, avec d’autres paramètres spécifiques. Par rapport aux deux autres simulations on a modifié cette fois tous les paramètres de la courbe de rétention d’eau. Les données qui concernent la courbe $s - k$ sont restées inchangées par rapport à la deuxième simulation. Les paramètres utilisés pour cette simulation sont :

Données W		Données k
$\theta_s=30\%$		$k_s=1,5 \times 10^{-9}$ m/s
$\theta_1=19,6\%$		$k_{w1}=1,15 \times 10^{-10}$ m/s
$s_1=900$ kPa		$s_1=40$ kPa
$\theta_r=15\%$		$\zeta=1,50$
$\zeta=1,00$		

Tableau IV - 4. Paramètres utilisés pour la 3^{ème} simulation

4.2.7.1 Simulation de la courbe de rétention d’eau

Les coefficients caractéristiques de la courbe de rétention d’eau constituent une partie importante des données d’entrée du modèle. Leurs déterminations se font à l’aide de l’expression IV – 24. Les paramètres retenus finalement sont présentés au Tableau IV - 4, qui permettent de trouver une courbe de rétention d’eau qui représente bien les résultats expérimentaux (Figure IV - 35).

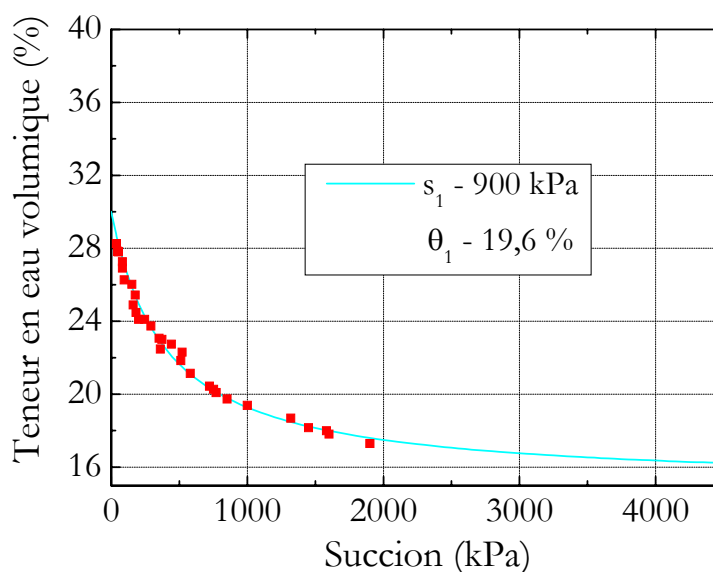


Figure IV - 35. Courbe simulée de rétention d’eau

4.2.8 Résultats de simulation obtenus

Comme dans les deux simulations précédentes, on présentera les résultats des variations de la teneur en eau volumique, de la succion et de la température du sol. Les comparaisons entre le calcul et la mesure sont faites, en particulier pour les profondeurs de 25 et 45 cm.

4.2.8.1 Variations de la teneur en eau volumique

On présente sur la Figure IV - 36 et la Figure IV - 37 les deux graphiques de l'ensemble des valeurs calculées et des valeurs mesurées, donnant un aperçu général de comparaison. Par rapport aux deux simulations précédentes, on remarque que dans ce cas la teneur en eau volumique calculée ne varie presque pas pour des profondeurs supérieures à 45 cm. Ceci est lié aux données d'entrée pour la courbe de rétention : pour cette simulation on a fixé la valeur de la teneur en eau saturée volumique (θ_s) à 30 %.

On remarque (comme pour la 2^{ème} simulation) que les courbes à 15 et 25 cm des valeurs calculées présentent une anomalie. La teneur en eau diminue au lieu d'augmenter lors de l'épisode de fortes pluies (9^{ème} jour).

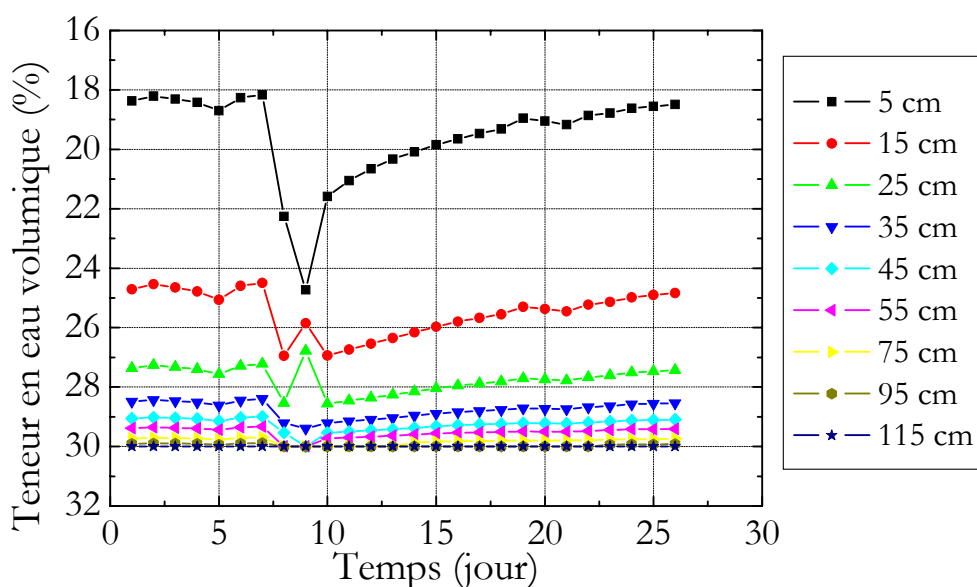


Figure IV - 36. Teneur en eau volumique calculée, 01-26 mai

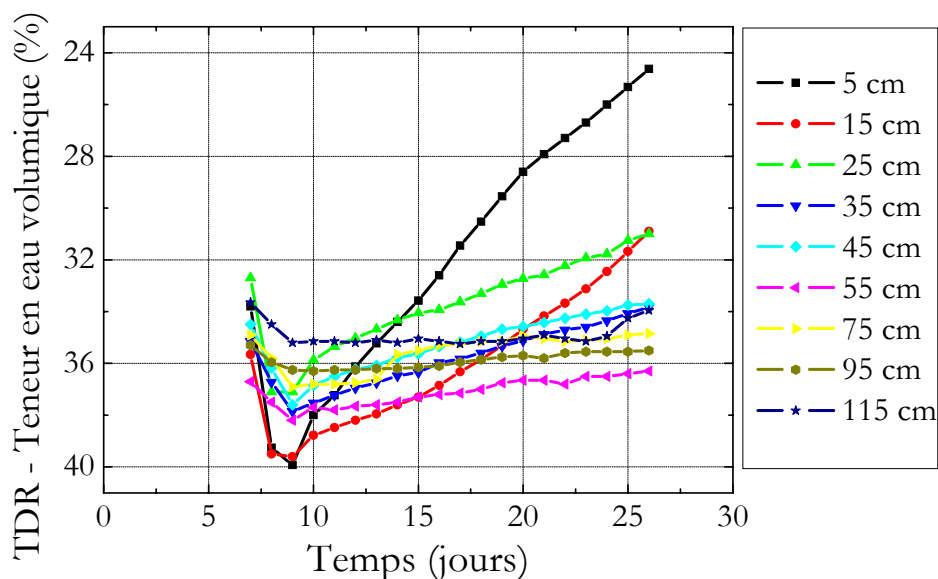


Figure IV - 37. Teneur en eau volumique mesurée in situ, 01-26 mai

La Figure IV - 38 présente la teneur en eau volumique calculée et mesurée à 5 et 15 cm de profondeur. On remarque de façon générale que les graphiques des calculs ont la même allure que ceux des mesures. Un écart important entre 6,5 et 15 % est à noter entre les valeurs mesurées et calculées à 5 cm de profondeur. L'écart diminue pour la profondeur de 15 cm ; il est compris entre 6 et 11 %. Les valeurs calculées sont inférieures aux valeurs mesurées.

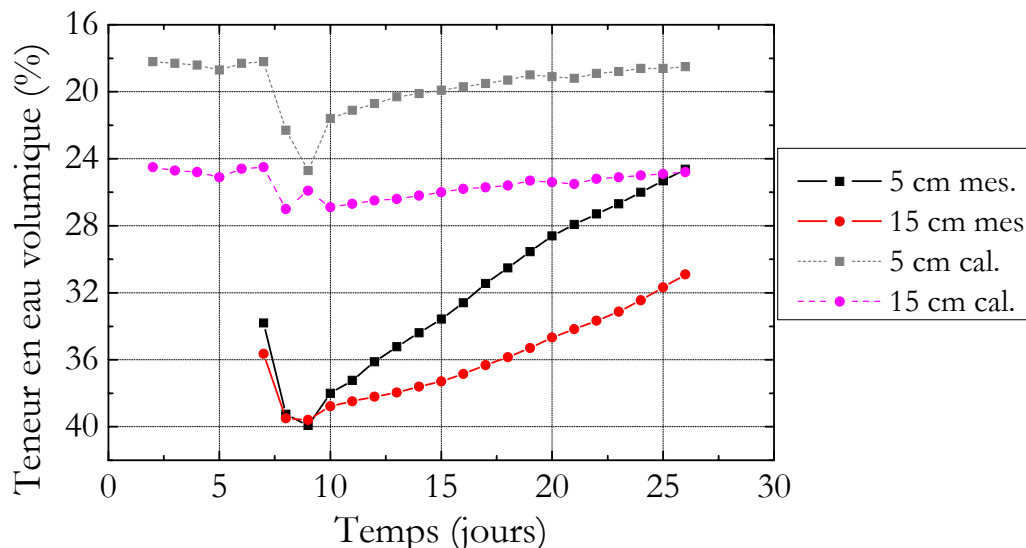


Figure IV - 38. Comparaison de la teneur en eau volumique à 5 et 15 cm, 01-26 mai

Les variations de la teneur en eau volumique à 25 et à 45 cm sont présentées sur la Figure IV - 39. On observe que les valeurs mesurées changent peu. A 25 cm de profondeur, on

voit un écart qui diminue dans le temps et passe de 8 à 4 %. A 45 cm de profondeur, on remarque presque le même écart entre les valeurs mesurées et calculées entre 4,5 et 7,5 %. Les valeurs mesurées restent supérieures aux valeurs calculées.

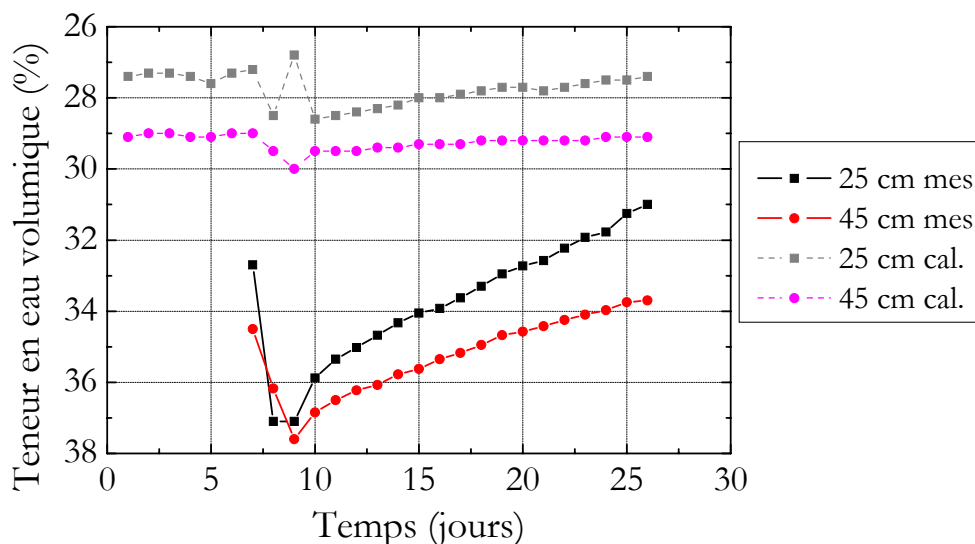


Figure IV - 39. Comparaison de la teneur en eau volumique à 25 et 45 cm, 01-26 mai

La comparaison de la teneur en eau volumique pour des profondeurs du sol comprises entre 55 et 115 cm est présentée sur la Figure IV - 40. On remarque que les valeurs calculées restent pratiquement constantes, entre 29 et 30 %, à cause de la teneur en eau volumique à saturation (θ_s) fixée à 30 %. Dans ce cas les écarts varient entre 3,5 et 8 %.

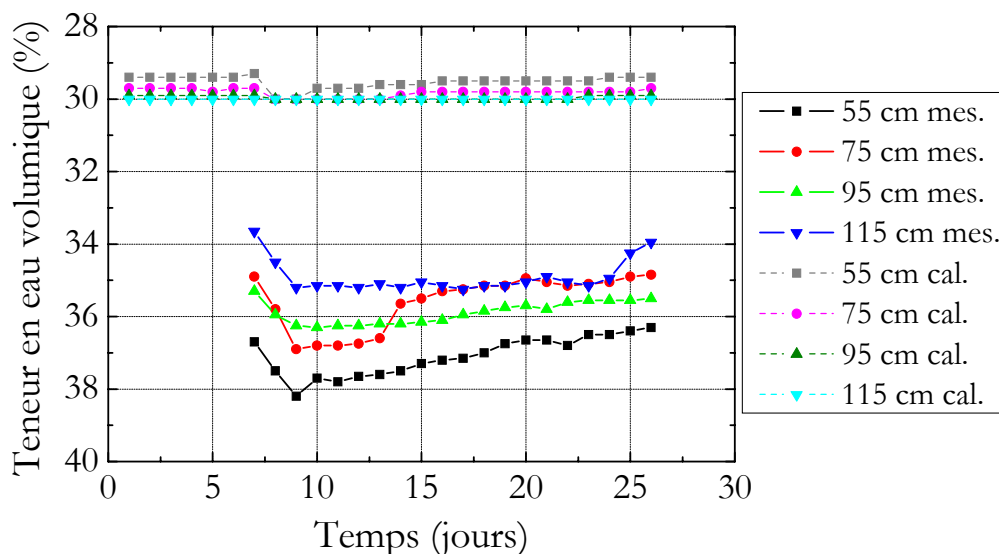


Figure IV - 40. Comparaison de la teneur en eau volumique à 55-115 cm, 01-26 mai

4.2.8.2 Variations de la succion de sol – 3^{ème} simulation

La Figure IV - 41 présente la succion calculée à 25 et 45 cm de profondeur. On voit que les deux courbes se ressemblent, malgré un écart entre elles. On observe sur les deux courbes l’effet de la pluie importante (8^{ème} jour), des deux autres pluies (5^{ème} jour et 21^{ème} jour) ainsi que l’effet d’évaporation après les pluies.

En comparant les résultats de la 2^{ème} et la 3^{ème} simulation, on observe que la 3^{ème} n’apporte pas d’amélioration significative. On observe la même anomalie le 9^{ème} jour les valeurs changent brusquement. C’est ainsi qu’on peut conclure que les changements des paramètres d’entrée pour la courbe de rétention ne modifient pas significativement la simulation de la succion.

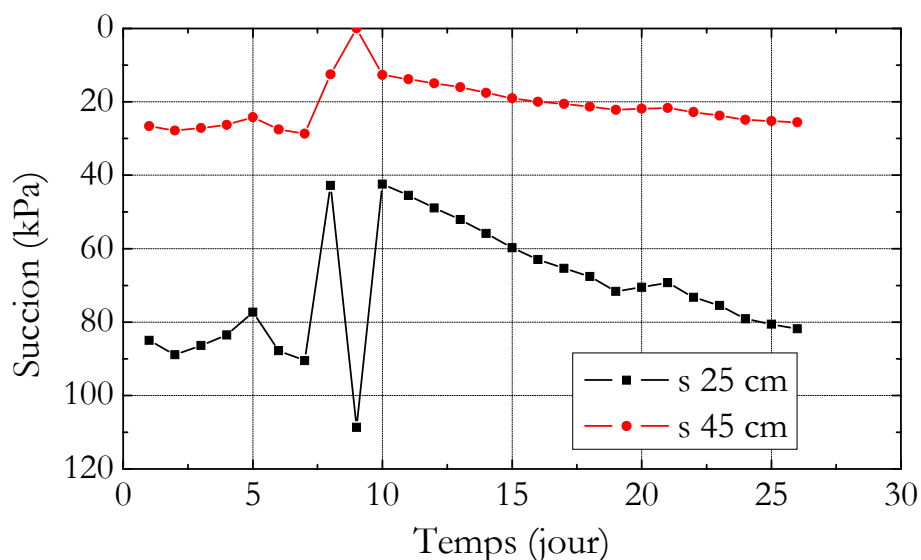


Figure IV - 41. Succion calculée à deux profondeurs différentes, 01-26 mai

La Figure IV - 42 présente les variations de succion mesurée et calculée à 25 cm de profondeur. Il y a peu de différences par rapport à la deuxième simulation. On observe une différence de 50 kPa pour les premiers 10 jours. Après une chute due à l’épisode de la pluie, les deux courbes se rapprochent avec des écarts compris entre 5 et 25 kPa. On remarque aussi l’influence des deux petites pluies au 5^{ème} et au 21^{ème} jour sur la courbe de succion calculée.

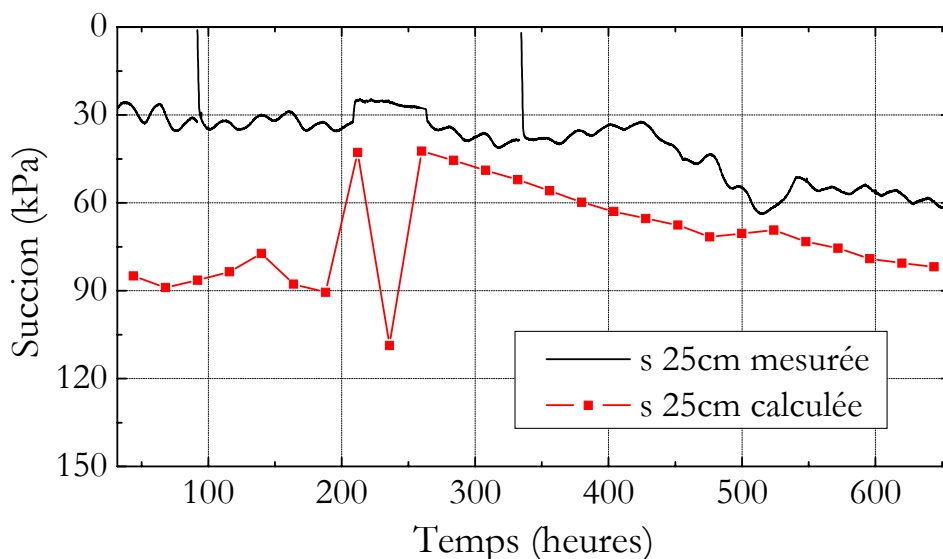


Figure IV - 42. Comparaison de la succion à 25 cm de profondeur, 01-26 mai

Les variations de succion mesurée et calculée à 45 cm de profondeur sont présentées sur la Figure IV - 43. On observe une fois encore, des résultats similaires à ceux de la 2^{ème} simulation. Les deux courbes sont proches pour les 7 premiers jours avec un écart faible compris entre 0 et 12 kPa. La pluie importante sépare visiblement les deux courbes et l'écart entre elles devient plus important (il passe de 20 à 50 kPa). Pour la pluie de 21^{ème} jour, on observe un décalage entre les valeurs mesurées et calculées

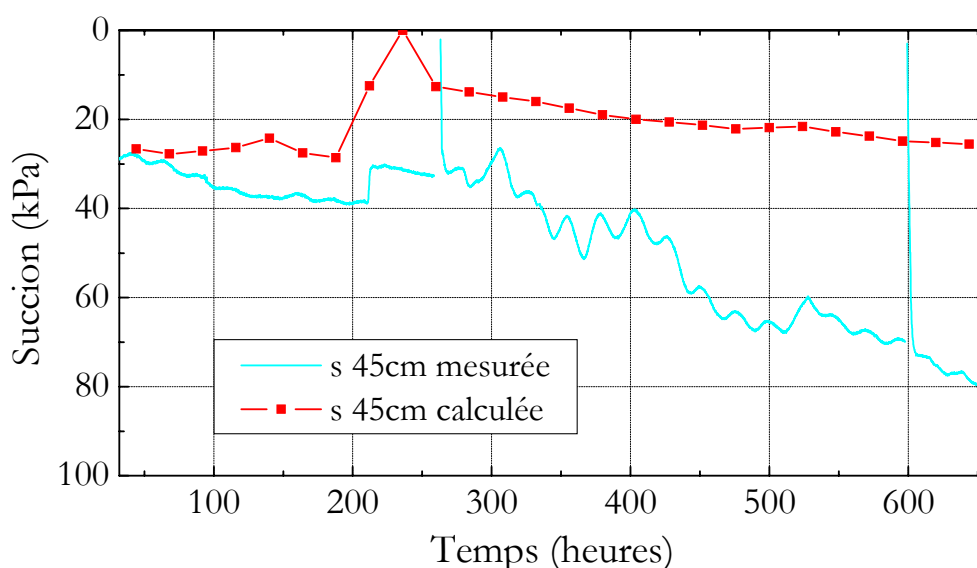


Figure IV - 43. Comparaison de la succion à 45 cm de profondeur, 01-26 mai

4.2.8.3 Variations de la température du sol

Les variations de la température calculée à deux profondeurs de 25 et 45 cm sont présentées sur la Figure IV - 44. Les observations sont les mêmes que pour les deux premières simulations : les deux courbes sont proches, l'élévation de la température est importante jusqu'à plus de 40 °C).

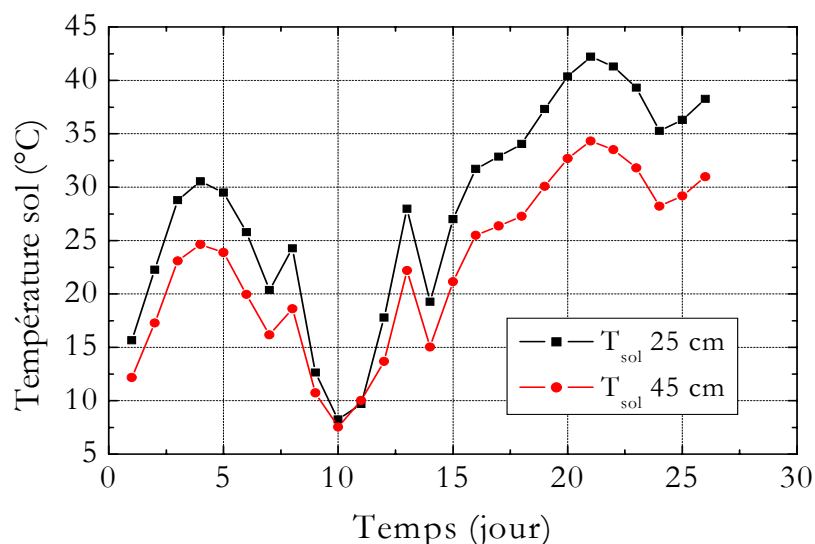


Figure IV - 44. Température calculée à deux profondeurs, 01-26 mai

La comparaison (seulement du 13^{ème} au 26^{ème} jour) présentée sur la Figure IV - 45 de la température du sol calculée et mesurée à trois profondeurs proches de la surface : 1 cm, 10 cm et 25 cm n'apporte rien de nouveau. On observe toujours une différence très importante entre les valeurs mesurées et calculées comme pour les deux simulations précédentes.

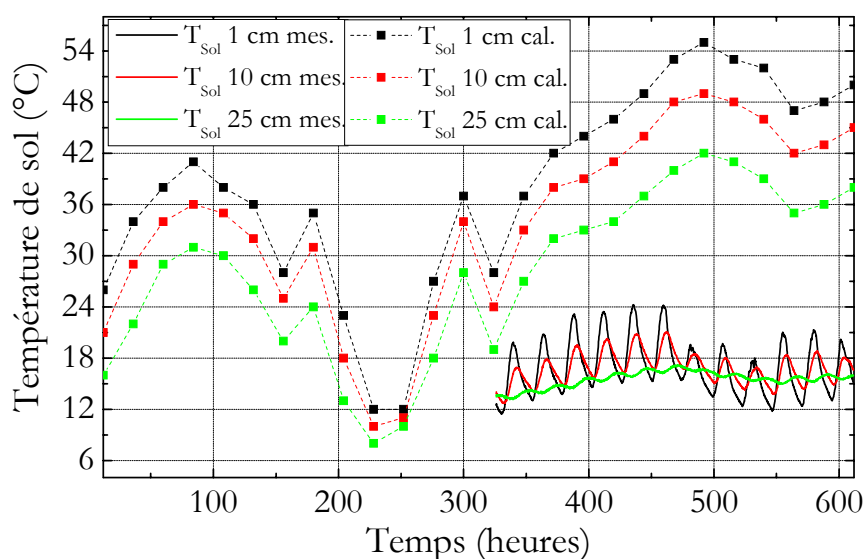


Figure IV - 45. Comparaison de la température à trois profondeurs, 01-26 mai

4.2.9 Comparaison globale des trois simulations

On évalue les simulations à partir des écarts constatés entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées. Au Tableau IV - 5 on récapitule les écarts observés pour différentes simulations des variations de teneur en eau volumique et de succion. On ne considère pas la température, car les trois simulations ont donné exactement les mêmes résultats.

Les écarts	1 ^{ère} simulation	2 ^{ème} simulation	3 ^{ème} simulation
θ à 5 cm	8,5 – 18 %	6 – 16 %	6,5 – 15 %
θ à 15 cm	8 – 15,5 %	3,5 – 8 %	6 – 11 %
θ à 25 cm	2 – 4 %	0-2 %	4 – 8 %
θ à 45 cm	0,5 – 2 %	2 – 3,5 %	4,5 – 7,5 %
θ à 55 - 115 cm	1,5 – 5 %	1 – 6 %	3,5 – 8 %
s à 25 cm	20 – 200 – 220 kPa	5 – 25 – 50 kPa	5 – 25 – 50 kPa
s à 45 cm	5 – 20 – 30 kPa	6 – 20 – 50 kPa	6 – 20 – 50 kPa

Tableau IV - 5. Comparaison des trois simulations

On observe que généralement la deuxième simulation donne les meilleurs résultats en termes d'écarts entre les calculs et les mesures (sans considérer l'anomalie observée le 9^{ème} jour pour la teneur en eau et la succion). Les écarts sont généralement importants, montrant la nécessité de l'amélioration du modèle, en particulier en ce qui concerne le transfert de la chaleur.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude se place dans le contexte des préoccupations actuelles liées aux dégâts causés par le retrait – gonflement des sols argileux. Elle comporte une grande partie dédiée aux nouveaux développements expérimentaux (chapitre 2). Ces développements ont demandé des mois de recherche et de réflexion afin de trouver les solutions adaptées à chaque question posée. En l'absence de références concernant ces développements, tout a été préparé soigneusement et réalisé par tâtonnements. Trouver et adopter la procédure appropriée pour chaque nouveau développement représentait un défi important.

Le tensiomètre développé au laboratoire (suivant l'exemple d'Imperial College) a subi une amélioration essentielle, qui a permis d'une part de détecter les différents problèmes et de trouver les solutions adaptées à chaque problème, et d'autre part de mettre en évidence les effets des différents paramètres. Par la suite une comparaison de la réponse du tensiomètre en conditions classiques au laboratoire et en conditions qui ressemblaient à celles du terrain a été réalisée. Les mesures directes de la succion au laboratoire et in situ ont démontré sa fiabilité et confirmé la possibilité de longues durées de mesure.

Le dispositif assurant des mesures directes de la succion a été un développement important (chapitre 2), car il a permis d'assurer des mesures fiables en condition de terrain. Le besoin d'assurer un système de mesure étanche est primordial, car l'entrée d'air représente un risque potentiel de cavitation et pourrait fausser les mesures. De plus ces mesures étaient indispensables pour la détermination de la courbe de rétention d'eau du limon. On a réalisé une série de mesures situées entre 35 et 1900 kPa. Seul le chemin de séchage a été suivi.

Deux méthodes (chapitre 3) ont été utilisées pour définir la perméabilité du limon de Boissy le Châtel. La première a permis de trouver le coefficient de perméabilité à l'état saturé, en utilisant un oedomètre relié à un perméamètre à charge variable. La deuxième (méthode des profils instantanés) a permis de déterminer la perméabilité à l'état non saturé. Trois essais d'infiltration à différentes succions initiales ont été réalisés pour la détermination de la perméabilité non saturée. Le développement de la colonne

d'infiltration (chapitre 2) a été basé sur les développements antérieurs du laboratoire. On cite deux phases importantes dans la réalisation de cet essai : la mise en place de l'échantillon de sol à l'intérieur de la colonne et le contact entre les tensiomètres et l'échantillon.

Les résultats obtenus ont montré une diminution de la perméabilité en fonction de la hauteur de l'échantillon, et une augmentation de la perméabilité dans le temps pour une hauteur donnée, ce qui montre bien que perméabilité diminue avec l'augmentation de la succion. Pour l'état proche de la saturation (faibles succions) on observe que les résultats sont cohérents, mais pour l'état non saturé (fortes succions) une dispersion plus importante est observée. Cette dispersion est due en partie à une infiltration relativement rapide de l'échantillon et du pas de temps de 24 h pour les isochrones. Une étude avec une maille plus fine des isochrones pendant la première phase d'infiltration (succions élevées) permettrait une meilleure précision.

Le développement du dispositif pour la mise en place in situ du tensiomètre a été mis au point au laboratoire. Son bon fonctionnement a été confirmé à travers une série de tests. Le suivi de la succion (à deux profondeurs – 25 et 45 cm) in situ durant la période mai – juin 2004 a été l'aboutissement du long travail de préparation. La période de temps choisie a permis une meilleure illustration des variations de la succion, car on passe de la saison dite froide à celle chaude. On a observé des variations de la succion de plus en plus importantes en fonction du temps (chapitre 3). Ces variations ont été confirmées directement par les mesures de la teneur en eau aux profondeurs correspondantes. Les données météorologiques complètes (précipitations, rayonnement, évapotranspiration, température et humidité relative de l'air, vitesse du vent) viennent compléter les informations nécessaires pour une analyse globale.

Les simulations numériques réalisées (chapitre 4) ont permis de mettre en évidence l'influence des paramètres de la courbe de rétention d'eau et de la courbe de perméabilité à l'état non saturé. Les comparaisons faites entre les valeurs calculées et mesurées pour les principaux paramètres pris en compte (succion, teneur en eau volumique) permettent de démontrer l'aptitude du modèle à reproduire de façon semblable l'état du sol. En effet

pour la succion le modèle a donné des variations globales cohérentes malgré l'anomalie parfois observée pour les fortes variations (après de fortes pluies) ; pour la teneur en eau le modèle donne aussi des résultats satisfaisants ; pour la température de sol, en revanche, les résultats calculés sont fortement décalés par rapport aux mesures réelles, ce qui montre la nécessité d'améliorer la détermination des paramètres liés à l'aspect thermique.

Dans notre étude, on a travaillé principalement sur le limon de Boissy le Châtel en raison de la disponibilité des données météorologiques et du sol fournie par le CEMAGREF. Ceci a permis notamment de valider une approche de mesure par tensiomètre et une approche numérique dans le cas de sol non déformable.

Afin d'étendre cette étude au cas problématique des argiles sensibles à la variation de la teneur en eau, on a étudié également les propriétés de rétention et de variation de volume de l'argile verte de Romainville en utilisant la méthode osmotique et la méthode par phase vapeur pour le contrôle de succion. La méthode osmotique a permis d'appliquer des succions faibles entre 1 et 6,1 MPa, alors que la méthode par phase vapeur a permis de couvrir une large plage de succions entre 6,1 et 216 MPa. Les échantillons ont suivi aussi bien le chemin de séchage que le chemin de remouillage. Les variations de l'indice des vides et du degré de saturation ont été déterminées, pour chaque palier de succion appliquée, en utilisant le dispositif de détermination de volume de l'échantillon de sol. Les résultats ont montré des variations importantes : pour l'indice des vides (entre 0,33 et 1,04) et pour le degré de saturation (entre 24 et 100 %). Trois parties sont observées dans les courbes caractéristiques : une première partie caractérisée par une variation de l'indice des vides importante (degré de saturation 100%), une deuxième partie avec une variation de l'indice des vides modérée (variation modérée du degré de saturation) et une troisième partie avec une faible variation de l'indice des vides (variation importante du degré de saturation). Les points de séparation correspondent au point d'entrée d'air ($s = 13,1$ MPa) et au changement de régime ($s = 113$ MPa). Pour la deuxième partie une hystérésis est mieux observée dans le graphique $s - S_r$, et pour la troisième partie la réversibilité est évidente.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alonso E. E., Gens A., Josa A., (1990). *A constitutive model for partially saturated soils*. Géotechnique 40, No. 3, p. 405-430.
- Adam N.K., (1941). *The physics and chemistry of surfaces*. Oxford University Press.
- Akulichev V., (1966). *Akust. Zh.* 12; [sov. Physics acoust. 12 – 144-149], p. 160-166.
- Apfel R.C., (1970). *The role of impurity in cavitation-threshold determination*. Journal of Acoustical Society of America, 48, p. 1179-1186.
- Bertin M., Faroux J. P., Renault J., (1981). *Thermodynamique*. Cours de Physique, 3^{ème} édition, Dunod.
- Biarez J., Fleureau J.M., Zerhouni M.I, Soepandji B.S., (1988). *Variations de volume des sols argileux lors de cycles de drainage – humidification*. Revue Française de Géotechnique, n°. 41, p. 63-71.
- Biddle P.G., (1983). *Patterns of soil drying and moisture deficit in the vicinity of trees on clay soils*. Géotechnique 33(2), p. 107-126.
- Bikerman J.J., (1958). *Surface chemistry, theory and applications*. Academic Press, Inc.
- Bishop A.W., Blight G.E., (1963). *Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils*. Géotechnique 13, p. 177-197.
- Bishop A.W., Kumapley N.K., El-Ruwayih A., (1975). *The influence of pore-water tension on the strength of clay*. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Mathematical and Physical Sciences. Vol. 278, 1286, p. 511-554.
- Blight G. E., (1997). *Interaction between the atmosphere and the earth*. Géotechnique, n°. 47, p. 715-767.
- Blight G.E., (1998). *Using the radiation balance to measure evaporation losses from the surface of the soil*. Proceedings of the 2nd International Conference on Unsaturated Soils 1998, p. 327-332, Beijing.
- Blight G.E., (2003). *The vadose zone soil - water balance and transpiration rates of vegetation*. Géotechnique 53, n°. 1, p. 55-64.

Bocking K.A., Fredlund D.G., (1980). *Limitation of the axis translation technique*. 4th Int. Conference of Expansive Soils. 1, p. 17-135. Colorado.

Bowen I. S., (1926). *The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface*. Phys. Rev. 27, p. 779-787.

Brackley I.J.A., (1975). *A model of unsaturated clay structure and its application to swell behaviour*. Proceedings of the 6th African Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, p. 65-70.

Building Research Establishment, (1990). *Low-rise buildings on shrinkable clay soils*, 1-3. Digest 240, 241 and 242. BRE.

Campbell G.S., & Norman J.M., (1998). *An introduction to environmental biophysics*. 2nd Edition, Springer Verlag, New York.

CEBTP, (1991). *Détermination des solutions adaptées à la réparation des désordres des bâtiments provoqués par la sécheresse*. Guide pratique élaboré par le CEBTP, sous l'égide de : l'AQC, l'APSAD, l'AFAC, la CCR et la FNB. Fasc1 : Bases de référence. 47p. + annexe, Fasc2 : Principes et méthodologie : 8 p. + annexes, Fasc3 : Annexes techniques.

Chapman P.J., Richards B.E. and Trevena D.H., (1975). *Monitoring the growth of tension in a liquid contained in a Berthelot tube*. J. of Physics E: Scientific Instrumentation. 8, p. 731-735.

Chassagneux D., Meisina C., Vincent M., Ménillet F., Baudu R., (1998). *Guide synthétique pour la prise en compte de l'aléa retrait-gonflement à l'échelle nationale*. Rapport BRGM n° R40355, 33 p., 6 fig., 1 tabl., 1 ann., 1 pl. hors-texte.

Coussy O., Fleureau J.M., (2002). *Mécanique des sols non saturés*. Lavoisier, Paris 390 p.

Croney D., (1952). *The movement and distribution of water in soils*. Géotechnique, 3 (1), p. 1-16.

Cui Y.J., (1993). *Etude du comportement d'un limon compacté non saturé et de sa modélisation dans un cadre élasto-plastique*. Thèse ENPC, 290 p.

Cui Y. J., Delage P., (1996). *Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt*. Canadian geotech. Journal, Vol. 33, p. 291-311.

Cui Y. J., (1996). *Les apports de la mécanique des sols non saturés*. Journée d'étude sur le comportement des sols et des ouvrages pendant et après les périodes de sécheresse, ENPC, (11-12 déc.).

Cui Y. J., Loiseau C., Delage P., (2002). *Microstructure changes of a confined swelling soil due to suction controlled hydration*. Proceedings of 3rd International Conference on Unsaturated Soils, (In Jucà et al. eds), Recife, Brésil. Rotterdam/ Balkema. Vol. 2, p. 593-598.

Cui Y.J., Lu Y.F., Riffard M., and Delage P., (2003). *Field Simulation of in-situ suction and temperature changes due to ground – atmospheric interactions*. Soumis à la revue Géotechnique, Londres.

Cutler D.F., and Richardson I.B.K., (1989). (2nd ed.) *Tree Roots and Buildings*, Longman Scientific and Technical, Harlow, Essex, UK. 71 p. (1st edition 1981: Construction Press).

Daniel D.E., (1982). *Measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soils with thermocouple psychrometers*. Soil Science Society of America Journal, 20, n° 6, p. 1125-1129.

Delage P., (1988). *Aspects du comportement des sols non saturés*. Revu français de géotechnique, n°. 40, p. 33-43.

Delage P., Suraj de Silva G.P.R., Vicol T., (1992). *Suction controlled testing of non saturated soils with an osmotic consolidometer*. 7th Int. Conf. on Expansive Soils, Dallas, Texas, p. 206-211.

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

Delage P., Cui Y.J., (2000). *L'eau dans les sols non saturés*. C301. Techniques de l'ingénieur Traité Construction, Vol. C2.

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., (2003). *Sols non saturés. Applications au calcul des ouvrages*. C-303-1. Traité Construction, Vol. C2.

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 Denis Diderot - Paris VII.

De Vries D.A., (1963). *Thermal properties of soils in physics of plan environment*. Edited by W.R. Van Wijk, North Holland Publishing Comp., Amsterdam, The Netherlands, p. 210-235.

Dineen K., & Burland J.B., (1995). *A new approach to osmotically controlled oedometer testing*. In E.E. Alonso & P. Delage (eds.), Unsaturated Soils, Proc. 1st Int. Conf. On Unsaturated Soils, Paris, 2, p. 459-465. Rotterdam: Balkema.

- Dineen K., Colmenares J.E., Ridley A.M., and Burland J.B., (1999). *Suction and volume changes of a bentonite-enriched sand*. Geotechnical Engineering 137(4), p. 197-201.
- Driscoll R., (1983). *The influence of vegetation on the swelling and shrinking of clay soils in Britain*. Géotechnique 33(2), p. 93-105.
- Eslinger. E., and Peaver D., (1988). *Clay Minerals for the Petroleum Geologists and Engineers*. SEPM Short Course Notes No. 22, Pp. 343, Tulsa, OK 74159. in Economic Geology, v.84(2), p. 464-465. Review written by P.A. Schroeder.
- Fredlund D.G., Rahardjo H., (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley and Sons, New York, 517p.
- Gao D.Z., (1995). *The cause of a large number of houses damage*. Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated soils Unsat'95, p. 863-867, Paris.
- Gardner R., (1937). *A method for measuring the capillary tension of soil moisture over a wider moisture range*. Soil Science, vol. 43, p. 277-293.
- Geremew Z., (2004). *Modélisation des échanges hydriques sol – atmosphere dans le cas de multicouche*. Mémoire de DEA EMP, ENPC, UMLV.
- Grim R.E., (1968). *Clay mineralogy*. McGraw-Hill, New York, 596p.
- Guan Y., (1996). *The measurement of soil suction*. Thesis at University of Saskatchewan, Canada.
- Guan Y. & Fredlund D.G., (1997). *Use of tensile strength of water for the direct measurement of high soil suction*. Canadian Geotechnical Journal 34, p. 604-614.
- Guan Y., Fredlund D.G., & Gan J.K.M., (1998). *Behaviour of water subjected to high tensile stress*. Proc. 2nd Int. Conf. on Unsaturated Soils, Beijing, China, p. 356-361.
- Harvey E.N., Barnes D.K., McElroy W.D., Whiteley A.H., Pease & Cooper D.C., K.W., (1944). *Bubble formations in animal, 1-Physical Factor*. J. Cellular and Comparative Physiology 24(1), p. 1-22.
- Holtz W.G., (1983). *The influence of vegetation on the swelling and shrinking of clays in the United States of America*. Géotechnique 33(2), p. 159-163.
- Jackson R.B., Sperry J.S., Dawson T.E., (1999) *Root water uptake and transport: using physiological processes in global predictions*. Unpublished.

- Jame Y.W., (1977). *Heat and mass transfer in freezing unsaturated soil*. Ph.D. dissertation, University of Saskatchewan, Saskatoon.
- Juarez-Badillo E., (1992). *Leyes naturales en geomecanica*. Volumen Raul J. Marsal: 31. SMMS, Mexico.
- Knapp R.T., Daily J.W., Hammitt F., (1970). *Cavitation*. McGraw Hill Book Comp., 578p.
- Krischer D., Rohnlalter H., (1940). *Warmeleitung und Dampfdiffusion in feuchten Gutern*. Ver. Dt. Ing. Forschungsh, 402 p.
- 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), p. 3-6.
- La Nature, (1981). *Le sol, un monde vivant*. Volume 10. Encyclopédie, Hachette.
- Leong E.C., & Rahardjo H., (1997). *Permeability functions for unsaturated soils*. Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE p. 1118-1126.
- Loiseau C., (2001). *Transferts d'eau et couplages hydromécaniques dans les barrières ouvragées*. Thèse ENPC, 225p.
- MAIF, (2000) : *La méthodologie de l'expertise sécheresse*. 19p. + annexes. Document interne
- Marinho F.A.M, and Chandler R.J., (1994). *Discussion: A new instrument for the measurement of soil moisture suction*. Géotechnique 44(3), p. 551-556.
- Marinho F.A.M., and Chandler R.J., (1995). *Cavitation and direct measurement of soil suction*. Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils (E.E. Alonso & P. Delage eds), Paris, 2, p. 623-630. Balkema, Rotterdam.
- Meyer J., (1911). *Zur Kenntnis des Negativen Druckes in Flüssigkeiten*. Abh. D. Bunsen-Ges, Vol. 6, p. 1-53.
- Ministère de l'environnement, (1993). *Sécheresse et construction*. Guide de prévention 51p. La Documentation Française.
- Mitchell J.K., (1993). *Fundamentals of soil behaviour*. John Wiley & Sons Inc., 2nd ed., 437p.
- Morel R., (1996). *Les sols cultivés*. Lavoisier, Paris.
- Mouroux P., Margron P., et Pinte J.C., (1988). *La construction économique sur sols gonflants*. Edit. BRGM, Manuels et Méthodes n° 14.

- Ohde Y., Hiro K., Ono M., Isono H., Watanebe H., (1992). *Effects on trends in negative pressure of surface pre-treatments for the sealing plugs of a water-metal Berthelot tube system*. Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 25, p. 1096-1101.
- Penman H.L., (1948). *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. Proc. R. Soc. London, Ser. A 193, p. 120-146.
- Penman H.L., (1952). *The physical bases of irrigation control*. Proc. 13th Int. Horticult. Cong., London, 2, p. 913-914.
- Penman H. L., (1956). *Estimating evaporation*. Trans. Am. Geophys. Union 37, p. 43-50.
- Penman, H. L., (1963). *Vegetation and hydrology*. Technical Communication No. 53. Harpenden: Commonwealth Agricultural Bureaux.
- Philip J.R., (1955). *The concept of diffusion applied to soil water*. Proceedings, National Academy of Science, India, 24A, p. 93-104.
- Philipponnat G., (1991). *Retrait – gonflement des argiles, proposition de méthodologie*. Revue Française de Géotechnique n° 57, p. 5-22.
- Richards B.G., Peter P., et Emerson W.W., (1983). *The effects of vegetation on the swelling and shrinking of soils in Australia*. Géotechnique, 32 (2), p. 127-139.
- Ridley A.M., (1993). *The measurement of soil moisture suction*. Thesis at University of London.
- Ridley A.M., & Burland J.B., (1993). *A new instrument for the measurement of soil moisture suction*. Géotechnique 43(2), p. 321-324.
- Ridley A.M., & Wray W. K., (1995). *Suction measurement: A review of current theory and practices*. Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils (E.E. Alonso & P. Delage eds), Paris, 3, p. 1293-1322. Balkema, Rotterdam.
- Ridley A.M., & Burland J.B., (1996). *A pore pressure probe for the in situ measurement of a wide range soil suctions*. In C. Craig (ed.), *Advances in Site Investigation Practice*, p. 510-520. London: Thomas Telford.
- Ridley A.M., Schnaid F., Da Silva G.F., & Bica A.V.D., (1997). *In situ suction measurements in a residual soil of southern Brasil*. In NSAT'97-3^o Simpósio Brasileiro sobre Solos Não Saturados, Rio de Janeiro, Brasil, T.M.P. de Campos and E.A. Vargas Jr. Freitas Bastos (eds) 2, p. 537-542.

- Ridley A.M., & Burland J.B., (1999). *Discussion: Use of tensile strength of water for the direct measurement of high soil suction*. Canadian Geotechnical Journal 36, p. 178-180.
- Ridley A.M., Dineen K., Burland J.B., Vaughan P.R., (2003). *Soil matrix suction: some examples of its measurement and application in geotechnical engineering*. Géotechnique 53 (2), p. 241-254.
- Romero E., (2001). *Suction controlled techniques*. In NSAT'2001, 4^o Simpósio Brasileiro sobre Solos Não Saturados, Porto Alegre, Brasil.
- Schofield R.K., (1935). *The p^F of water in soil*. Trans. Of the 3rd International Congress on Soil Science, 2, p. 37-78.
- Schroeder P.A., (2002). *Infrared Spectroscopy in Clay Science. in Teaching Clay Science*. (ed.) Steve Guggenheim and Audrey Rule, Clay Minerals Society Workshop Series. The Clay Minerals Society, Aurora. CO. v. 13. p. 181-202.
- Sjoblom K.J., (2000). *The mechanisms involved during the desaturation process of a porous matrix*. PhD Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Boston, US
- Skempton A.W., (1954). *A foundation failure due to clay shrinkage caused by poplar trees*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Part 1, Volume 3, p. 66-86.
- Snethen D.R., and Huang G., (1992). *Evaluation of soil suction - heave prediction methods*. Proceedings of the 7th Int. Conference on expansive soils, Dallas Vol. I, p. 12-17.
- Stannard D.I., (1992). *Tensiometers: Theory, construction and use*. Geotechnical Testing Journal, 15(1), p. 48-58.
- Take W.A., and Bolton M.D., (2003). *Tensiometer saturation and the reliable measurement of soil suction*. Géotechnique 53 (2), p. 159-172.
- Tanner C.B., (1960). *Energy balance approach to evapo-transpiration from crops*. Proc. Soil Sci. Soc. Am. 24, p. 1-9.
- Tarantino A., & Mongiovi L., & Bosco G., (2000). *An experimental investigation of the independent isotropic stress variables for unsaturated soils*. Géotechnique, 50(3), p. 275-282.
- Tarantino A., Mongiovi L., (2001). *Experimental procedures and cavitation mechanisms in tensiometer measurements*. Geotechnical and Geological Engineering 19 (3-4), p. 189-210.

- Tarantino A., & Mongiovi L., (2002). *Design and construction of a tensiometer for direct measurement of matric suction*. Proceedings of 3rd International Conference on Unsaturated Soils (JFT Jucá, TMP de Campos, FAM Marinho, eds.), Recife, Brasil 1, p. 319-324.
- Tarantino A., & Mongiovi L., (2003). *Calibration of tensiometer for direct measurement of matric suction*. Géotechnique, 53(1), p. 137-141.
- Tarantino A., (2003). *Panel report: Direct measurement of soil water tension* Proceedings of the 3rd International Conference on Unsaturated Soils (JFT Jucá, TMP de Campos, FAM Marinho, eds.), Recife, Brasil 3. In press.
- Toker N.K., 2002. *Improvements and reliability of MIT tensiometers and studies on soil moisture characteristic curves*. MSc Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Boston, US.
- Vandangeon P., (1992). *Exemple de sinistres en région parisienne*. Revue Française de Géotechnique, n°58, p. 7-14.
- Verbrugge J.C., (1974). *Contribution à la mesure de la succion et de la pression interstitielle dans les sols non saturés*. Thèse Université Libre de Bruxelles 212 p.
- Wang Q., Huang S.K., Ke Z.J., et Fan Q.Y., (1998). *Long term field monitoring of climatic impact on matric suction and ground movement in Nanning, China*. Proc. of the 2nd Inter. Conf. on unsaturated soils. Unsat'98, p. 444-449, Beijing.
- Wilson G.W, Fredlund D.G, Barbour S.L., (1994). *Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation*. Canadian Geotechnical Journal. No. 31, p. 151-161.
- Wilson G.W., Fredlund D.G., Barbour S.L., (1997). *The effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surfaces*. Canadian Geotechnical Journal.No. 34, p. 145-155.
- Williams A.A.B., & Pidgeon J.T., (1983). *Evapo-transpiration and heaving clays in South Africa*. Géotechnique 33(2), p. 141-150.
- Yount D.E., (1979). *Skins of varying permeability: A stabilization mechanism for gas cavitation nuclei*. Journal of Acoustical Society of America, Vol. 65, p. 1429-1439.
- Yount D.E., (1988). *Hyperbaric Medicine and Physiology*. Y-C Lin and A.K.C. Niu, eds., Best Publishing Co., San Pedro.