Sommaire

Résume 1
Abstract 1
الملخص 1
Notations 2
Liste des figures 3
Liste des tableaux 5

Introduction générale **6**

Chapitre 1

I. 1. Introduction 8
I. 2. Circulation de l'eau dans les sols 9
I.2.1. Généralités 9
I.2.2. La loi empirique de Darcy 9
I.2.3. Généralisation de la loi de Darcy 11
I.2.4. Généralisation de la loi de Darcy aux sols non saturés 12
I. 3. Les contraintes dans les sols 15
I.3.1. Contraintes dans les sols saturés -Approche de Terzaghi 15
I.3.2. Contraintes dans les sols non saturés 15
I.3.2.1. Relation de Bishop 15
I.3.2.2. Succion dans les sols 16
I. 4. Conclusion 17

Chapitre 2

II. 1. Introduction 18
II. 2. Les techniques de mesure de la permeabilite 18
II. 2. 1. Les techniques de mesure de la perméabilité au laboratoire 18
II. 2.1.1. Cas de matériaux perméables 18
II. 2.1.2. Cas des matériaux relativement imperméables 19
II. 2. 2. Les techniques de mesure in situ de la perméabilité 20
II.2.2.1. Généralités 20
II.2.2.2. L'essai de pompage de Dupuis 20
II.2.2.3. L'essai d'injection 21
II.2.3. Comparaison et conclusion 22
II. 3. Les techniques de mesure de la teneur en eau 22
II. 3. 1. Les techniques de mesure de la teneur en eau au laboratoire 22
II. 3.1.1 Détermination de la teneur en eau pondérale 22
II. 3.1.2. Détermination de la teneur en eau volumique 24
II. 3. 2. Les techniques de mesure de la teneur en eau In situ 25
II. 3. 2.1. Les sondes TDR 25
II. 3. 2. 2. Les sondes à neutrons 26
II.3.3. Comparaison et conclusion 28
II. 4. Les techniques de mesure de la succion 28
II. 4.1. Les techniques de mesure de la succion au laboratoire 28
II.4.2. Les techniques de mesure de la succion In situ 30
II.4.3. Comparaison et conclusion 30

II.5. Conclusion 31

Chapitre 3

III. 1. Introduction 32
III. 2. Présentation du site de l'étude 32
III. 3. Mesure de la teneur en eau 33
III. 3. 1. Dispositif de mesure 33
III. 3. 2. Lecture des résultats 35
III. 3. 3. Précision de lecture 36
III. 4. Mesure de la perméabilité 36
III. 4. 1. Dispositif de mesure 36
III. 4. 2. La description des éléments de l'appareillage 37
III. 4. 2. 1. Le trépied 37
III. 4. 2. 2. Le tube support et les raccords du tube à air inférieur 39
III. 4. 2. 3. Le corps du réservoir 40
III. 4. 2. 4. Le couvercle du réservoir 41
III. 4. 2. 5. Le tube gradué et les raccords du tube à air 41
III. 4. 2. 6. Les outils auxiliaires 42
III. 5. Mesure de succion 42
III. 5. 1. Généralités 42
III. 5. 2. Description de l'appareillage 43
III. 6. Conclusion 44
Chapitre 4
IV. 1. Introduction 45
IV. 2. Analyse des résultats de la perméabilité 45
IV. 2.1. Etude de la variation des paramètres hydrauliques 45
IV. 2. 1. 1. Exemple du 1ier trou : le Trou R4C 45
IV. 2. 1. 2. Exemple du 2ième trou : le Trou R3E 50
IV. 2. 1. 3. Exemple d'application de l'analyse de Richards : Trou R4C 57
IV. 2.2. La variation de la perméabilité et du potentiel hydrique pour chaque rangée 59
IV. 2.3. La variation de la perméabilité et du potentiel hydrique pour l'ensemble du site 62
IV. 2.4. Carte de la perméabilité 63
IV. 2.5. Carte du potentiel hydrique 64
IV. 2.6. Carte de l'absorption 66
IV. 2.7. La superposition des cartes 67
IV.3. Analyse des résultats de la succion 68
IV.3.1. Courbes de succion 68
IV.3.1.1. L'influence de la température 68
IV.3.1.2. L'influence de la pluie 69
IV.3.1.3. L'influence des racines 70
IV.4. Analyse des résultats de la teneur en eau 76
IV.4.1. Courbes de variation journalière de la teneur en eau 76
IV.4.2. Courbes de variation de la teneur en eau en fonction de la profondeur 77
IV.4.3. Cartes de la teneur en eau 79
IV.5. Corrélation entre teneur en eau et succion 79
IV.6. Mesure en laboratoire 81
IV.6.1. Variation de la succion au cours du temps pour différentes 82

profondeurs
IV.6.2. Variation de la teneur en eau au cours du temps pour différentes profondeurs 83
IV.6.3. Relation entre la teneur en eau et la succion 84
IV.7. Conclusion 84

Conclusion générale **85**

Bibliographie **87**

Annexe 1 : Calcul des teneurs en eau 89
Annexe 2 : Calcul de la perméabilité 95
Annexe 3 : Valeurs de la succion 106

Résumé

L'étude de la circulation de l'eau dans le milieu non saturé représente un point crucial dans différents domaines tels que le nucléaire (stockage des déchets), l'agriculture, les ouvrages de génie civil (barrages) etc. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail. Ainsi, après deux premiers chapitres introductifs consacrés respectivement aux notions générales de l'écoulement de l'eau dans le sol et aux techniques de mesures de la perméabilité, de la teneur en eau et de la succion au laboratoire et in situ. Nous avons détaillé dans le chapitre 3 la campagne des mesures effectuées dont l'exploitation et l'interprétation sont analysées dans le chapitre 4. Il ressort de cette étude qu'il est très difficile, voire impossible, de maitriser les conditions d'une étude in situ, le climat et les hétérogénéités non perceptibles en surface y interviennent avec prédominance, que les conditions d'essais au laboratoire fournissent des résultats plus évidents et enfin pour un même point, une variation de la teneur en eau presque imperceptible a donné une variation de la succion mesurable.

Mots clés: Mesures in situ, sols non saturés, teneur en eau, perméabilité, succion.

Abstract

The study of the circulation of water in the medium unsaturated represents a crucial point in various fields such as the nuclear power (storage of waste), agriculture, civil engineer works (stopping), etc. It is within this framework that this works is registered. Thus, after the first two introductory chapters devoted respectively to the notion general of the water run-off in the ground and to the measurement techniques of the permeability, of the water in situ. We detailed in chapter 3 the country side of the measures taken whose exploitation and interpretation are analyzed in chapter 4. It comes out from this study that it very difficult, even impossible to control the conditions of an in situ study, the climate and non perceptible heterogeneities surfaces some intervene there with prevalence, that the conditions of tests at the laboratory provide more obvious results and finally for the same point, a variation of the almost unperceivable content water have a variation of measurable suction.

Key words: In situ measurements, unsaturated grounds, water content, permeability, suction.

الملخص

إن دراسة حركة المياه في الوسط الغير مشبع، يمثل نقطة هامة في عدة مجالات مختلفة كتخزين النفايات النووية، الفلاحة، مشاريع الهندسة المدنية (السدود)، الخ. هذه الدراسة تدخل في هذا المجال. و لهذا و بعد الجزئين الأول و الثاني اللذان يمثلان مدخلا لموضوع المياه في الأوساط الغير مشبعة وحول تقنيات قياس النفاذية, المياه المحتواة و حول الامتصاص, أعطينا في الجزء الثالث الدراسة الميدانية التي قمنا بها و الذي يأت تحليلها و استغلال نتائجها في الجزء الرابع. أهم المستخلصات التي أتت بها هذه الدراسة هو أنه يصعب كثيرا التحكم في ظروف الدراسات التي تقام في الميدان و ذلك لأن التقلبات المناخية و كذلك عدم تجانس التربة التحتية للأرض و التي لا ترى في الفوق يأثران بقوة, أنه يصعب التحكم في ظروف التجارب في الميدان, أن الدراسات المنجزة في المخابر تعطي نتائج منطقية و أن تغير غير ملحوظ للمياه المحتواة يعطي تغيرا ملموسا للأمتصاص,

كلمات مفتاحية قياسات في الميدان, تربة غير مشبعة, ماء محتوى, نفاذية, امتصاص.

Notations

Q	:	Débit de l'écoulement mesuré à la sortie (L^3/T).
L	:	Longueur de l'échantillon (L).
S	:	Section de l'échantillon normale à la direction de l'écoulement (L^2).
h_A	:	Hauteur à partir d'un plan de référence de l'eau à l'entrée de l'échantillon (L).
h_B	:	Hauteur à partir d'un plan de référence de l'eau à la sortie de l'échantillon (L).
K	:	Constante que Darcy a nommé coefficient de perméabilité du sol (L/T).
ρ	:	La masse volumique (kg/m^3)
μ	:	La viscosité dynamique du liquide (Pa/s).
$\vec{v}$	:	La vitesse de l'écoulement
α	:	Le coefficient de proportionnalité
S	:	La capacité d'absorption du sol
V_v	:	Le volume des vides
V_w	:	Le volume de l'eau présent dans V_v
V_T	:	Le volume total
M_w	:	La masse de l'eau
M_s	:	La masse des particules solides
θ	:	La teneur en eau volumique
ω	:	La teneur en eau massique
K_{fs}	:	La conductivité hydraulique
ϕ_m	:	Le potentiel hydrique
σ'	:	Les contraintes effectives
σ	:	Les contraintes totales
u	:	La pression de l'eau
I	:	La tenseur unité
u_a	:	La pression de l'air
u_w	:	La pression de l'eau.
ρ_a	:	La masse volumique de l'eau
ρ_w	:	La masse volumique apparente du sol

Liste des figures

Figure 1.1	:	Les différentes formes de l'eau	8
Figure 1.2	:	Expérience de Darcy, perméamètre à charge constante	9
Figure 1.3	:	Généralisation de la relation de Darcy	11
Figure 1.4	:	Variation de la perméabilité en fonction de la saturation	14
Figure 1.5	:	Variation de la succion en fonction de la teneur en eau volumique	16
Figure 2.1	:	Schéma du perméamètre à charge variable	19
Figure 2.2	:	Configuration de l'essai de pompage de Dupuis	20
Figure 2.3	:	Essai d'injection en puits	21
Figure 2.4	:	Tarière manuelle pour prise d'échantillon	23
Figure 2.5	:	Cylindre pour la détermination de la masse volumique apparente d'un sol	24
Figure 2.6	:	Les sondes TDR	25
Figure 2.7	:	Sonde tube TRIME et son volume de mesure	26
Figure 2.8	:	Sonde neutronique employé sur le terrain	27
Figure 2.9	:	Sonde neutronique Nardeux Solo 25	27
Figure 2.10	:	Sonde neutronique	28
Figure 2.11	:	Schéma du tensiomètre à eau	29
Figure 2.12	:	Schéma d'un psychromètre	29
Figure 3.1	:	Position des piézomètres de mesure au niveau du site expérimental de l'EPUL	33
Figure 3.2	:	La sonde PR1 de Delta-TDevices.	34
Figure 3.3	:	Manipulation de la sonde PR1 de Delta-TDevices	34
Figure 3.4	:	Schéma de fonctionnement de la sonde PR	35
Figure 3.5	:	Boîtier type HH2	35
Figure 3.6	:	Le trépied du perméamètre	37
Figure 3.7	:	Schéma du perméamétrie de Guelph	38
Figure 3.8	:	Tube support	39
Figure 3.9	:	Corps du réservoir	40
Figure 3.10	:	Couvercle du réservoir	41
Figure 3.11	:	Tube gradué	42
Figure 3.12	:	Tensiomètre à bougie poreuse	42
Figure 3.12	:	Le tensiomètre	43
Figure 4.1	:	Variation de la hauteur d'eau en fonction du temps (H1=5cm)	46
Figure 4.2	:	Variation de la hauteur de l'eau en fonction du temps (H2=10 cm)	46
Figure 4.3	:	Variation de la chute de la hauteur d'eau en fonction du temps (H1=5 cm)	47
Figure 4.4	:	Variation de la chute de la hauteur d'eau en fonction (H2=10 cm)	48
Figure 4.5	:	Variation du débit spécifique en fonction du temps (H1=5 cm)	48
Figure 4.6	:	Variation du débit spécifique en fonction du temps (H2=10 cm)	49
Figure 4.7	:	Variation de la hauteur d'eau en fonction du temps (H1=5 cm)	51
Figure 4.8	:	Variation de la hauteur d'eau en fonction du temps (H2=10 cm)	51
Figure 4.9	:	Variation de la hauteur d'eau en fonction du temps (H3=15 cm)	52
Figure 4.10	:	Variation de la hauteur d'eau en fonction du temps (H4=20 cm)	52
Figure 4.11	:	Variation de la chute de la hauteur d'eau en fonction du temps (H1=5 cm)	53

Figure 4.12 : Variation de la chute de la hauteur d'eau en fonction du temps (H2=10cm) 53
Figure 4.13 : Variation de la chute de la hauteur d'eau en fonction du temps (H3=15cm) 54
Figure 4.14 : Variation de la chute de la hauteur d'eau en fonction du temps (H3=20cm) 54
Figure 4.15 Variation du débit spécifique en fonction du temps (H1=5 cm) 54
Figure 4.16 Variation du débit spécifique en fonction du temps (H2=10 cm) 55
Figure 4.17 : Variation du débit spécifique en fonction du temps (H2=15 cm) 55
Figure 4.18 : Variation du débit spécifique en fonction du temps (H2=15 cm) 55
Figure 4.19 : Variation de la perméabilité et du potentiel hydrique pour la rangée R1 59
Figure 4.20 : Variation de la perméabilité et du potentiel Hydrique pour la rangée R2 60
Figure 4.21 : Variation de la perméabilité et du potentiel hydrique pour la rangée R3 60
Figure 4.22 : Variation de la perméabilité et du potentiel hydrique pour la rangée R4 61
Figure 4.23 : Variation de la perméabilité sur le site d'étude 62
Figure 4.24 : Variation du potentiel hydrique sur le site d'étude 63
Figure 4.25 : Carte des perméabilités du site d'étude (Kfs en 10^{-4}cm/s) 64
Figure 4.26 : Carte des potentiels hydriques du site d'étude (ϕ_m en 10^{-4} cm²/s) 65
Figure 4.27 : Carte des absorptions sur le site d'étude (S en 10-² cm/s) 66
Figure 4.28 : Superposition des cartes de la perméabilité, du potentiel hydrique et de l'absorption du site d'étude 67
Figure 4.29 : Courbes de succion en fonction du temps pour différentes profondeurs R2D (21/04/2003) 68
Figure 4.30 : Courbes de la succion en fonction du temps du puits R3B (25/03/2003) 70
Figure 4.31 : Courbes de succion en fonction du temps du puits R3D (27/03/2003; pluie de 4,5 mm) 70
Figure 4.32 : Courbes de succion en fonction du temps en présence des racines (Puits R4E, 13/05/2003) 71
Figure 4.33 : Les Courbes de la succion en fonction de la profondeur pour la rangée R1 72
Figure 4.34 : Courbes de succion en fonction de la profondeur pour la Rangée R2 72
Figure 4.35 : Les Courbes de succion en fonction de la profondeur pour la Rangée R3 73
Figure 4.36 : Les Courbes de succion en fonction de la profondeur pour la rangée R4 73
Figure 4.37 : Courbes de variation de succion en fonction de la profondeur pour la rangée R1 74
Figure 4.38 : Courbes de variation de succion en fonction de la profondeur pour la rangée R2 74
Figure 4.39 : Courbes de variation de succion en fonction de la profondeur pour la rangée R3 75
Figure 4.40 : Courbes de variation de succion en fonction de la profondeur pour la rangée R4 75
Figure 4.41 : Courbes de variation de teneur en eau dans la journée (R2A ; 16/05/2003) 76
Figure 4.42 : Courbes de teneur en eau on fonction de la profondeur pour la rangée R1 77
Figure 4.43 : Courbes de teneur en eau en fonction de la profondeur pour la Rangée R2 77
Figure 4.44 : Courbes de teneur en eau en fonction de la profondeur pour la Rangée R3 78
Figure 4.45 : Courbes de teneur en eau en fonction de la profondeur pour la Rangée R4 78
Figure 4.46 : Courbe de relation entre la teneur en eau et la succion pour le rangé R3 à 100 cm 80
Figure 4.47 : Courbe de relation entre la teneur en eau et la succion pour la rangé R3D 80

Rapport-Gratuit.com

du 29 avril 2003
Figure 4.48 : Courbes de variation de la succion au cours du temps pour différentes profondeurs au laboratoire 83
Figure 4.49 : Courbes de la variation de teneur en eau à différentes profondeurs en laboratoire 83
Figure 4.50 : Courbe de relation entre la teneur en eau et la succion au laboratoire 84

Liste des tableaux

Tableau 4.1 : Récapitulatif des résultats détaillés sur le trou R4C……. 50

Tableau 4.2 : Récapitulatif des résultats détaillés sur le trou R3E……..... *56*

Tableau 4.3 : Calcul d'erreur……..… 57

Tableau 4.4 : Récapitulatif des calculs de l'analyse de Richards pour le trou R4C……... 58

Introduction générale

L'eau est considérée comme une ressource très importante dans notre vie. Elle joue un rôle primordial dans le comportement des différents types de sols. Sous nos climats, l'apport d'eau au sol se fait sous forme de pluie, de neige, de rosée et de brouillard. Toute l'eau des précipitations n'atteint pas le sol. Une part est évaporée directement pendant et après la pluie. Les gouttes peuvent être interceptées en partie par le feuillage. L'eau qui atteint le sol ruisselle, s'infiltre et ré-humecte le sol. Les racines absorbent cette eau que la tige et les feuilles évaporent par transpiration. Une fraction réduite gagne finalement la profondeur et atteint la nappe. Un profil habituel de la quantité d'eau contenu dans une coupe du sol et du sous-sol montre que la teneur en eau est fonction de la porosité et de la perméabilité du sol.

La texture et la structure d'un sol conditionnent la circulation de l'eau car elles auront respectivement une incidence sur la porosité texturale, stable et immuable et sur la porosité structurale qui évolue en fonction des usages du sol et du climat. On distingue l'eau de gravité et l'eau de rétention :

- L'eau de gravité correspond à l'eau qui s'infiltre jusqu'à rejoindre une éventuelle nappe phréatique.
- L'eau de rétention qui est en revanche maintenue dans les horizons de surface. Elle existe sous 2 formes : l'eau capillaire et l'eau pelliculée.
- L'eau capillaire soumise à des forces électrostatiques et ioniques supérieures au pouvoir de succion des racines, se fixe aux particules du sol. Elle n'est donc pas disponible pour les végétaux. Ceci correspond au point de flétrissement des plantes.
- L'eau pelliculée dite aussi « liée » située dans les pores entre les agrégats du sol est au contraire utilisable par les plantes. Elle correspond à une certaine « capacité au champ » du sol. Quant à la réserve utile (RU), facteur clé pour déterminer le potentiel agricole d'un sol, elle correspond à la quantité maximale d'eau utilisable par les plantes.

Le volume maximal d'eau qu'un sol peut retenir est la capacité de rétention du sol qui dépend essentiellement de la granulométrie du sol. Près de la surface, le sol n'est pas saturé, les espaces vides contiennent de l'eau et de l'air. L'eau est soumise aux forces de gravité et de capillarité. A partir d'une certaine profondeur, la teneur en eau n'augmente plus, le sol est saturé et toutes les pores du sol sont remplies d'eau : cette zone saturée forme une nappe.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Cependant on caractérise d'une autre façon l'humidité du sol en mesurant la force qui lie l'eau à la roche : c'est la mesure du potentiel capillaire. Cette mesure s'effectue au laboratoire ou sur le terrain. Le potentiel capillaire permet de caractériser l'humidité d'un milieu poreux par un rapport d'énergie, c'est-à-dire qu'on l'exprime par l'énergie potentielle spécifique de l'eau du sol par rapport à celle de l'eau libre qui est prise comme référence. Le potentiel représente l'énergie que le sol applique à l'eau de rétention qu'il contient.

Les argiles sont le principal support de l'eau dans le sol. Ce sont des phyllosilicates c'est-à-dire des minéraux à base de silice qui comme les micas présentent une structure en feuillets. La diversification des feuillets augmente la taille des cavités issues de l'agencement des molécules, donc les contacts entre elles et l'eau et par conséquent la capacité de rétention d'un sol. Cette capacité de fixation des molécules d'eau est une composante de la capacité d'échange cationique (CEC). C'est cette même propriété qui explique la fixation du calcium à l'argile pour créer un pont calcique avec l'humus et former ainsi le complexe argilo-humique. En résumé un sol est essentiellement caractérisé par sa capacité de rétention (CR), sa réserve utile (RU) et sa capacité d'échange cationique (CEC).

Dans le ***premier chapitre*** de ce mémoire, on présente la circulation de l'eau dans le sol et les contraintes appliquées pour les deux types de sols :

- Sol saturé
- Sol non saturé

Le ***deuxième chapitre*** présente les techniques de mesure des trois paramètres à savoir la perméabilité, teneur en eau et la succion. Ces mesures sont faites au laboratoire ou sur le terrain.

Avant de commencer les mesures, il faut préparer tout d'abord le site de tests et réaliser efficacement des partitions de l'espace disponible. Cette étude est présentée dans le ***troisième chapitre***. Dans cette partie, on aborde aussi le mode opératoire de chaque appareil de mesure ainsi que le principe suivi pour relever les mesures chaque jour. A la fin de ce chapitre, on présente les difficultés rencontrées dans la phase expérimentale.

Le ***quatrième chapitre*** est consacré à l'analyse des mesures obtenues in situ et au laboratoire pour les trois paramètres cités précédemment. Le but recherché derrière cette étude est de comprendre les phénomènes naturels et les relations qui existent entre ces paramètres.

Chapitre 1

L'eau dans les sols

I. 1. Introduction

Dans le sol, l'eau peut se trouver sous plusieurs états suivant l'intensité des forces liant ses molécules aux particules solides. Ainsi, on distingue :

- L'eau de constitution qui entre dans la composition chimique des minéraux dont les particules de sol est formée. Elle n'est disponible ni pour les plantes ni pour les aquifères et ne s'évapore qu'à de très fortes températures. Elle ne produit pas l'effet déjaugé.
- L'eau liée ou adsorbée à la surface des grains des sols fins. Elle est orientée par les forces d'attraction moléculaire et les forces électrostatiques et a une viscosité nettement élevée à celle de l'eau libre. Cette eau ne s'écoule pas sous l'effet de la gravité, s'évapore à des températures supérieures à 100°C et ne transmet pas les pressions.
- L'eau capillaire qui, dans les sols non saturés en présence d'air ou d'autres gaz, est retenue dans les canaux les plus fins du sol par les forces capillaires. Cette eau s'évapore à 100°C et est disponible pour les plantes.
- L'eau libre qui circule librement dans les pores du sol sous l'effet des forces de la pesanteur. Cette eau est disponible pour les plantes et les aquifères et transmet les pressions.

La figure 1 ci-dessous montre les diverses formes de l'eau présente dans un sol. Les termes soulignés indiquent de l'eau à l'état solide (Li, 1999).

- l'eau dans le sol
  - eau de constitution
    - OH^- ou H^+ dans le feuillet
    - H_2O dans le feuillet
    - H_2O entre les plaquettes
  - eau interstitielle
    - <u>eau adsorbée</u>
    - eau non adsorbée
      - eau capillaire
      - eau libre (eau gravitaire)
    - vapeur
    - <u>glace</u>

Figure 1.1 : Les différentes formes de l'eau.

Les différents états de l'eau dans le sol cités ci-dessus dépendent de la nature minéralogique des particules et de leurs dimensions. Dans les sols fins argileux, l'eau peut se trouver dans les quatre états indiqués ci-dessus et la hauteur de la frange capillaire peut atteindre plusieurs dizaines de mètres au-dessus de la surface de la nappe.

Pour les sables il n'y a pas d'eau de constitution et en général pas d'eau liée. La frange capillaire atteint quelques centimètres de hauteur. Au-delà de la hauteur limite d'ascension capillaire, l'eau n'est plus continue dans l'espace des pores et n'intervient pas de façon autonome dans le comportement mécanique du sol.

D'une manière générale, cette eau interagit avec les particules solides et en fonction des sollicitations, elle peut conférer aux sols des comportements très différents ou engendrer des phénomènes complexes. Pour ces raisons, une présentation succincte des équations de l'écoulement de l'eau dans les sols saturés et non saturés ainsi que les notions relatives à la contrainte effective et à la succion sera donnée dans ce qui suit.

I.2. Circulation de l'eau dans les sols

I.2.1. Généralités

A l'heure actuelle, de nombreux problèmes géotechniques ou environnementaux utilisent les résultats pratiques de l'écoulement de l'eau ou de substances liquides dans les sols. Ces écoulements ne s'effectuent pas toujours dans les conditions de saturation totale. Pour cela, il est important d'introduire les notions de base de ces phénomènes avant d'aborder le chapitre des mesures in-situ. C'est ce qui sera donné dans ce qui suit.

I.2.2. La loi empirique de Darcy

En étudiant la possibilité d'alimenter la ville de Dijon en eau potable et en procédant à des expériences de filtration à travers des échantillons de sable, l'ingénieur Henry Darcy (1865) a établit sa formule de perméabilité :

$$Q = k\frac{h_A - h_B}{L}S$$

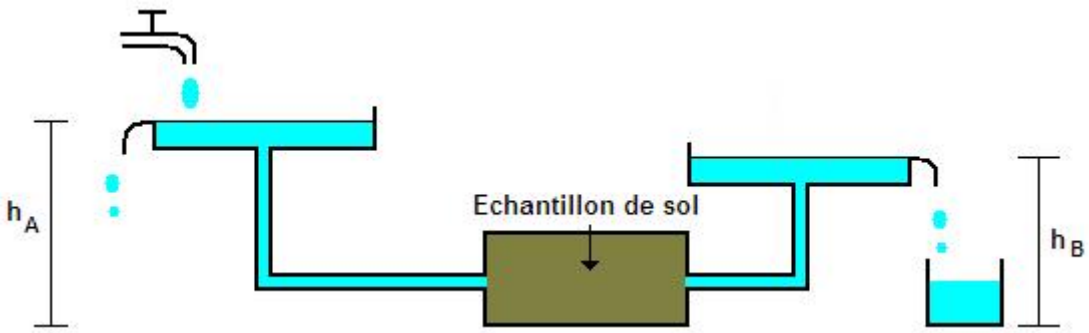


Figure 1.2 : Expérience de Darcy, perméamètre à charge constante.

Avec :

Q : Débit de l'écoulement mesuré à la sortie (L^3/T).

L : Longueur de l'échantillon (L).

S : Section de l'échantillon normale à la direction de l'écoulement (L^2).

h_A : Hauteur à partir d'un plan de référence de l'eau à l'entrée de l'échantillon (L).

h_B : Hauteur à partir d'un plan de référence de l'eau à la sortie de l'échantillon (L).

k : Constante que Darcy a nommé coefficient de perméabilité du sol (L/T).

Lors des expériences que Darcy a réalisé, les niveaux h_A et h_B ont été maintenu constant, l'écoulement s'effectuant du point A vers le point B. Le dispositif tel qu'il a été conçu correspond à ce qui est connu actuellement sous l'appellation de « perméamètre à charge constante ».

Le coefficient k définit dans la formule de Darcy n'est en fait pas une caractéristique uniquement du sol mais aussi du liquide filtrant. Des développements théoriques basés sur l'écoulement des liquides dans les tubes capillaires ont montré que le coefficient de perméabilité k s'écrit [Laghcha, 2006] :

$$k = K\frac{\rho . g}{\mu}$$

ρ et μ sont respectivement la masse volumique (kg/m^3) et la viscosité dynamique du liquide (Pa/s). K est dit « perméabilité spécifique ou intrinsèque » du sol car elle ne dépend que de la structure et de la connectivité des pores. Elle s'exprime en unité de surface (m^2). Le coefficient k est aussi connu sous la nomination de « conductivité hydraulique » du sol.

La relation ci-dessus s'écrit aussi sous la forme :

$$k = K\frac{g}{\nu}$$

Avec ν viscosité cinématique de l'eau.

Lors de la formulation de la loi de Darcy, certaines hypothèses ont été admises notamment l'homogénéité, l'isotropie du sol, la saturation totale du sol et l'incompressibilité du liquide. De même que le squelette solide est supposé indéformable (pas de diminution des vides). Pour la formule liant la conductivité hydraulique à la perméabilité intrinsèque, il faut ajouter l'hypothèse de la prédominance des forces de viscosité par rapport aux forces dynamiques.

I.2.3. Généralisation de la loi de Darcy

L'équation de base de Darcy a été établie pour un écoulement unidirectionnel. En appelant la direction de l'écoulement (x) (Voir figure 2 ci-dessous), on peut écrire :

$$\vec{v} = \frac{Q}{S} = k\frac{h_A - h_B}{L} = -k\frac{h_B - h_A}{x_B - x_A} = -k\frac{\Delta h}{\Delta x}$$

$\vec{v}$ est la vitesse de l'écoulement alors que h est la charge hydraulique. Cette dernière exprime l'énergie totale de la particule liquide exprimée par unité de poids.

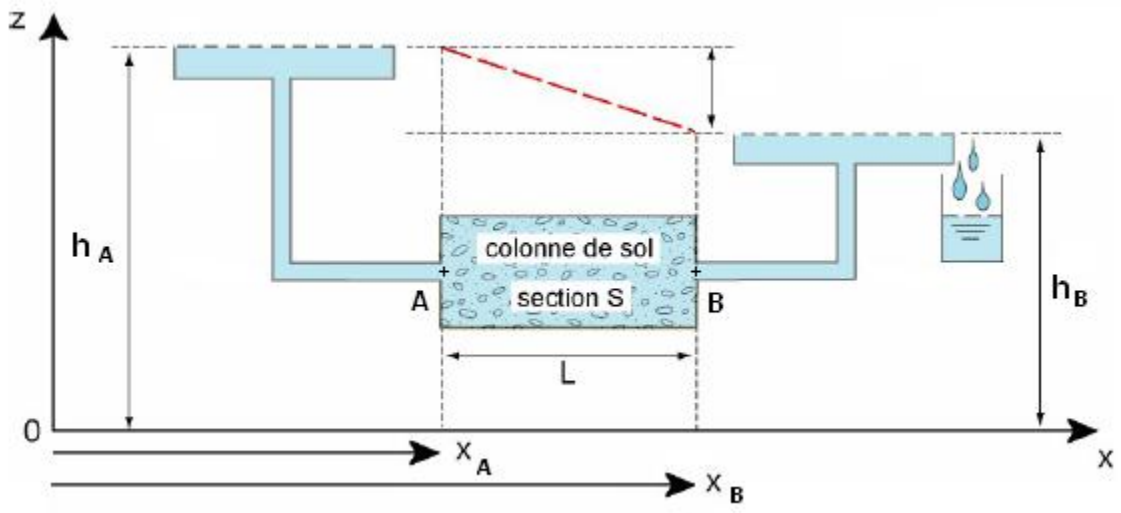


Figure 1.3 : Généralisation de la relation de Darcy.

Si la charge hydraulique ne varie plus linéairement le long de la direction de l'écoulement, il faut considérer les valeurs locales du gradient. La loi de Darcy prend donc une forme différentielle :

$$\vec{v} = -k\frac{\partial h}{\partial x}$$

Si l'écoulement n'est plus monodirectionnelle mais plutôt dans l'espace (trois dimensions), on peut écrire :

$$\overrightarrow{v_x} = -k\frac{\partial h}{\partial x}$$

$$\overrightarrow{v_y} = -k\frac{\partial h}{\partial y}$$

$$\overrightarrow{v_z} = -k\frac{\partial h}{\partial z}$$

Dans le cas général, on peut écrire :

$$\vec{v} = -k.\overrightarrow{grad}(h)$$

Si le sol n'est pas isotrope, la loi de Darcy se généralise encore sous la forme :

$$\vec{v} = -\overrightarrow{grad}(kh)$$

Le paramètre k dans la relation ci-dessus ni plus la perméabilité (ou la conductivité) telle que définie précédemment mais un tenseur de perméabilité (3x3) symétrique (06 valeurs indépendantes). Ce tenseur devient une matrice diagonale dans les axes principaux. Les valeurs de cette matrice sont les valeurs principales du tenseur de perméabilité.

Pour les sols, les axes principaux sont généralement constitués par la direction verticale et les deux directions horizontales (perpendiculaires). Pour une question liée aux modes de formations des sols (dépôt dans l'eau), la valeur de la perméabilité dans le sens vertical est beaucoup plus faible que celle dans le plan horizontale.

I.2.4. Généralisation de la loi de Darcy aux sols non saturés

Dans le cas des sols non saturés, l'espace poreux n'est pas occupé par l'air ou l'eau mais par un complexe eau-air-vapeur d'eau. Ce complexe se traduit par des interactions complexes dont le paramètre qui nous intéressera ultérieurement est la notion de succion. Mais, le paramètre qui différencie entre un état saturé et un non saturé est le degré de saturation. Ce dernier est défini par :

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

Pour un sol donné, V_v et V_w sont respectivement le volume des vides et le volume de l'eau présent dans ce volume des vides.

La détermination de ce paramètre nécessite la connaissance de la teneur en eau. Cette dernière est définie de deux manières différentes :

- Teneur en eau volumique :

$$\theta = \frac{V_w}{V_T}$$

- Teneur en eau massique :

$$\omega\ (\%) = \frac{M_w}{M_s} \times 100$$

V_T, M_w et M_s sont respectivement le volume total, la masse de l'eau et la masse des particules solides.

C'est la teneur en eau volumique qui est utilisée ci-après.

Ainsi, dans ce genre de sols, la perméabilité n'est plus une constante ou un tenseur à paramètres constants mais dépend de l'indice des vides et de la teneur en eau volumique □.

La perméabilité diminue fortement lorsque la saturation diminue (Voir figure 3 donnée ci-après).

Si l'écoulement est transitoire, la perméabilité et la charge hydraulique qui dépendent de la teneur en eau vont se trouver aussi dépendant du temps. Ainsi, la loi de Darcy généralisée aux sols non saturés peut s'écrire :

$$\vec{v} = -k(\theta).\overrightarrow{grad}[h(\theta)]$$

Pour décrire correctement la variation de l'écoulement de l'eau dans un sol non saturé, il faut se donner l'équation de continuité (équation de conservation de la masse du liquide filtrant).

Cette dernière s'écrit :

$$div(\rho_w \vec{v}) + \frac{\partial(\rho_w \theta)}{\partial t} = 0$$

ou plus simplement :

$$div(\vec{v}) + \frac{\partial(\theta)}{\partial t} = 0$$

si ρ_w est indépendante du temps et de l'espace (constante).

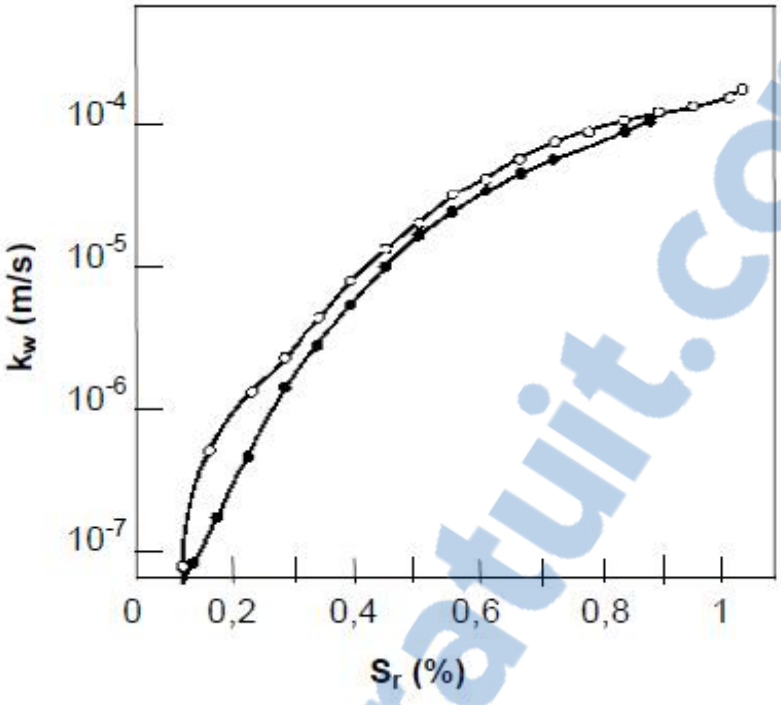


Figure 1.4 : Variation de la perméabilité en fonction de la saturation (Top et Miller, 1966, cité par Bakkari, 2007).

En combinant l'équation de Darcy généralisée et l'équation de continuité, l'équation de transfert d'eau dans les sols non saturés s'écrit :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = div\{k(\theta).\overrightarrow{grad}[h(\theta)]\}$$

En introduisant la notion de capacité capillaire $c(h)$ définit par :

$$c(h) = \frac{dh}{d\theta}$$

L'équation de transfert s'écrit :

$$c(h)\frac{\partial h}{\partial t} = div\{k(h).\overrightarrow{grad}[h]\}$$

La relation ci-dessus est une forme de l'équation de Richards.

En introduisant la notion de diffusivité capillaire $D(\theta)$ définit par :

$$D(\theta) = \frac{k(\theta)}{c(\theta)}$$

L'équation de transfert s'écrit :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = div\{k(h).\overrightarrow{grad}[h] - k(h)\}$$

La relation ci-dessus est une autre forme de l'équation de Richards.

Les deux formes de l'équation de Richards sont fortement non linéaires. Ils existent dans la littérature des solutions analytiques ou semi-analytiques pour des configurations et des conditions aux limites très simples (Soria-Ugalde, 2003). Dans les configurations complexes, le calcul numérique reste le seul recours (Diaw, 1999).

I.3. Les contraintes dans les sols

I.3.1. Contraintes dans les sols saturés -Approche de Terzaghi

Le concept de contrainte effective a été introduit par Terzaghi (1923) pour décrire le comportement mécanique des sols saturés sous l'effet conjugué des variations des contraintes totales et des pressions d'eau.

Les contraintes effectives sont définies comme suit :

$$\sigma' = \sigma - u.I$$

σ' représente les contraintes effectives, σ les contraintes totales et u la pression de l'eau (pression interstitielle). I est le tenseur unité.

Le postulat tel qu'il a été formulé par Terzaghi stipule que seules les variations des contraintes effectives gouvernent le comportement des sols saturés. Ce principe est maintenant adopté et utilisé par la communauté scientifique.

I.3.2. Contraintes dans les sols non saturés

I.3.2.1. Relation de Bishop

Pour les sols non saturés, les recherches ont été initialement dirigées vers l'application du concept des contraintes effectives en introduisant la succion dans l'expression de la contrainte effective. L'équation de Bishop (1959) représente l'effet de la succion par un paramètre χ qui dépend du degré de saturation du sol :

$$\sigma' = \sigma - u_a.I + \chi(u_a - u_w).I$$

χ est un coefficient empirique variant entre zéro (0) et un (1). Il est égal à zéro (0) pour un sol sec et est égal à un (1) pour un sol saturé.

u_a et u_w sont respectivement la pression de l'air et la pression de l'eau.

La relation ci-dessus est de formulation très pratique mais des études ultérieures ont montré qu'elle ne convient pas à tous les types de sols et que χ ne dépend pas uniquement du degré de saturation. De nombreuses formulations sont proposées dans la littérature mais leurs applications restent très difficiles notamment quand il s'agira de déterminer les différents paramètres que contiennent ces relations (Bakkari, 2007).

I.3.2.2. Succion dans les sols

Dans les sous-paragraphes précédents, il est clairement mentionné qu'entre les sols saturés et les sols non saturés, il y'a la notion de succion qui est introduite. La définition de cette notion est complexe, on peut estimer que ce sont les forces de capillarité entre les grains et la tension superficielle du film d'eau autour des gains qui déterminent un potentiel de matrice et qui tend à retenir l'eau. La tension de succion du sol peut être exprimée en unités de pression ou en hauteur d'eau. Elle diminue quand la saturation augmente et s'annule quand le sol est totalement saturé (Voir la courbe 4 ci-dessous).

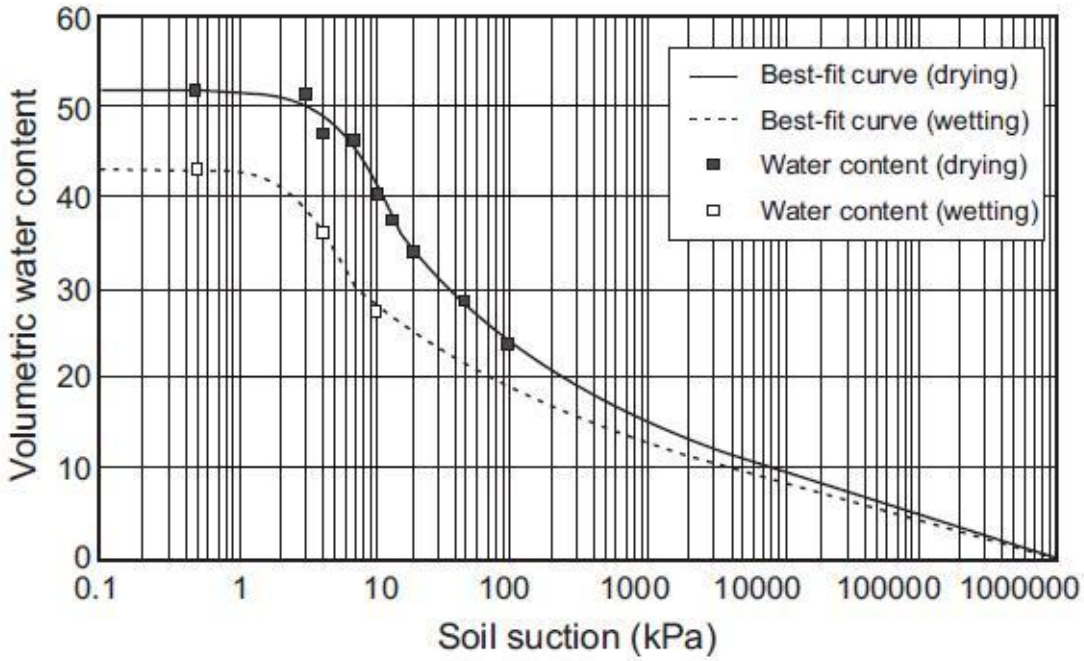


Figure 1.5 : Variation de la succion en fonction de la teneur en eau volumique (Fredlund, 1994).

Pour des raisons pratiques, deux contributions sont considérées : la succion matricielle et la succion osmotique.

- **La succion matricielle :**

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Généralement, c'est la différence entre la pression de l'air et la pression de l'eau. C'est ce qu'on désigne par la pression capillaire. Cette dernière est le paramètre déterminant des mouvements de l'eau dans les sols. A l'échelle d'un pore, cette différence de pression se traduit par l'existence d'un ménisque entre l'air et l'eau. Elle est caractérisée par la loi de Jurin. En plus de l'affinité de l'eau avec le sol, c'est le rayon des pores qui est déterminant. C'est ce qui explique la différence de hauteurs des remontées capillaires dans les sols. Actuellement, en mécanique des sols, la succion ou la pression capillaire sont considérées comme équivalentes.

- **La succion osmotique :**

La succion osmotique ou pression osmotique est la capacité de rétention d'eau par les sels présents sous forme dissoute dans l'eau interstitielle. Elle existe lorsque l'eau est une solution saline. Si la concentration de sel est faible, cette composante peut être négligée et la succion totale se réduit à la succion matricielle.

I.4. Conclusion

Ce chapitre, qui est un chapitre introductif, est consacré à la présentation de quelques notions de bases de la circulation de l'eau dans les sols ainsi que les notions de contraintes dans les sols saturés et les sols non saturés. L'objectif principal de ce chapitre est de présenter les paramètres qui feront l'objet des mesures in-situ dans le chapitre. Ainsi, les paramètres à mesurer expérimentalement in-situ sont fondamentaux pour toute modélisation du comportement ou de transfert d'eau dans des sols non saturés.

Chapitre 2
Les techniques de mesure de la perméabilité, de la teneur en eau et de la succion

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, on donne un aperçu sur les techniques de mesure au laboratoire et in situ de la teneur en eau, de la succion et de la perméabilité. Ces paramètres sont généralement mesurés pour différents états de matériaux : matériaux cohérents, matériaux consolidés et moins perméable et matériaux très peu perméable. On tentera à la fin du chapitre une comparaison entre les techniques de mesure au laboratoire et celles utilisées in situ.

II.2. Les techniques de mesure de la perméabilité

La perméabilité sert à mesurer la vitesse de circulation d'un fluide à travers les pores d'un solide. Si le sol possède une forte perméabilité, il absorbera plus facilement l'eau de pluie. Dans le cas contraire, l'eau de pluie aura tendance à ruisseler ou s'accumuler en surface. Pour mesurer ce paramètre, il existe plusieurs techniques. Le choix d'une technique de mesure par rapport à une autre dépend du problème posé. La perméabilité est un paramètre qui a de l'importance dans de nombreux problèmes comme :

- La gestion des réservoirs pétroliers, la gestion des aquifères
- La gestion des sites de stockage des déchets et les risques de pollution des sols et des nappes, etc.
- Le problème des infiltrations sous les barrages, etc.

II.2.1. Les techniques de mesure de la perméabilité au laboratoire

Les techniques de mesure de la perméabilité au laboratoire varient suivant la nature des matériaux.

II.2.1.1. Cas de matériaux perméables

Pour les sols perméables, la perméabilité se mesure à l'aide du perméamètre à charge constante. Le schéma du dispositif est indiqué sur la figure 1.2 du chapitre 1. Les charges à l'amont et à l'aval de l'échantillon sont maintenues constantes à l'aide de « trop plein ». Le principe consiste à mesurer le débit traversant l'échantillon de sol pendant une certaine durée t.

La perméabilité est donnée par la formule suivante :

$$k = \frac{Q\ L}{\Delta h\ S\ t}$$

Dans la formule précédente, Q, L, Δh, S et t sont respectivement le débit mesuré, la longueur de l'échantillon (dans le sens de l'écoulement), la différence de la charge hydraulique entre l'amont et l'aval de l'échantillon, la section (transversale à l'écoulement) de l'échantillon et la durée de l'essai.

II.2.1.2. Cas de matériaux relativement imperméables

Dans le cas des sols consolidés, fins ou relativement imperméables, la mesure s'effectue au moyen du dispositif dit « Perméamètre à charge variable ». Ce système consiste à provoquer un écoulement d'eau sous l'effet d'une charge hydraulique variable dans le temps.

Le schéma du dispositif est donné sur la figure suivante.

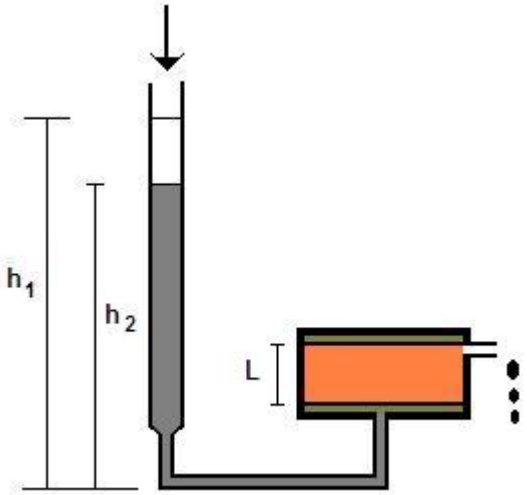


Figure 2.1 : Schéma du perméamètre à charge variable.

La formule établie par intégration est donnée ci-dessous :

$$k = \frac{s}{S}\frac{L}{t}\ln\frac{h_1}{h_2}$$

Dans cette formule, s, S, L et t sont respectivement la section du tube alimentant l'échantillon, la section de l'échantillon, la longueur de l'échantillon, le temps nécessaire pour que le niveau de l'eau dans le tube descende de h_1 à h_2. Les hauteurs h_1 à h_2 sont ceux de l'eau dans le tube entre le début et la fin de la mesure.

II.2.2. Les techniques de mesure in situ de la perméabilité :

II.2.2.1. Généralités

Il existe plusieurs techniques et méthodes qui permettent d'obtenir in situ la perméabilité. On décrira brièvement ci-dessous l'essai de pompage de Dupuit et l'essai d'injection en puits.

II.2.2.2. L'essai de pompage de Dupuis

Cet essai est utilisé essentiellement pour étudier le rabattement des nappes ou pour évaluer les capacités des aquifères. Il permet aussi d'évaluer in situ la perméabilité. Le principe consiste à creuser un puits et à installer des piézomètres au alentour. Un essai de pompage est effectué à débit constant. Une fois le régime permanent établi, la perméabilité est donnée par :

$$k = Q\frac{ln\left[\frac{r_2}{r_1}\right]}{2\pi e(h_2 - h_1)}$$

Dans la relation précédente, Q, r_2, r_1, h_2 et h_1 représentent respectivement le débit pompé une fois le régime permanent établi, les distances des piézomètres par rapport à l'axe du puits de pompage, les niveaux de l'eau dans les piézomètres (Voir figure 2.3 ci-dessous).

Il faut noter que cet essai est relativement coûteux, il est donc d'utilisation limité.

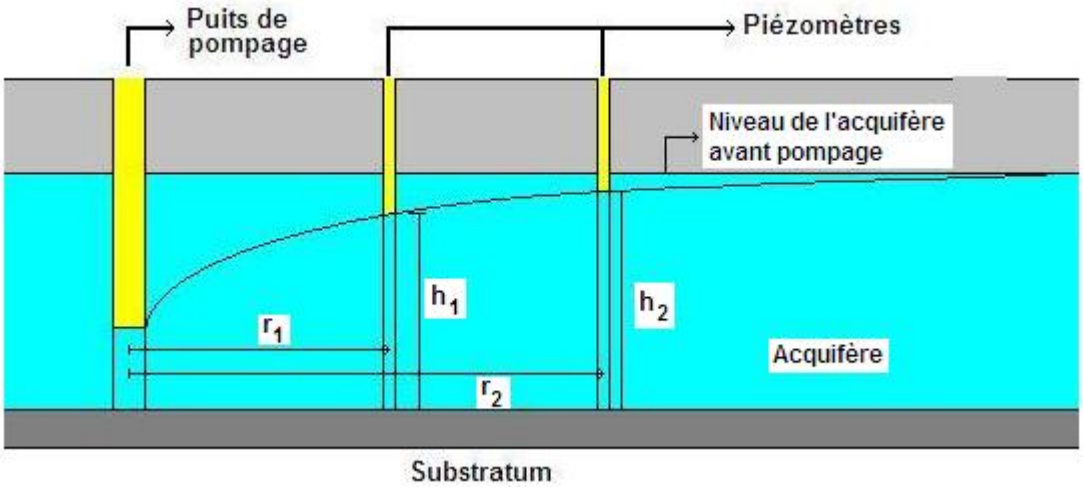


Figure 2.2 : Configuration de l'essai de pompage de Dupuis.

II.2.2.3. L'essai d'injection

L'essai d'injection en puits est beaucoup moins couteux et plus facile de réalisation que l'essai précédent. Il est utilisé de préférence pour évaluer la perméabilité des sols perméables. Il donne une évaluation locale de la perméabilité.

Une section du puits est rendue étanche grâce à la mise en place de " bouchons " gonflables. Les packers obturent le puits à deux profondeurs différentes définissant la zone d'injection de longueur L et de rayon R (Voir figure 2.3 ci-dessous).

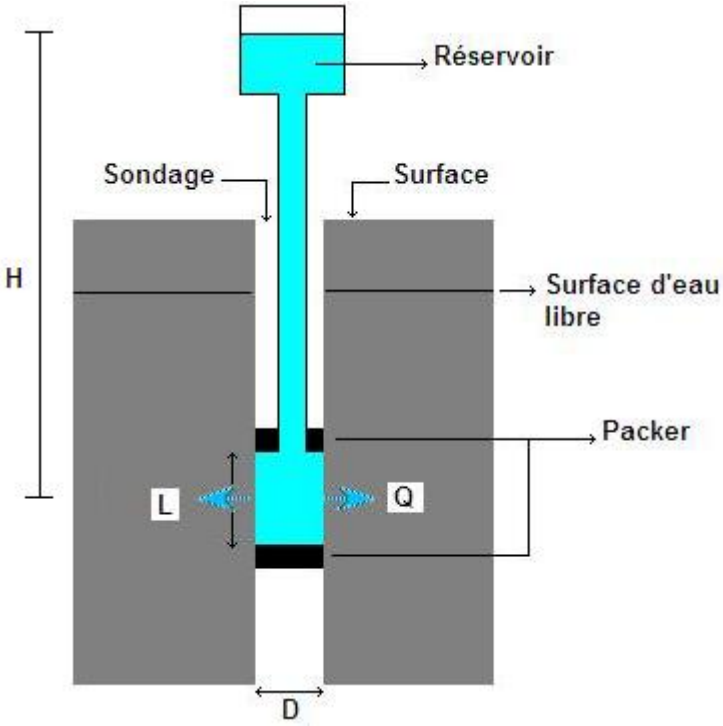


Figure 2.3 : Essai d'injection en puits.

Un débit Q est injecté sous pression entre les deux packers. Le centre du dispositif se situe à une distance H de la surface du réservoir d'injection.

La perméabilité est donnée pour ce genre d'essais par :

$$K = \frac{Q.\ln\left(\frac{2L}{D}\right)}{2\pi LH}$$

Les différents paramètres contenus dans la formule ci-dessus sont expliqués sur la figure 2.3. L'essai Lefranc est une version de cet essai.

II.2.2.4. Comparaison et conclusion

Pour un même matériau, la gamme de variation de la perméabilité mesurée au laboratoire est large et dépend de nombreux facteurs dont les dimensions de l'échantillon, la forme et les tailles des particules, la connectivité de l'espace poreux, etc. En plus de tous ces facteurs, le problème de la représentativité et la non-altération de l'échantillon lors du prélèvement et du transport reste un des facteurs majeurs qui affecte les mesures de laboratoire.

En géotechnique, les mesures in situ sont généralement préférées aux mesures de laboratoire. Ceci doit être nuancé pour la perméabilité, car ces dernières techniques introduisent certains facteurs d'incertitudes comme les fissures, les fracturations, le colmatage pour les techniques de pompage, etc. D'ailleurs, il est plus ou moins admis que pour un même sol, la perméabilité mesurée in situ est généralement supérieure à celle obtenue au laboratoire.

II.3. Les techniques de mesure de la teneur en eau des sols

L'influence de la teneur en eau sur le comportement des sols n'est plus sujet à débat. En effet, l'eau joue un rôle capital lors du compactage des sols pour atteindre l'Optimum Proctor. De même, les sols fins voient leurs caractéristiques complètement modifiées quand la teneur en eau augmente. Ils passent de l'état solide à l'état liquide en passant par l'état plastique. Un autre phénomène lié à la variation de la teneur en eau des sols fins est le gonflement qui peut être la cause de nombreux sinistres. C'est pourquoi la mesure de la teneur en eau des sols est d'une importance capitale en géotechnique.

Dans ce qui suit, nous allons présenter brièvement les techniques de mesures de la teneur en eau au laboratoire et in situ.

II.3.1. Les techniques de mesure de la teneur en eau au laboratoire

II.3.1.1. Détermination de la teneur en eau pondérale

Dans cette méthode, la teneur en eau est déterminée par une double pesée : on pèse l'échantillon humide puis sec. Le séchage s'effectue en plaçant l'échantillon humide dans une étude à 105 °C pour les sols insensibles à la chaleur et 50°C pour les sols sensibles à la chaleur. Les pesées sont effectuées à des intervalles de 4h pour les échantillons séchés à 105°C et à des intervalles de 8h pour les échantillons séchés à 50°C. On estime que toute l'eau gravitaire se serait évaporée si deux pesées successives sont identiques à 2/1000 près.

Cette teneur en eau, dite pondérale, est donnée par :

$$\omega(\%) = \frac{M_w}{M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$

M_w, M_h et M_s sont respectivement la masse de l'eau, la masse de l'échantillon humide et la masse de l'échantillon sec.

Pour la prise d'échantillons, la mesure de la teneur en eau par la méthode gravimétrique n'exige pas d'échantillons non remaniés. Par contre, il faut que l'échantillon soit représentatif du site objet des reconnaissances. Il faut aussi assurer lors du transport une l'étanchéité maximale pour ne pas permettre l'humidification ou la dessiccation de l'échantillon en cours de route.

Lors de la phase préliminaire de l'étude, la prise d'échantillons peut s'effectuer à l'aide de la pelle manuelle ou mécanique ou à l'aide des tarières manuelles (Photo 2.3 ci-dessous). Ce dernier instrument se présente sous la forme d'une tige métallique dotée d'une vrille pour creuser et d'une tête en croix.

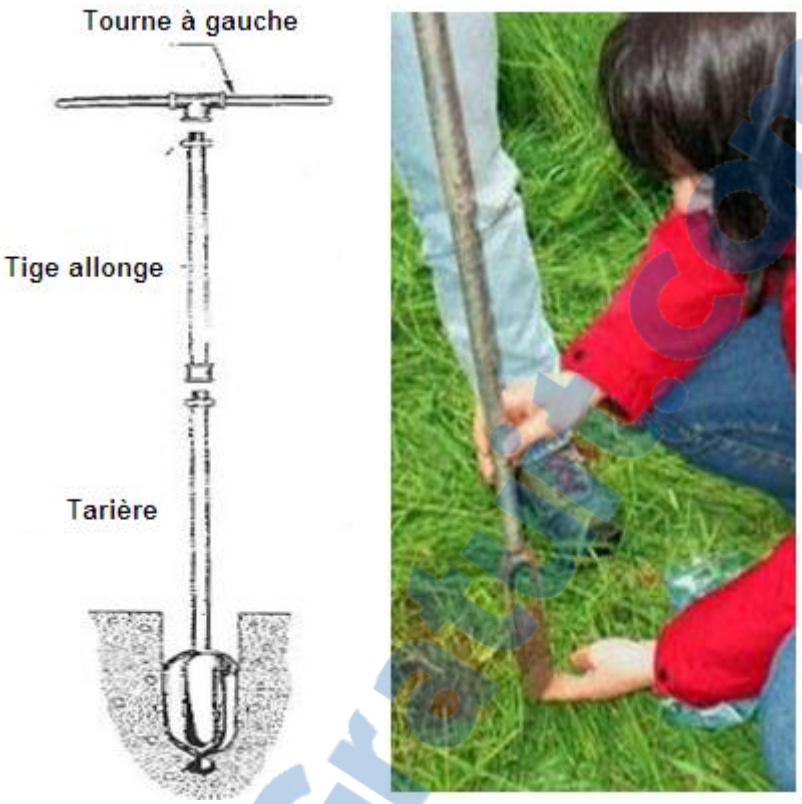


Photo 2.4 : Tarière manuelle pour prise d'échantillon.

Bien sûr, lors de la phase confirmation, les échantillons sont extraits à l'aide de carotteuses. Ces dernières permettent la prise d'échantillons non remaniés en profondeur.

II.3.1.2. Détermination de la teneur en eau volumique

La teneur en eau volumique est définie par :

$$\theta = \frac{V_w}{V_T}$$

ou V_w est le volume de l'eau contenu dans l'échantillon alors que V_T est le volume total de l'échantillon.

La teneur en eau volumétrique est liée à la teneur en eau pondérale par la relation :

$$\theta = \omega \frac{\rho_a}{\rho_w} = \omega \times d_a$$

$\square_a$ et $\square_w$ représente respectivement la masse volumique de l'eau et la masse volumique apparente du sol. Le rapport de ces grandeurs fourni la densité apparente de l'échantillon.

La détermination du paramètre $\square$ nécessite la mesure de la masse totale de l'échantillon du sol ainsi que de son volume. Pour déterminer la masse volumique apparente de

l'échantillon, on peut utiliser indifféremment la méthode de la pesée hydrostatique ou la méthode du cylindre (Photo 2.4 ci-dessous). C'est cette dernière technique qui sera utilisée dans ce travail. Les cylindres utilisés sont en acier, de 5 cm de hauteur pour 8 cm de diamètre, soit un volume de 250 cm^3.

Photo 2.5 : Cylindre pour la détermination de la masse volumique apparente d'un sol.

II.3.2. Les techniques de mesure de la teneur en eau in situ

II.3.2.1. Les sondes TDR

Cette méthode se base sur la mesure du temps de propagation d'ondes électromagnétiques émises à partir d'un générateur. Ces ondes sont guidées à l'aide de tiges (Photo 2.5) qu'on enfonce dans le sol. Le temps de réponse dépend de la constante diélectrique du milieu, elle-même fortement liée à l'humidité du sol. Utilisée à l'origine pour tester des câbles de circuit électrique, la méthode TDR (Times Detection Reflectory) s'est développée rapidement à partir des années 1980 car elle est d'un emploi relativement simple et permet une mesure de l'humidité volumique avec une précision inférieure à plus ou moins 2% (Whalley, 1993). Elle présente aussi une bonne résolution spatiale et temporelle et sa calibration est rapide.

Photo 2.6 : Les sondes TDR.

Parmi les sondes disponibles sur le marché, les géométries bi-tiges et tri-tiges sont d'usage courant, mais leur mise en place pour le suivi des profils hydriques suppose généralement l'ouverture d'une fosse, ce qui perturbe assez fortement le milieu.

La nécessité de suivre les profils d'humidité a poussé les chercheurs à développer une nouvelle génération de sondes : Les sondes « Tube Trime ». Ce type de sondes sont analogues aux sondes TDR décrites précédemment mais pour lesquelles l'électronique a été développée (l'instrument de mesure est intégré à la sonde, facilité de mise en réseau, etc.) et auxquelles un capteur de températures à été intégré.

La sonde tube se compose d'un corps cylindrique en PVC muni de part et d'autre de deux plaques en aluminium servant de guide d'ondes. La figure 2.5 suivante donne un schéma de fonctionnement de ce type de sonde ainsi que le volume concerné par la mesure.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

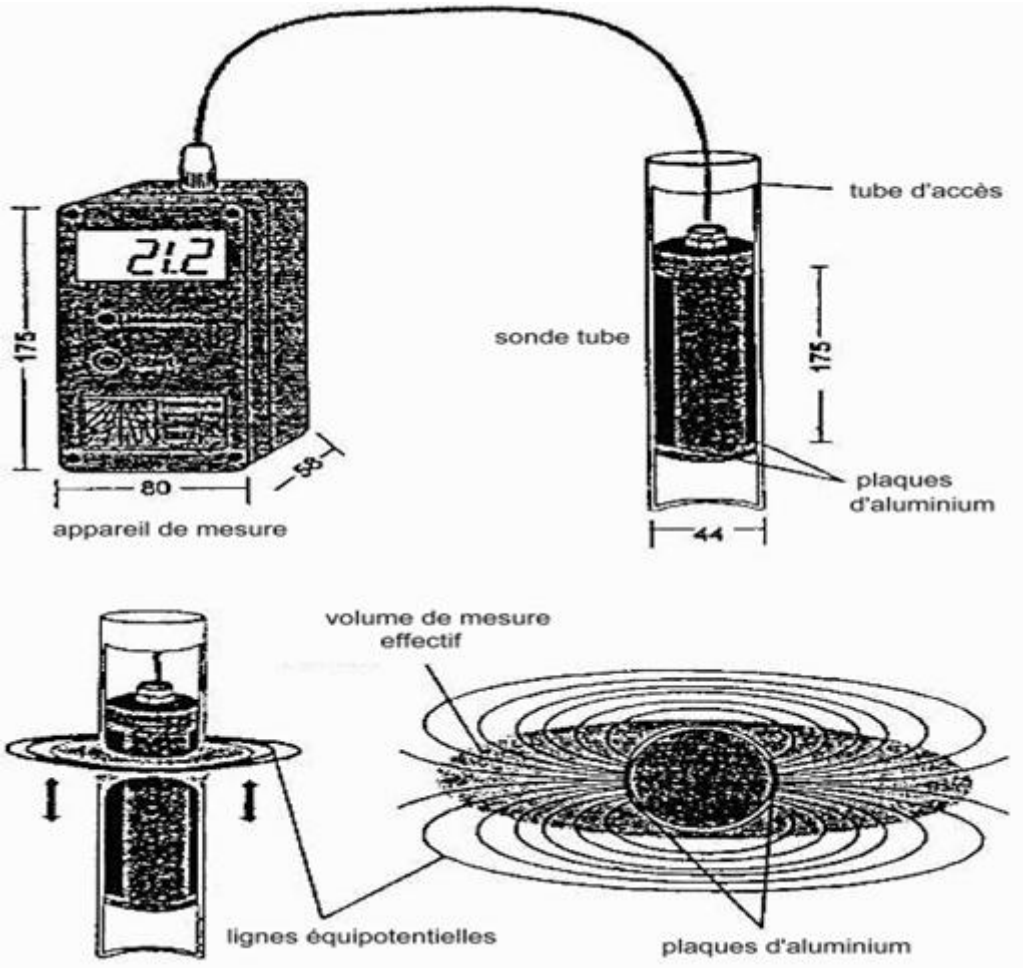


Figure 2.7 : Sonde tube TRIME et son volume de mesure (doc. fabriquant, IMKO).

II.3.2.2. Les sondes à neutrons

Les humidimètres à neutrons (ou sondes à neutrons) mesurent l'humidité volumique du sol en utilisant la propriété qu'ont les neutrons rapides à être ralentis préférentiellement par les atomes d'hydrogène, qui dans le sol sont majoritairement inclus dans les molécules d'eau.

La mesure s'effectue au moyen d'un tube en alliage d'aluminium enfoncé verticalement dans le sol où il est laissé en permanence.

Un bon contact entre la terre et le tube est là encore une condition essentielle à la précision de la mesure. La source de neutrons rapides (Radium-Béryllium ou Américium-Béryllium) est amenée à la profondeur désirée, accompagnée du détecteur de neutrons lents. Si on place une source de neutrons rapides, ces derniers seront d'autant plus ralentis que le sol est humide. Ce genre d'appareil utilisant des sources radioactives doit être utilisé avec précaution.

Les figures 2.5 et 2.6 ainsi que la photo 2.4 donnent une description schématique de ce type de sondes.

Figure 2.8 : Sonde neutronique employée sur le terrain.

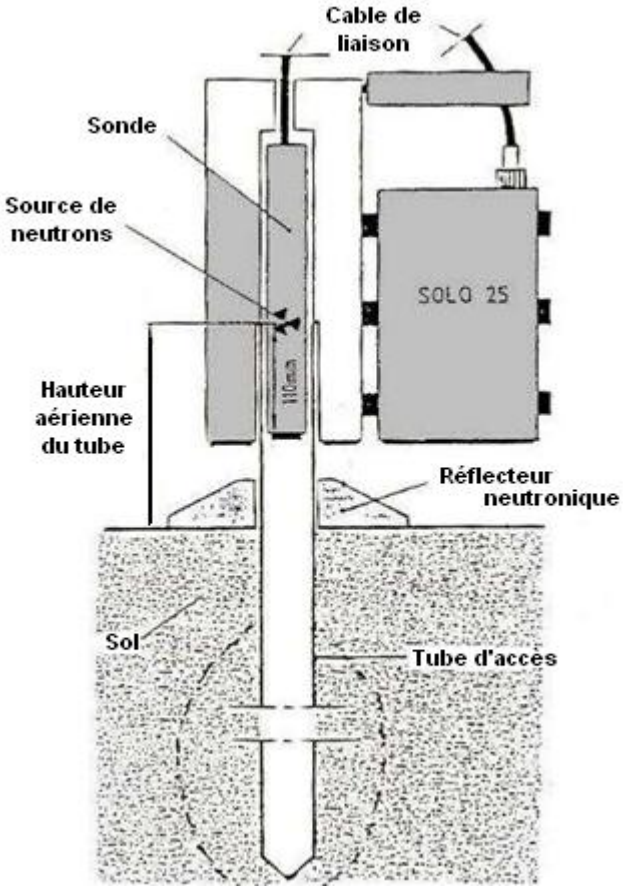


Figure 2.9 : Sonde neutronique Nardeux solo 25.

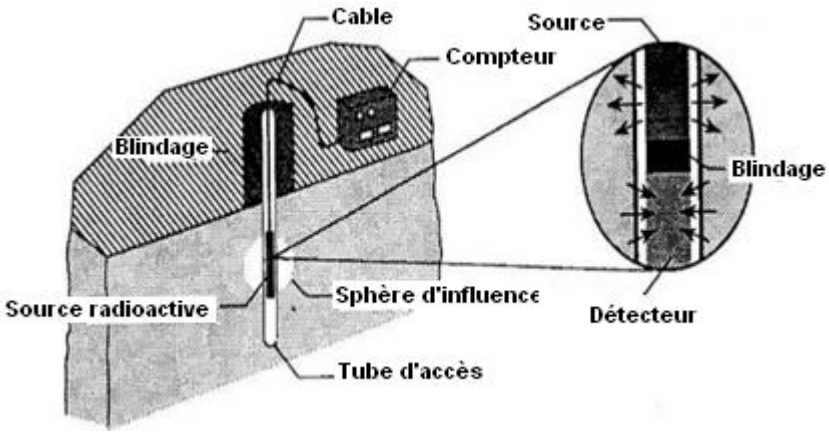


Figure 2.10 : Sonde neutronique.

II.3.3. Comparaison et conclusion

Les techniques de mesure de la teneur en eau au laboratoire sont des mesures directes et ne demandes pas d'appareils complexes. Par contre, elles ne reflètent pas totalement la réalité à cause du problème de discontinuité causé par l'extraction et le transport des échantillons. Ils sont plus longs et exigent des soins à apporter aux échantillons pour les rendre hermétiques.

Les techniques de mesures in situ sont des mesures indirectes, elles donnent la teneur en eau par analogie après calibrage et les résultats sont obtenus rapidement. Les teneurs en eau obtenues par ces techniques concernent les volumes restreints au voisinage de l'appareillage.

II.4. Les techniques de mesure de la succion

II.4.1. Les techniques de mesure de la succion au laboratoire

Pour des valeurs de succion inférieure à 100 kPa, on peut utiliser le tensiomètre à eau (Figure 2.7 ci-dessous). Il est constitué d'un réservoir d'eau séparé par une pierre poreuse semi-perméable (plaque en céramique, laissant passer l'eau et pas l'air) en contact avec le sol. L'eau du réservoir se met en équilibre avec la phase liquide du sol par transfert à travers la pierre poreuse. Un capteur de pression permet de mesurer la pression de l'eau à l'intérieur du réservoir.

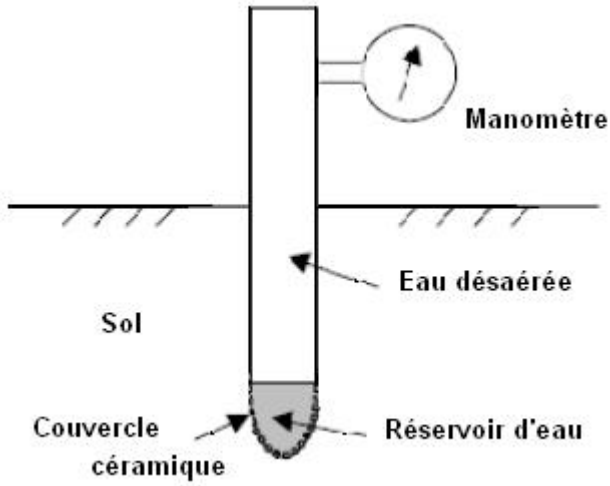


Figure 2.11 : Schéma du tensiomètre à eau.

Une autre technique dite méthode psychrométrique peut être utilisée pour mesurer la succion. Ces instruments (Figure ci-dessous) sont munis de deux thermomètres (ou capteurs de température) : Le premier mesure la température de l'air ambiant et le second, constamment mouillé à l'aide d'une couche de mousseline, mesure la température de l'eau qui s'évapore. La différence de température est reliée à l'humidité relative et celle-ci est reliée à

la succion totale par la loi de Kelvin. Cette méthode est très délicate mais reste fiable pour les succions comprises entre 300kPa et 8 MPa avec une plus grande imprécision aux faibles succions du fait d'une plus forte dépendance des variations de température dans cet intervalle. Pour la même raison, les psychromètres ne sont pas très recommandés pour la mesure de la succion totale in situ.

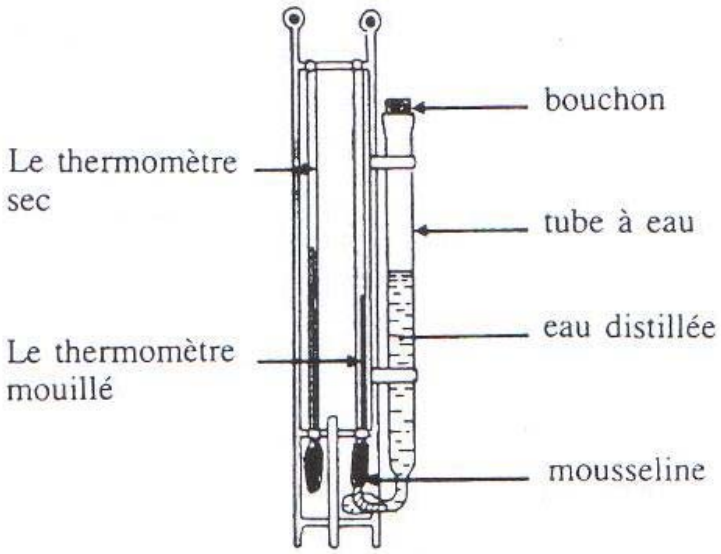


Figure 2.12 : Schéma d'un psychromètre.

Une troisième méthode très simple, dite méthode du papier filtre, peut être utilisée pour mesurer soit la succion totale (Energie pour déplacer la molécule d'eau par évaporation) soit la succion matricielle (Energie pour déplacer la molécule d'eau sous forme liquide). La succion matricielle est mesurée en incorporant des papiers filtre entre des parties d'un échantillon de sol. Le principe repose sur le fait qu'à l'équilibre hydrique, le potentiel de l'eau de l'échantillon de sol (ou succion matricielle) et le potentiel matriciel de l'eau du papier filtre sont les mêmes. Cette méthode permet de balayer une large gamme de succion allant de 10^3 Pa à 10^6 Pa. La succion totale (Energie pour déplacer la molécule d'eau par évaporation) est mesurée quand le papier filtre n'est pas en contact avec le sol. Dans les deux cas, il faut utiliser la courbe d'étalonnage approprié du papier filtre pour chaque cas.

II.4.2. Les techniques de mesure de la succion In situ

Pour mesurer la succion des sols in situ, on utilise généralement le tensiomètre qui permet de mesurer la charge hydraulique du sol. Il est constitué d'une bougie en céramique poreuse fixée à l'extrémité d'un tube et enfoncée dans le sol à la profondeur souhaitée. Le tube ainsi que la bougie sont remplis d'eau désaérée et l'ensemble est hermétiquement fermé par un

bouchon et relié par un capillaire à un manomètre de mercure. Le système ainsi mis en place autorise des échanges osmotiques à travers la paroi poreuse. Une certaine quantité d'eau sort du tensiomètre jusqu'à ce que la dépression équilibrée par la colonne de mercure soit égale au potentiel de l'eau dans le sol.

II.4.3. Comparaison et conclusion

La mesure de la succion dans les sols s'appuient sur diverses techniques plus ou moins directes et sont de façon générale assez délicates, ce qui explique un certain retard dans l'acquisition des résultats expérimentaux relatifs aux sols non saturés, tant sur les aspects concernant le transfert de fluides (eau et air), que le comportement mécanique.

Si les techniques de contrôle de la succion, qui proviennent de la science du sol, sont bien maîtrisées et disponibles dans un nombre croissant de laboratoires, les techniques de mesure de succion font encore l'objet de recherches. L'extension récente de la tensiométrie à des valeurs de succion aussi élevées que 1,5 MPa constitue, à cet égard, un acquis important, qui mérite d'être consolidé en améliorant la fiabilité et la facilité de la mesure. La méthode du papier-filtre, plus ancienne, est d'un abord plus aisé et connaît un développement manifeste. Il est vrai qu'elle pourrait être davantage utilisée dans la pratique, sur des prélèvements de sols intacts, et donner d'intéressantes informations complémentaires, en particulier sur les problèmes de gonflement-rétraction de fondations, ou sur l'état initial d'un massif compacté d'ouvrage en terre ou de barrière de confinement.

II.5. Conclusion

Ce chapitre a été réservé à une brève revue des techniques de mesure de la perméabilité, de la teneur en eau et de la succion dans le sol non saturé. On aura noté que les techniques de mesure de la perméabilité varient selon les différents types de sols. Les techniques adaptées pour les matériaux cohérents ne le sont pas pour les matériaux pulvérulents. Les techniques in situ sont adaptées pour les sols plus ou moins perméables car les mesures sont effectuées pour le court terme. Pour les techniques de laboratoire, il y'a surtout le problème de prélèvement et de représentativité des échantillons.

Les techniques de mesure de la succion font encore l'objet de recherches. L'extension récente de la tensiomètrie à des valeurs de succion aussi élevées que 1,5 MPa constitue, à cet égard, un acquis important, qui mérite d'être consolidé en améliorant la fiabilité et la facilité de la mesure.

Chapitre 3

Campagne de mesure de la perméabilité, de la teneur en eau et de la succion in situ

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente les différents appareils utilisés dans ce travail ainsi que la méthodologie suivie pour la mesure de la succion, de la perméabilité et de la teneur en eau. Le mode opératoire de chaque appareil sera aussi détaillé.

Avant de commencer les mesures, il a fallu choisir un site qui répond aux conditions suivantes :

1- Etre un site naturel
2- Etre un site qui facilite l'implantation des appareillages de mesure.
3- Etre un site en plein air.

Le site expérimental de l'école polytechnique des ingénieurs de Lille à Villeneuve d'Ascq présente toutes les conditions favorables pour mener à bien cette étude.

III.2. Présentation du site de l'étude

Sur le site en question sont placés 20 piézomètres répartis suivant un maillage carré de cinq mètres de coté (Figue 3.1). Ces piézomètres seront repérés à l'aide des lettres indiquant les lignes (A, B, C, D et E) et les rangées (de 1 à 5). Autour de chaque piézomètre, qui servira pour la mesure de la teneur en eau, seront placés cinq tensiomètres enfoncés à différentes profondeurs pour la mesure de la succion. Un trou de 38 cm sera creusé au niveau des tensiomètres pour les mesures de la perméabilité.

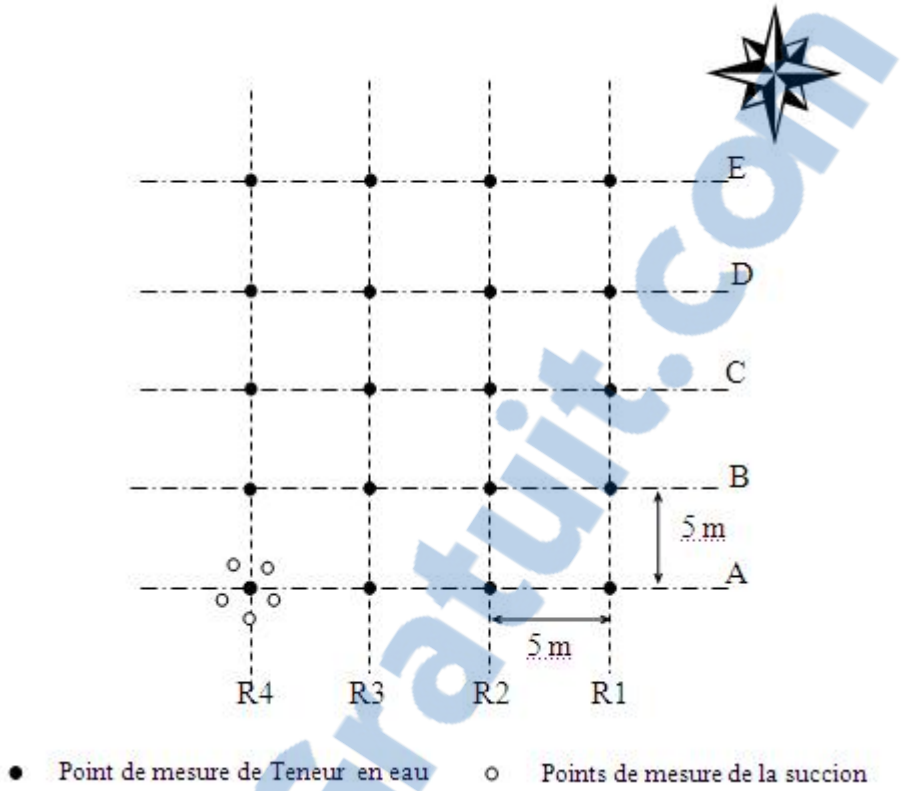


Figure 3.1 : Position des piézomètres de mesure au niveau du site expérimental de l'EPUL.

III.3. Mesure de la teneur en eau

Pour la mesure de la teneur en eau, l'appareillage utilisé est une sonde de profil PR1 de Delta-TDevices. C'est une sonde de type TDR (décrite dans le chapitre 2) qui mesure la teneur en eau du sol à différentes profondeurs sur la même verticale sur des profondeurs allant de 50 cm à 1m. Cette sonde peut mémoriser jusqu'à 1000 mesures.

III.3.1. Dispositif de mesure

Le corps de la sonde (Photos 3.1 et 3.2) est un cylindre constitué d'un matériau composite, de 25 mm de diamètre environ et équipé de capteurs électroniques (en forme de paires d'anneaux en acier inox). Chaque paire est fixée à une profondeur verticale donnée le long de la sonde.

Rapport-Gratuit.com

Photo 3.2 : La sonde PR1 de Delta-TDevices.

Photo 3.3 : Manipulation de la sonde PR1 de Delta-TDevices.

La sonde doit être utilisée avec un tube d'accès en fibre de verre à paroi mince. Ce tube très fin permet de minimiser la perturbation du sol et de maximiser la pénétration du champ électromagnétique dans le sol.

Le signal de sortie de chaque capteur est une tension continue. Les tables d'étalonnage fournies avec l'appareillage permettent de convertir ces tensions en valeur de teneur en eau volumique. Cette sonde est jugée robuste, à utilisation sans risque et d'installation facile. Sa précision est de l'ordre de ±3%. Elle possède un volume d'échantillonnage à chaque profondeur d'environ 1,5 litre, une sortie tension entre 0 et 2 Volts qui permet une lecture sur boitier (Type HH2 par exemple) ou une connexion aisée sur la plupart des centrales d'acquisition. La sonde peut également être étalonnée dans des sols spécifiques.

Lorsque la sonde PR1 est alimentée, elle génère un signal de 100 MHz (similaire à une radio), le signal est appliqué aux paires d'anneaux en acier inox. Il génère ainsi un champ électromagnétique au travers du sol sur environ 100 mm de rayon autour de la sonde. Ce champ électromagnétique passe facilement au travers du tube d'accès mais beaucoup moins facilement au travers des poches d'air.

Si les propriétés diélectriques du sol sont différentes de celles de l'appareillage de la sonde, une partie du signal de 100 MHz est réfléchi. Cette partie réfléchie se combine avec le signal émis pour former une onde entretenue et la tension (l'amplitude) de cette onde agit comme un indicateur de la teneur en eau du milieu (figure 3.2).

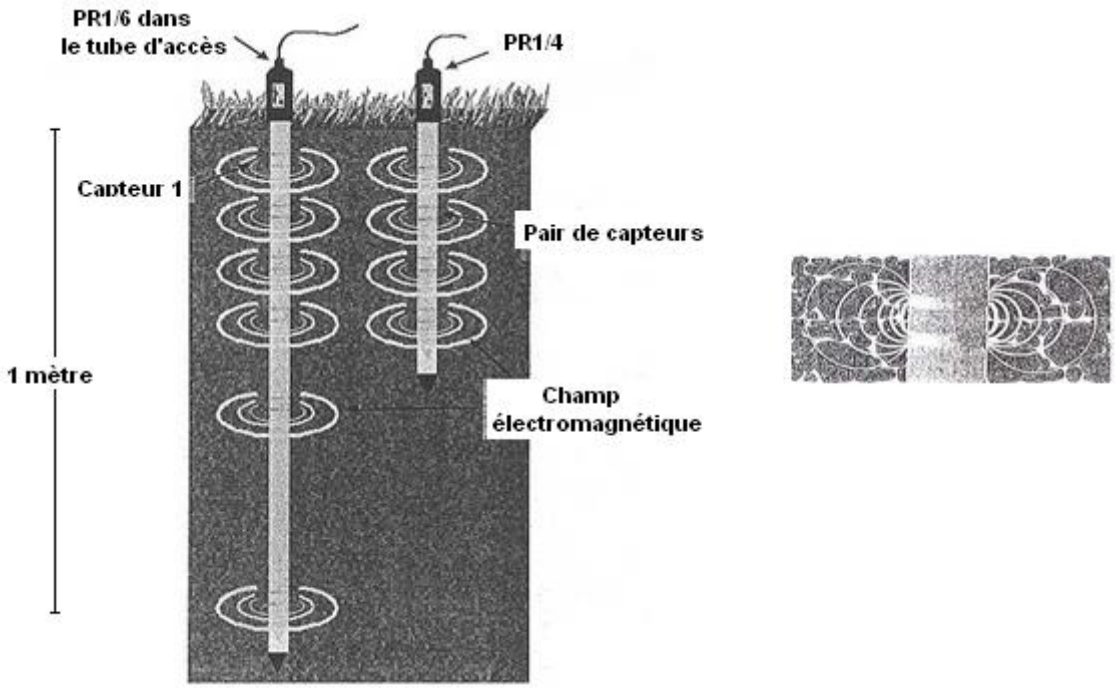


Figure 3.4 : Schéma de fonctionnement de la sonde PR

III.3.2. Lecture des résultats

La lecture des résultats est effectuée par affichage sur le boîtier HH2 (Photo 3.3). Ce type de boitier est adapté à être branché sur des appareillages comme les équitensiomètres, les Thetaprobes, les sondes PR1 de la gamme Delta -T Devices, etc.

Le boitier donne les résultats sous la forme de :

1. Tension en millivolt,
2. La teneur en eau volumique en m^3/m^3,
3. La teneur en eau volumique en %,

Photo 3.5 : Boîtier type HH2.

Parmi ces mesures, c'est la teneur en eau volumique en % qui nous intéresse.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

III.3.3. Précision de lecture

La sonde en elle-même est fiable mais cela ne garantit pas que la mesure soit précise. Il y a trois (03) sources d'erreur possible qu'il faut prendre en compte :

4. Les problèmes d'installation (poches d'air qui peuvent induire jusqu'à 10% d'erreur).
5. Le problème d'étalonnage,
6. Les erreurs d'échantillonnage.

Une fois encore, il n'est pas facile de quantifier ces erreurs mais il faut signaler que la grande majorité des problèmes de mesure rencontrée en pratique est due à la spécificité des sols argileux. En effet, ces derniers se fissurent souvent en se desséchant faisant en sorte que les lectures sont plutôt caractéristiques de ces fissures et non de la teneur en eau.

Il faut aussi signaler que la teneur en eau peut varier de façon significative même pour un faible volume de sol intéressé. L'exemple classique souvent remarqué est celui relatif à la variation de la teneur en eau en un même endroit juste parce que la sonde a subit une rotation. C'est pourquoi et pour déterminer la teneur en eau en un endroit, il est souvent recommandé d'effectuer trois (03) mesures et d'en faire la moyenne.

III.4. Mesure de la perméabilité

III.4.1. Dispositif de mesure

Pour la mesure de la perméabilité, c'est le perméamètre de Guelph qui a été utilisé. Cet appareil a été mis au point par Elrick et al (1985) à l'Université de Guelph (Canada).

L'essai de détermination de perméabilité consiste à appliquer une charge hydraulique constante dans le puits en faisant appel au principe de Mariotte et à mesurer le débit d'écoulement jusqu'à ce qu'un régime permanent soit établi, c'est à dire que l'essai est mené jusqu'à l'obtention d'une vitesse d'infiltration constante.

La mesure du débit pour au moins deux charges hydrauliques différentes est nécessaire afin de pouvoir analyser les données. Ce dispositif permet d'évaluer la conductivité hydraulique, le potentiel d'écoulement matriciel et l'absorption du sol.

La méthode du Perméamètre de Guelph intègre les composantes horizontales et verticales de l'écoulement. Cette méthode repose sur les hypothèses suivantes :

- Le sol doit être homogène et isotrope,

- L’humidité initiale du sol doit être uniformément répartie,
- Le sol doit être non gonflant.

III.4.2. La description des éléments de l'appareillage

Le Perméamétrie de Guelph est divisé en six parties (Voir la figure 3.4 de la page suivante) :

- Le trépied,
- Le tube support et les raccords du tube à air inférieur,
- Le corps du réservoir,
- Le couvercle du réservoir,
- Le tube gradué et les raccords du tube à air
- Les outils auxiliaires

III. 2. 1. 1. III.4.2.1. Le trépied

Le trépied (Photo 3.5), qui sert de support du perméamètre, est constitué d'une base munie d'une bague mobile et de trois pieds démontables avec embouts. La base flexible du trépied possède trois cavités dans lesquelles il faut enfiler les pieds. Après le montage et le positionnement, le trépied est consolidé par sa chaîne de soutien.

Figure 3.6 : Le trépied du perméamètre.

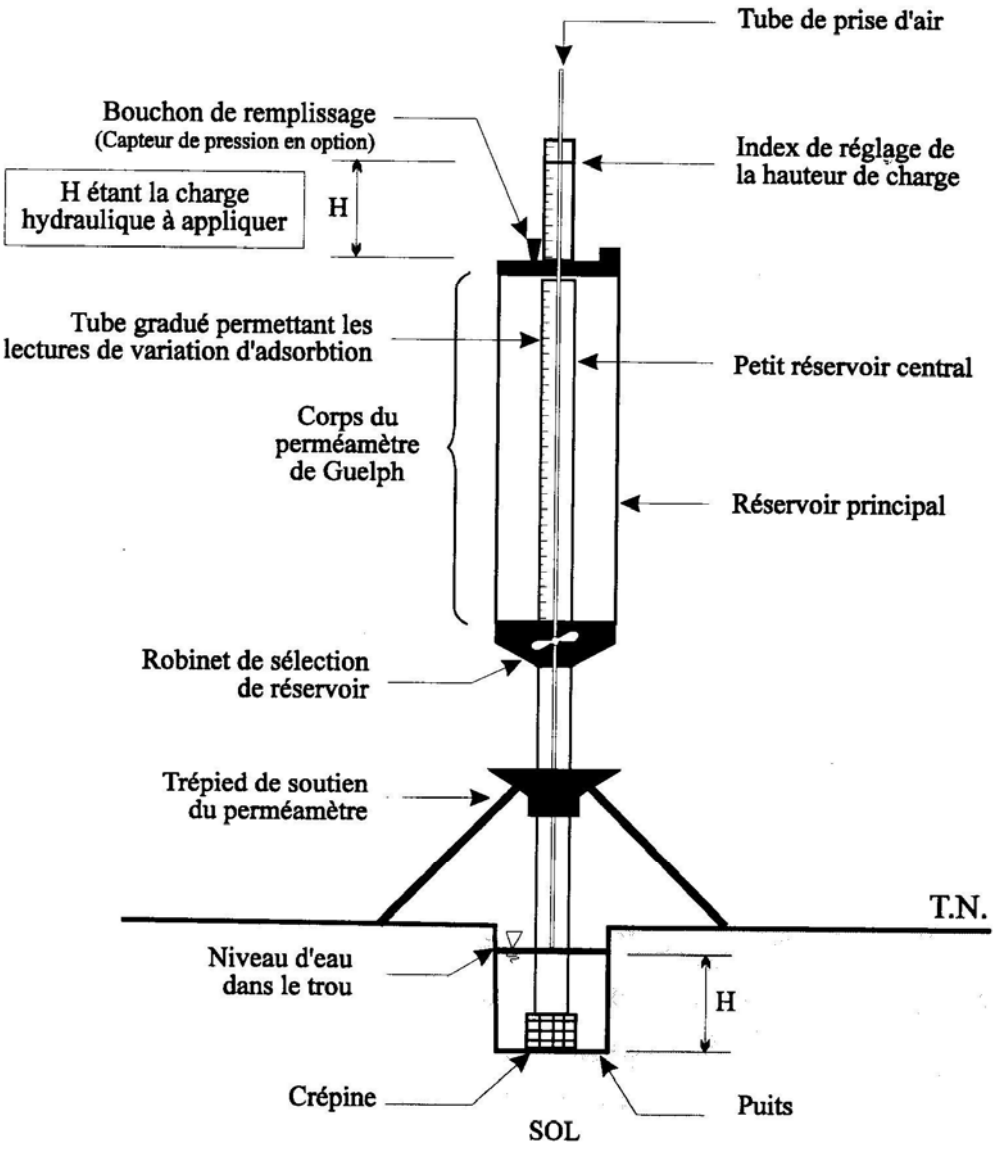


Figure 3.7 : Schéma du perméamétrie de Guelph

III.4.2.2. Le tube support et les raccords du tube à air inférieur

Ce sont les raccords qui acheminent l'eau depuis le réservoir jusqu'au trou et permettent ainsi d'établir et de maintenir la charge hydraulique constante dans le puits. Le tube support maintient le réservoir au dessus du puits et conduit l'eau depuis le réservoir jusqu'à l'embout de sortie d'eau.

Cet embout, à l'extrémité du perméamètre, disperse l'énergie de l'eau sortant par ses fentes afin d'éviter que le sol ne tombe dans le puits. Le joint où butte l'embout d'arrivée d'air est à l'intérieur de l'embout de sortie d'eau. Quand l'embout est appuyé sur ce joint, l'air ne peut pas s'introduire dans le tube support. L'eau ne s'écoule donc pas du réservoir.

L'embout d'arrivée d'air est à l'extrémité du tube à air inférieur. Il règle la charge hydraulique dans le puits. La rondelle de restriction d'air se situe dans cet embout. Elle règle la circulation de l'air et participe au maintient d'une charge hydraulique dans le puits. Le perméamètre de Guelph fait appel au principe de Mariotte pour réguler la charge.

Le raccord entre les tubes à air inférieur et intermédiaire possède des ailettes pour le centrer et éviter au tube de se courber dans le tube support.

Figure 3.6 : Tube support

III.4.2.3. Le corps du réservoir

Le corps du réservoir permet de stocker de l'eau et de mesurer sa sortie pendant le fonctionnement du perméamètre. Pour les sols à faible perméabilité, des argiles par exemple, on n'utilise que le réservoir interne pour avoir des mesures suffisamment précises du débit. Pour des sols de perméabilité moyenne à forte, des sables ou des terreaux bien structurés, on utilise l'ensemble du réservoir.

Le réservoir interne est gradué en centimètres pour mesurer dans les deux cas le départ d'eau. Les raccords sont aux extrémités du réservoir. Ils permettent de remplir et de sélectionner le réservoir adéquat. Le Perméamètre de Guelph est fermé lorsque l'embout d'arrivée d'air est collé contre le joint. Grâce à l'élévation du tube à air entraînant celle de l'embout d'arrivée d'air et de la charge hydraulique, l'eau s'écoule depuis le réservoir jusqu'au puits en passant par le tube support et l'embout de sortie d'eau.

Photo 3.7 : Corps du réservoir

La charge de l'eau dans le puits est en relation avec la position de l'embout d'arrivée d'air. Elle est indiquée par le témoin de charge hydraulique sur le tube gradué. La base du réservoir comprend une vanne. Elle relie les réservoirs interne et externe au tube support. Pendant l'utilisation, la vanne du réservoir avec une petite encoche règle l'écoulement de l'eau. Quand l'encoche est vers le bas, seul le réservoir interne fonctionne.

III.4.2.4. Le couvercle du réservoir

Le sommet du réservoir contient un orifice fermé par un bouchon et une connexion avec le tube de vidange. Le réservoir est fermé par un couvercle (Photo 3.8 ci-dessous) étanche avec un emplacement pour le tube à air et un bourrelet pour fixer le tube gradué. Le tube à air intermédiaire traverse le réservoir interne mais l'étanchéité est assurée.

Le témoin de la charge hydraulique est mobile autour du tube à air intermédiaire, au dessus du réservoir et indique la charge maintenue dans le puits sur le tube gradué. Le couvercle du réservoir est doté de deux orifices. L'orifice de remplissage et celui pour le tube de vidange.

Ce dernier est composé d'un tube d'accès, d'un tube en néoprène et d'un collier de serrage. Le tube de vidange facilite la création d'une dépression, quand les réservoirs, au début, ne sont pas complètement remplis. Après avoir créé la dépression, le tube en néoprène est recourbé et fermé par le collier du serrage.

Photo 3.10 : Couvercle du réservoir

III.4.2.5. Le tube gradué et les raccords du tube à air

Le tube à air supérieur est relié au tube intermédiaire au moyen d'un raccord. Il sert d'extension pour faciliter la mise en place de la charge hydraulique après l'installation du tube gradué. Ce dernier est numéroté en centimètre et possède une encoche tous les millimètres. Le tube gradué est maintenu par sa base et s'emboîte parfaitement sur le bourrelet central du couvercle du réservoir.

Une fois à la base du Perméamétrie, l'embout d'arrivée d'air est appuyé sur son joint, il faut faire glisser le témoin de la charge hydraulique jusqu'au couvercle du réservoir. Ensuite il

faut installer le tube gradué, puis tirer alors le tube à air vers le haut en entraînant le témoin de charge à la hauteur désirée. La charge est lue sur le tube gradué.

Photo 3.11 : Tube gradué

III.4.2.6. Les outils auxiliaires

Le kit du perméamétrie de Guelph comprend une tarière à sol pour creuser le trou, une tarière de finition, une brosse et un conteneur souple pour amener l'eau sur le lieu d'utilisation. La brosse permet d'enlever les débris de taraudage. En effet, ces derniers pourraient empêcher l'écoulement naturel de l'eau dans le sol au voisinage du puits.

III.5. Mesure de succion

III.5.1. Généralités

Il existe plusieurs modèles de tensiomètres qui servent tous à mesurer la succion des sols, tous basés sur le même principe, mais dont le fonctionnement est plus ou moins différent.

Nous avons utilisé dans ce travail le tensiomètre à bougie poreuse. Ce dernier sera décrit dans ce qui suit.

Photo 3.12 : Tensiomètre à bougie poreuse

III.5.1.1. Description de l'appareillage

Le tensiomètre permet de mesurer la charge hydraulique ψ du sol. Il est constitué d'une bougie en céramique poreuse fixée à l'extrémité d'un tube, enfoncée dans le sol à la profondeur souhaitée. Le tube ainsi que la bougie sont remplis d'eau dégazée et l'ensemble est hermétiquement fermé par un bouchon et reliés par un capillaire à un manomètre.

Le système ainsi mis en place autorise des échanges osmotiques à travers la paroi poreuse. Une certaine quantité d'eau sort du tensiomètre jusqu'à ce que la dépression soit équilibrée, cette dépression est égale au potentiel de l'eau dans le sol.

Si l'humidité du sol vient à baisser, l'eau diffuse à travers la bougie poreuse vers le milieu environnant : il se produit une dépression à l'intérieur du système mise en évidence par le manomètre. De même, lorsque le sol s'humidifie, la tension baisse et à saturation, elle s'annule.

Les tensiomètres sont des appareils simples, précis et très utilisés mais la gamme de potentiel qu'ils permettent de mesurer est limitée (il ne fonctionne plus à $\psi > 0{,}09$ MPa). En effet, lorsque la succion atteint des valeurs de cet ordre, l'air peut passer à travers la bougie poreuse et le tensiomètre se désamorce.

La valeur de la succion est donnée par un manomètre à aiguille gradué de 2 en 2 cbar.

Photo 3.13 : Le tensiomètre

Rapport-Gratuit.com

III.6. Conclusion

Après cette étude, on peut dire que tous les appareils de mesure sont basés sur le même principe. Les appareils qui mesurent la teneur en eau se basent sur la conductivité de l'eau dans le sol, par contre ceux qui mesurent la succion ils se basent sur la valeur de la sous-pression dans le sol. Enfin, la mesure de la perméabilité dépend de la vitesse de circulation de l'eau à travers les pores du sol. Chaque appareil de mesure possède sa propre précision et son niveau de fiabilité.

Chapitre 4
Résultats et interprétations

IV.1. Introduction

Le chapitre précédant a été consacré à la présentation des différentes techniques et appareillages ainsi qu'aux méthodes utilisés pour la mesure in situ des différents paramètres que sont la succion, la perméabilité et la teneur en eau. Dans ce chapitre, on présentera les résultats obtenus et leurs analyses. Il faut signaler que la campagne de mesure a duré un mois. Les mesures ont été effectuées sous des conditions climatiques naturelles (températures, pluies, etc.).

IV.2. Analyse des résultats de la perméabilité

IV.2.1. Etude de la variation des paramètres hydrauliques

Les essais de perméabilité, du potentiel hydrique et de l'absorption ont été effectués sur le site expérimental décrit précédemment. Nous présenterons les résultats détaillés obtenus sur deux exemples différents. Ces résultats permettent de comprendre la procédure adoptée, l'analyse et les remarques principales que nous pouvons tirées.

IV.2.1.1. Exemple du 1^{ier} trou : le trou R4C

Selon le plan du site donné dans le chapitre 3, le trou R4C est situé à l'intersection de la ligne C et de la rangée 4. La profondeur du trou est de 38 cm et son diamètre est de 6 cm. Nous avons utilisé l'ensemble des réservoirs du perméamètre de Guelph et l'intervalle de temps considéré est de deux minutes.

Pour cet exemple, deux charges hydrauliques (H1 et H2) ont été utilisées. La charge H1 vaut 5 cm et la seconde charge vaut 10 cm. Il faut noter que le passage d'une charge à une autre (ici de H1=5cm à H2=10cm), est conditionné par l'obtention du régime permanent, ce dernier est supposé atteint quand le débit spécifique varie peu. Il faut noter aussi que des soins particuliers doivent être pris lors du passage d'une charge à une autre, ceci dans le souci de ne pas perturber le dispositif de mesure pour ne pas altérer les mesures. Précautions que nous avons bien sûr respectées lors de nos essais.

Il est nécessaire de rappeler que les mesures ont été réalisées sous les conditions météorologiques suivantes :

- Température de 14°C
- Pluie de 1 mm.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Les mesures que nous avons obtenues sont illustrées sur les courbes suivantes. Ainsi, les figures 4.1 et 4.2 montrent la diminution de la hauteur de l'eau en fonction du temps pour les charges respectives de 5 et 10 cm.

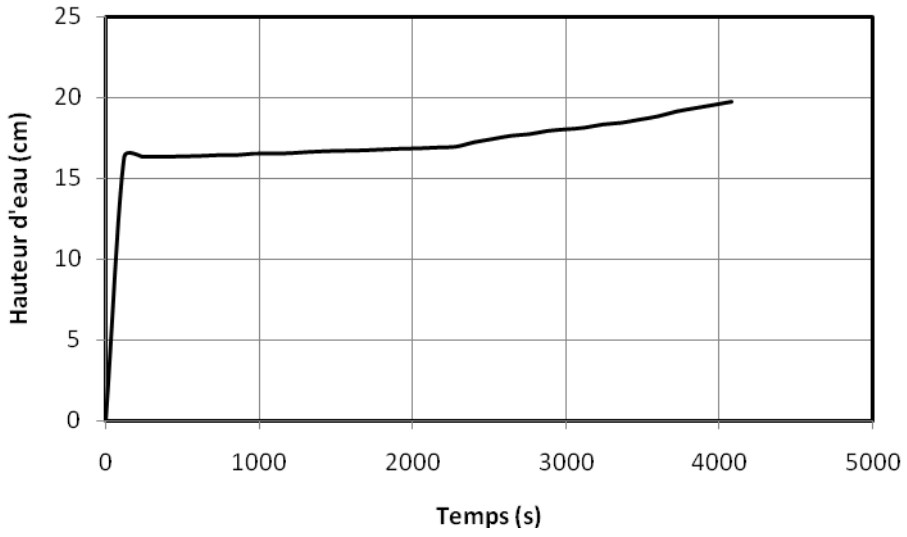


Figure 4.1 : Variation de la hauteur d'eau en fonction du temps (H1=5cm)

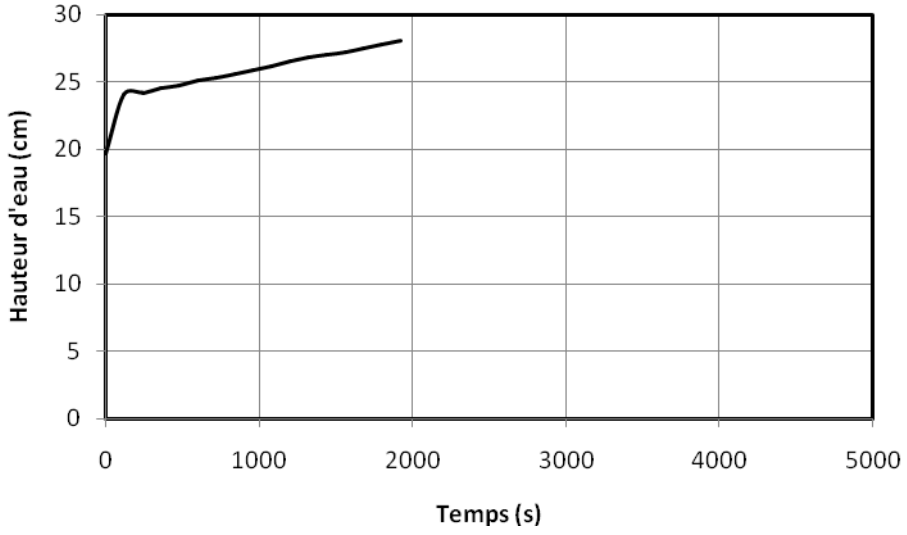


Figure 4.2 : Variation de la hauteur de l'eau en fonction du temps (H2=10 cm)

La remarque principale qui se dégage de ces deux courbes est que lors des deux premières minutes, la hauteur de l'eau chute d'une manière importante pour la première charge que pour la seconde. On a environ une chute de 16,3 cm pour la charge de 5 cm et 4 cm pour la seconde. Ceci est dû au fait que le sol n'était pas saturé pour la première charge alors qu'il l'était pour la seconde. Après ces deux minutes, la tendance était vers la stabilisation.

Les figures 4.3 et 4.3 ci-dessous présentent les courbes de variation de la diminution de la hauteur d'eau en fonction du temps. On observe que, pendant les deux premières minutes, la variation de la chute de la hauteur d'eau est presque constante pour devenir ensuite sensiblement nulle. On peut remarquer aussi que la variation de la chute de la hauteur est légèrement plus rapide lors du premier essai que le second. La pente des tronçons représentatifs de cette phase est plus marquée pour le premier essai que pour le second.

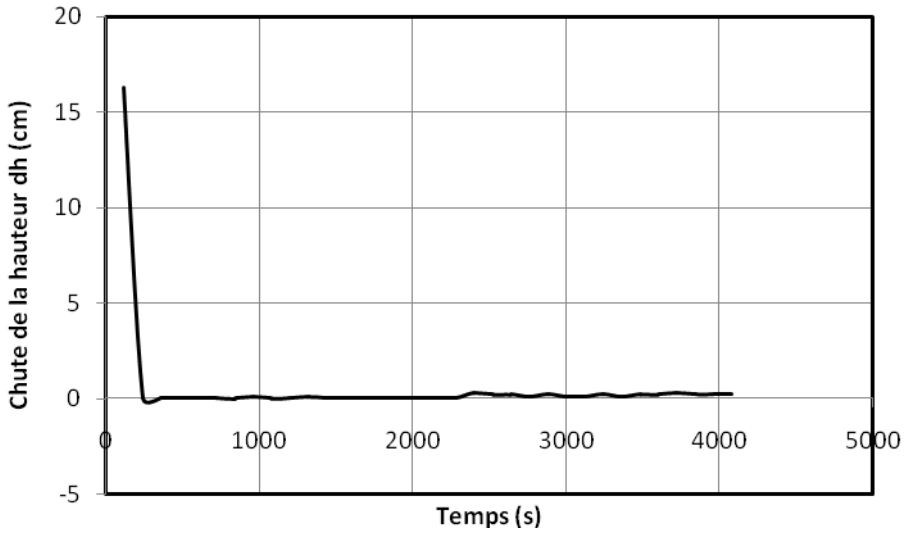


Figure 4.3 : Variation de la chute de la hauteur d'eau en fonction du temps (H1=5 cm)

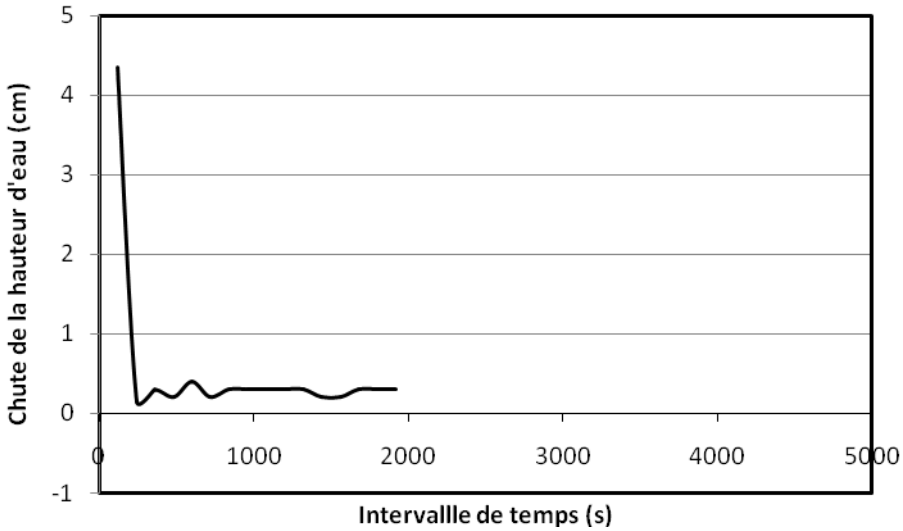


Figure 4.4 : Variation de la chute de la hauteur d'eau en fonction (H2=10 cm)

N.B. : Nous avons gardé volontairement la valeur extrême du temps 5000 secondes pour avoir une comparaison directe sur les figures.

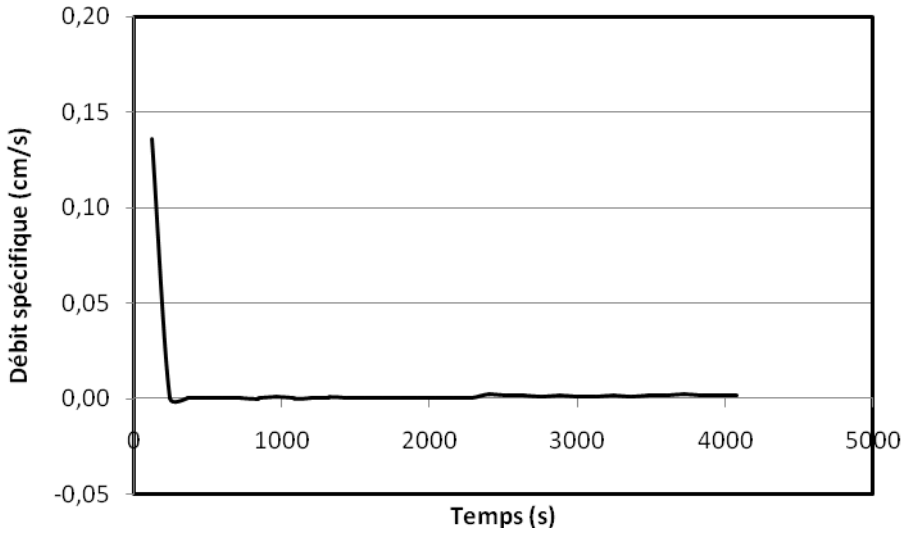


Figure 4.5 : Variation du débit spécifique en fonction du temps (H1=5 cm)

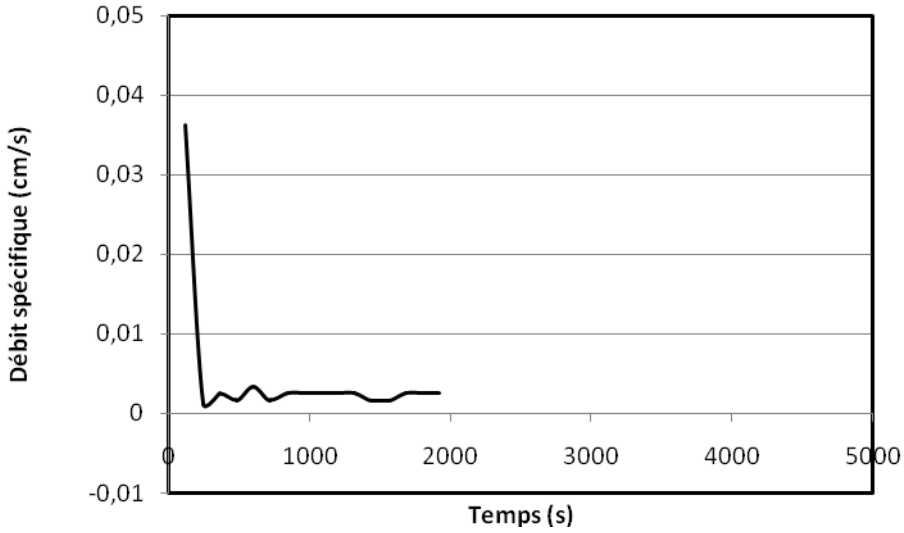


Figure 4.6 : Variation du débit spécifique en fonction du temps (H2=10 cm)

Les figures 4.5 et 4.6 illustrent la variation du débit spécifique [dh/dt] (équivalent à une vitesse) en fonction de temps pour les deux charges respectives. On remarque que la vitesse de l'écoulement diminue d'une manière très forte au début de l'essai pour se stabiliser ensuite.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

A titre d'exemple, la vitesse passe de 0,136 cm/s à 0 quand le temps passe de 0 à 360 secondes pour le premier cas et de 0,036 cm/s à 0,0012 cm/s pour le second cas.

Les légères fluctuations observées sur la figure 4.6 ne sont dues en fait qu'au changement d'échelle entre les deux figures. Pour des échelles comparables, les fluctuations seront aussi comparables, de ce fait, négligeables.

Lors de l'essai à la charge H1=5cm, le débit spécifique a mis presque une heure pour se stabiliser. La stabilisation est jugée atteinte quand le taux de l'écoulement de l'eau ne varie pas de façon significative pendant 3 intervalles de temps consécutifs. Ce taux est appelé R1 et vaut $1{,}66.10^{-5}$ m/s. Pour l'essai à la charge H2=10 cm, la stabilisation a demandé moins de temps, environ une demi-heure. Le taux R2 déterminé vaut $2{,}5.10^{-5}$ m/s.

Les paramètres que permet d'obtenir ce type d'essai sont la conductivité hydraulique à saturation Kfs, le potentiel hydrique ϕ_m et le coefficient de proportionnalité α. Ces paramètres sont déterminés par les relations suivantes.

Pour la conductivité hydraulique Kfs, l'équation est :

$$K_{fs} = (0{,}0041 \times 35{,}22 \times R2) - (0{,}0054 \times 35{,}22 \times R1)$$

Le chiffre 35,22 est en fait la section des deux réservoirs, il s'exprime en m^2. Les chiffres 0,0041 et 0,0054 sont des constantes de l'appareillage, ils s'expriment comme étant l'inverse d'une surface. R1 et R2 sont les débits spécifiques pour les deux charges à régime permanent.

Pour le potentiel hydrique, la relation est semblable à celle de la conductivité hydraulique, seules les constantes changent. Cette relation s'écrit :

$$\emptyset_m = (0{,}0572 \times 35{,}22 \times R1) - (0{,}0237 \times 35{,}22 \times R2)$$

Cette relation est valable si le sol est perméable ou moyennement perméable. Dans le cas où le sol est faiblement perméable comme les argiles par exemple, la valeur de la section du réservoir à considérer est celle du réservoir interne et qui vaut 2,15 cm^2 au lieu de 35,22 cm^2.

Le coefficient de proportionnalité α est donné par le rapport :

$$\alpha = \frac{K_{fs}}{\emptyset_m}$$

est donnée par :

$$S = \sqrt{2 \times \Delta\theta \times \phi_m}$$

Le tableau ci-dessous résume l'ensemble des valeurs obtenues pour le trou R4C.

R1 (m/s)	R2 (m/s)	Kfs (m/s)	ϕ_m (m^2/s)	α (m^{-1})	$\Delta\theta$ %	S ($m/s^{1/2}$)
$1,66 .10^{-5}$	$2,50 .10^{-5}$	$4,40 .10^{-7}$	$1,27 .10^{-7}$	3,46	27,5	$2,6 .10^{-3}$

Tableau 4.1 : Récapitulatif des résultats détaillés sur le trou R4C

IV.2.1.2. Exemple du 2ième trou : le trou R3E

Le deuxième exemple qui sera traité dans ce document est celui qui est relatif au trou R3E. Ce dernier est situé donc sur la cinquième rangée nord-sud et la troisième rangée ouest-est du terrain. La profondeur du trou est de 38 cm et son diamètre est de 6 cm. Nous avons utilisé l'ensemble des réservoirs du perméamètre de Guelph et l'intervalle de temps considéré est toujours de deux minutes.

Pour cet essai, quatre charges hydrauliques H1, H2, H3 et H4 respectivement égales à 5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm ont été appliquées. Il va de soit que les précautions signalées auparavant lors du passage d'une charge hydraulique à une autre ont été respectées dans ce cas.

Les conditions météorologiques sous lesquelles a été effectué l'essai sont :

- Température de 13°C,
- Pluie de 0.9 mm.

Les figures 4.7, 4.8, 4.9 et 4.10 suivantes représentent la variation de la hauteur d'eau pour les différentes charges hydrauliques.

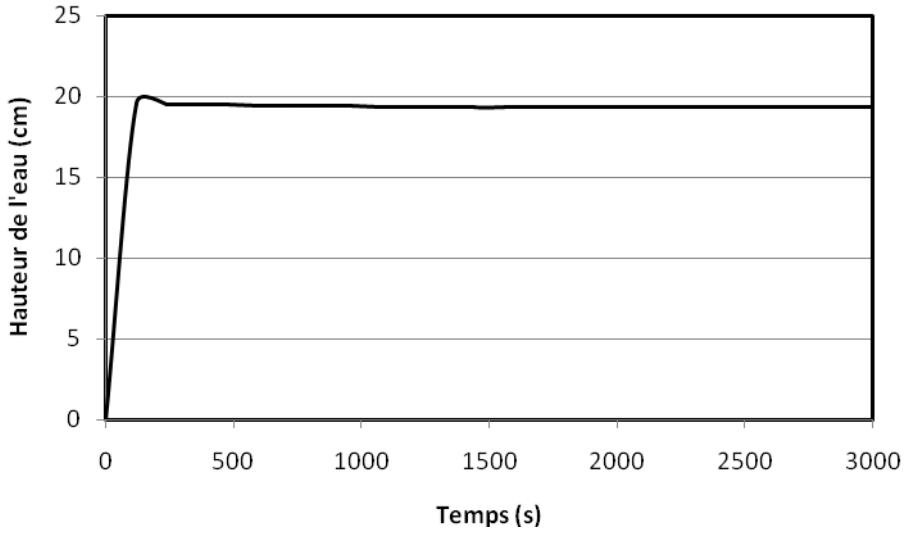


Figure 4.7 : Variation de la hauteur d'eau en fonction du temps (H1=5 cm)

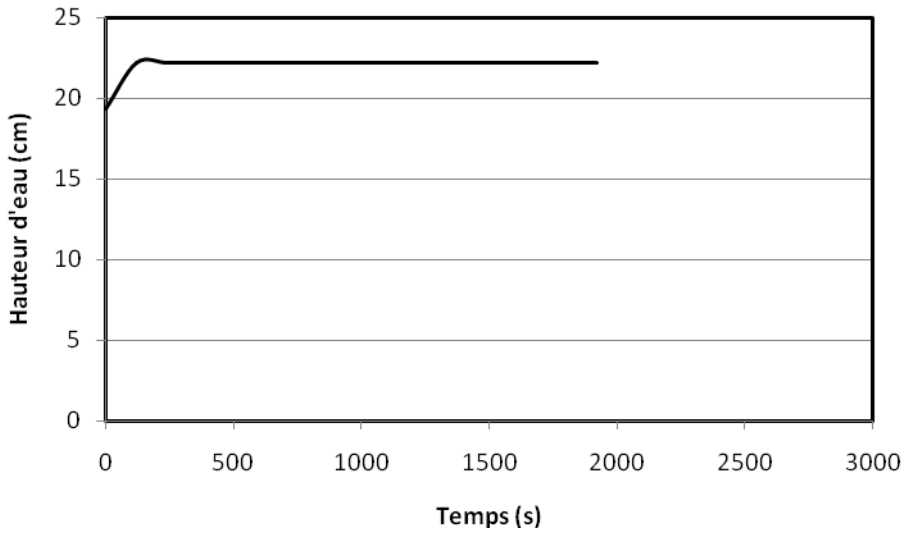


Figure 4.8 : Variation de la hauteur d'eau en fonction du temps (H2=10 cm)

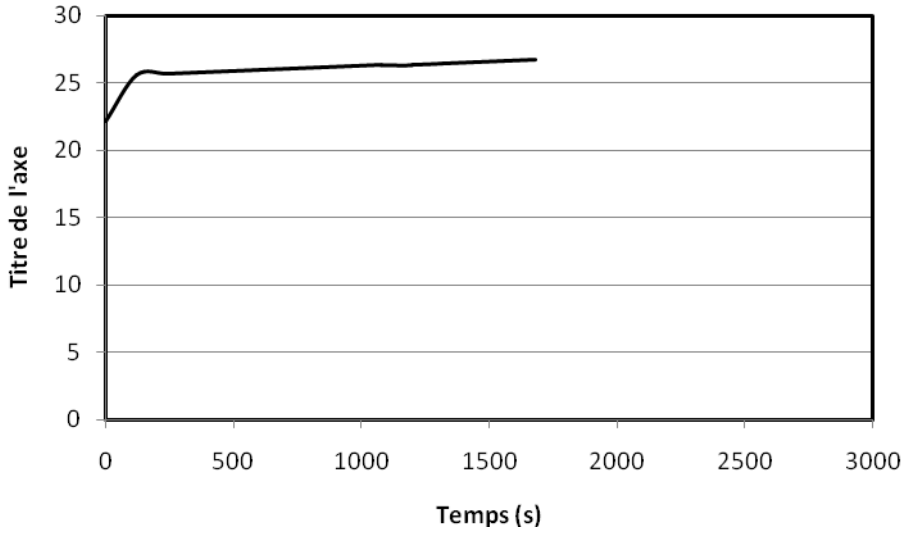


Figure 4.9 : Variation de la hauteur d'eau en fonction du temps (H3=15 cm)

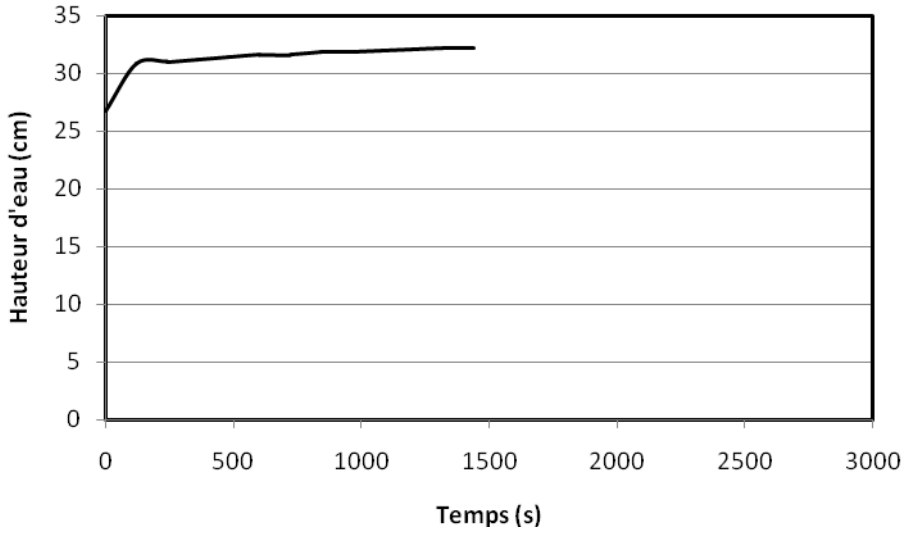


Figure 4.10 : Variation de la hauteur d'eau en fonction du temps (H4=20 cm)

L'ensemble des figures montrent qu'à chaque fois, la hauteur de l'eau diminue au début de l'essai pour se stabiliser ensuite. Bien sûr, la stabilisation n'a pas été obtenue dans les mêmes délais. C'est la première charge (H1=5 cm) qui a nécessité le plus de temps, environ 50 minutes. Pour les autres charges, la stabilisation a été atteinte au bout d'environ une demi-heure (respectivement 32 minutes, 28 minutes et 24 minutes). La diminution du temps nécessaire à la stabilisation est due à la phase de saturation, présente lors de la première charge et absente lors des suivantes.

C'est aussi à cause de la saturation que c'est la charge H1=5cm qui a vu la plus importante chute de la hauteur. En effet, on a eu pour les charges respectives de 5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm, les chutes de 19,6 cm, de 2,9 cm, de 3,5 cm et de 5,5 cm.

Les figures 4.11, 4.12, 4.13 et 4.14 représentent la variation de cette chute. Si on représente ces courbes avec des échelles identiques, on remarquera que les pentes des trois dernières charges sont sensiblement égales et significativement inférieures à celle de la première charge.

Ceci indique que les infiltrations deviennent de plus en plus difficiles. Ce constat va être retrouvé sur les figures 4.15, 4.16, 4.17 et 4.18 qui représentent la variation du débit spécifique en fonction du temps pour les quatre charges indiquées auparavant.

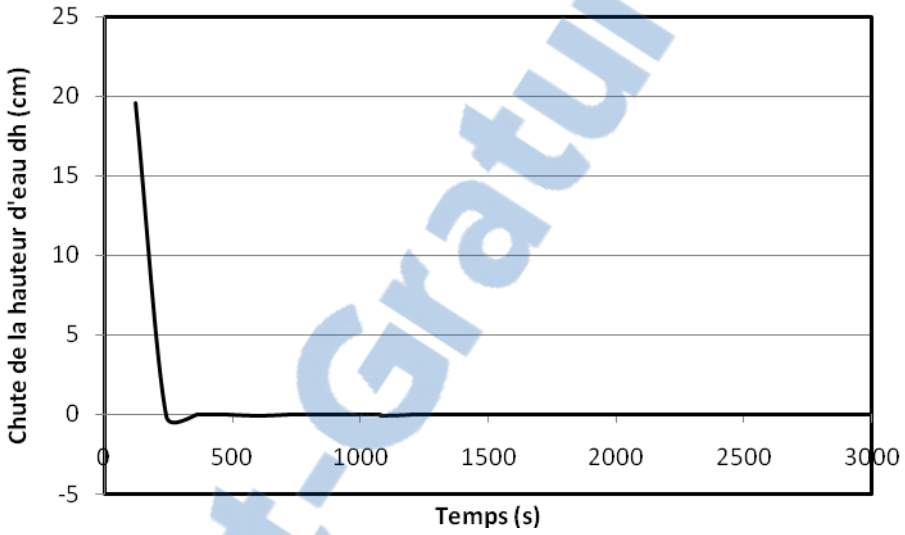


Figure 4.11 : Variation de la chute de la hauteur d'eau en fonction du temps (H1=5 cm)

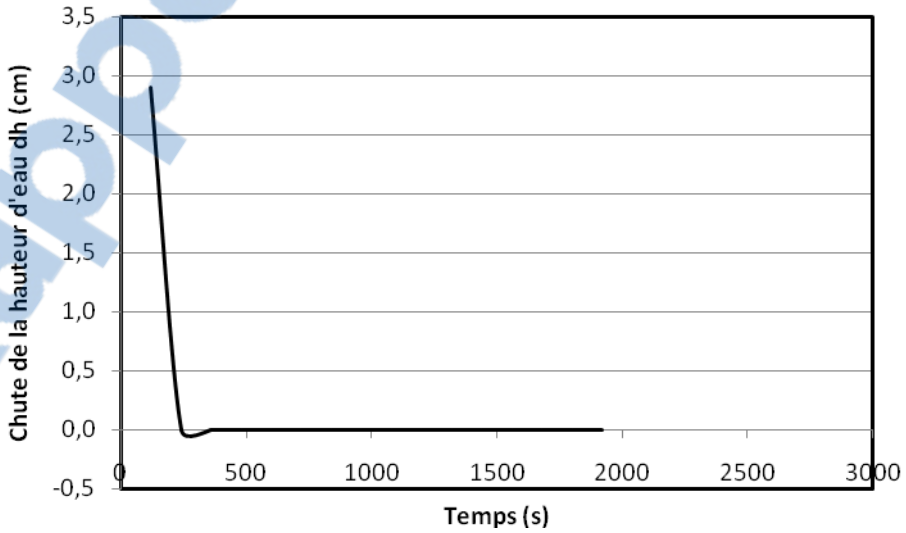


Figure 4.12 : Variation de la chute de la hauteur d'eau en fonction du temps (H2=10 cm)

Rapport-Gratuit.com

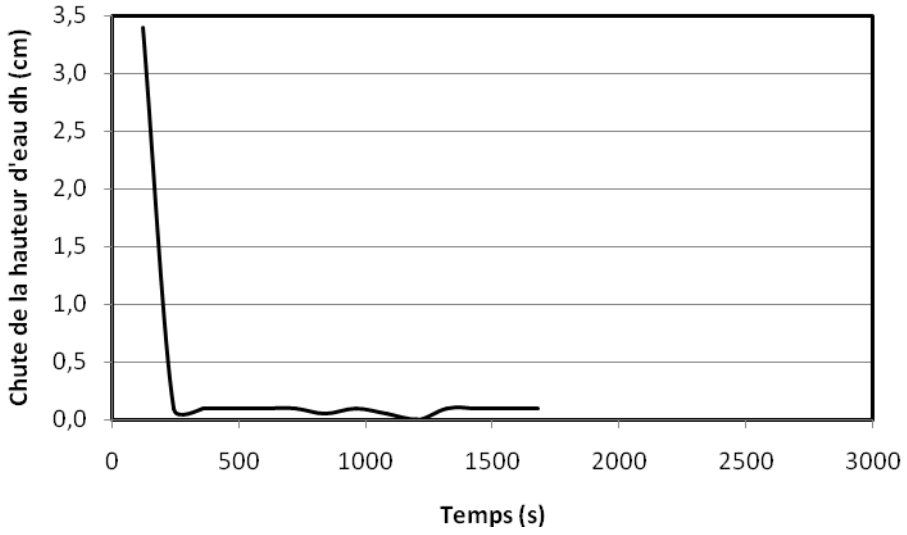


Figure 4.13 : Variation de la chute de la hauteur d'eau en fonction du temps (H3=15 cm)

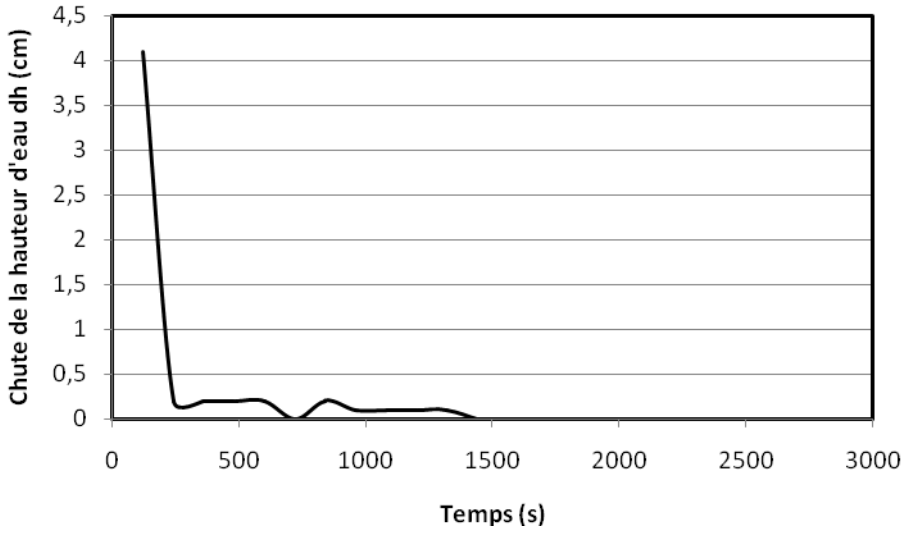


Figure 4.14 : Variation de la chute de la hauteur d'eau en fonction du temps (H3=20 cm)

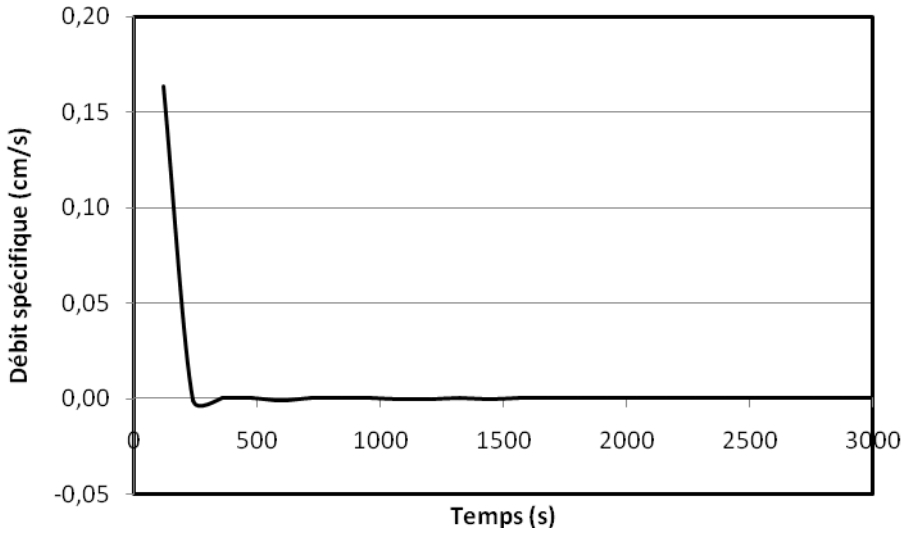


Figure 4.15 : Variation du débit spécifique en fonction du temps (H1=5 cm)

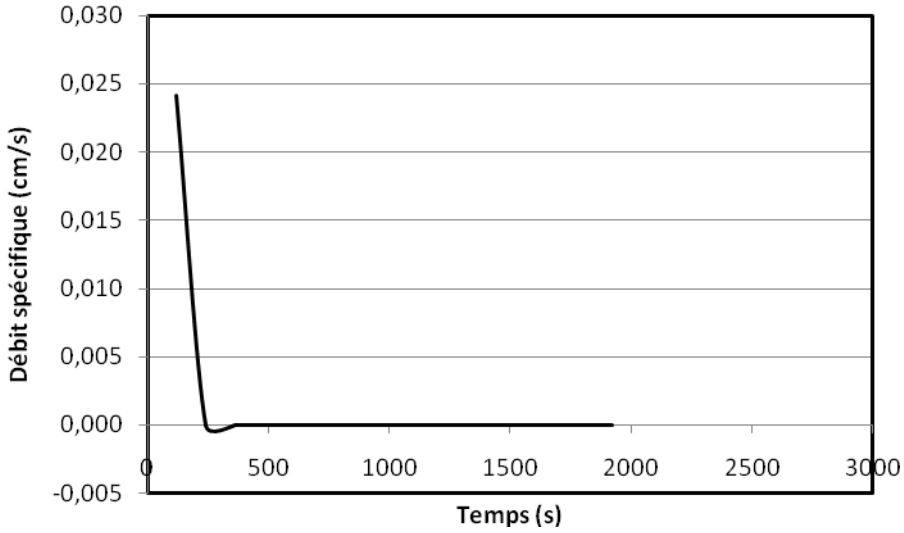


Figure 4.16 : Variation du débit spécifique en fonction du temps (H2=10 cm)

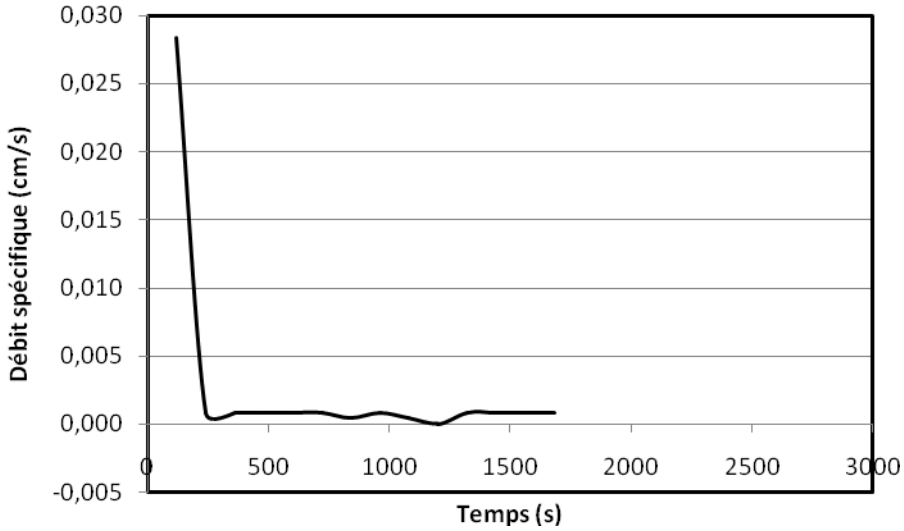


Figure 4.17 : Variation du débit spécifique en fonction du temps (H2=15 cm)

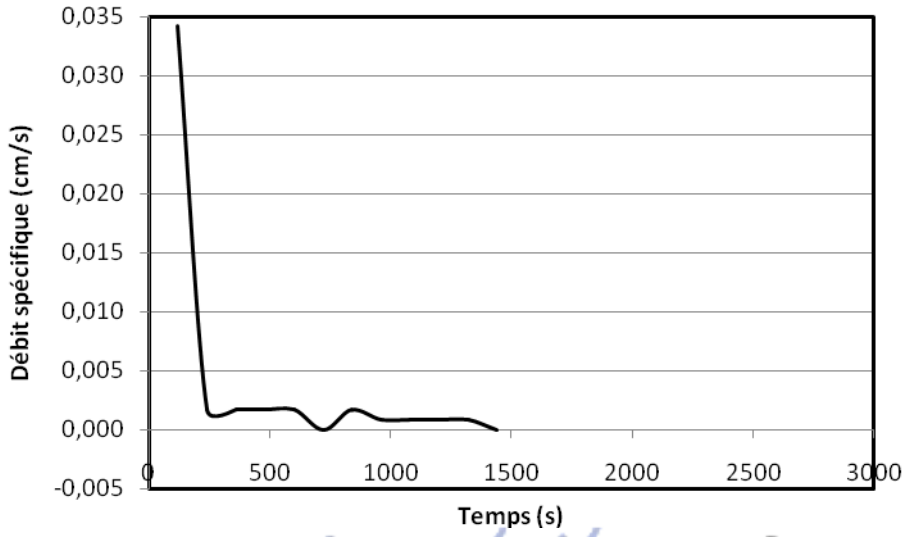


Figure 4.18 : Variation du débit spécifique en fonction du temps (H2=15 cm)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Concernant le débit spécifique, on constate que pour les deux premières charges, il s'annule au bout de la troisième minute. Pour les deux autres charges, ce débit persiste jusqu'à la fin de l'essai. Bien sûr, le débit à la fin de l'essai vaut environ 40 fois moins que celui du début de l'essai.

Les explications les plus plausibles pour ces débits nuls sont peut être :

- Le fait que le sol à ces endroits est moins perméable, ce qui fait que des charges faibles ne provoquent pas d'écoulement,
- Que la nappe est à ce niveau.

Pour le trou R3E, les deux premières charges n'ayant pas donné d'écoulement, la détermination des différents paramètres a été effectuée avec les charges de 15 cm et 20 cm. Le tableau ci-dessous résume donc l'ensemble des valeurs obtenues pour ce trou.

R3 (m/s)	R4 (m/s)	Kfs (m/s)	ϕ_m (m^2/s)	α (m^{-1})	$\Delta\theta$ %	S ($m/s^{1/2}$)
$8,33\ 10^{-6}$	$1,25\ 10^{-5}$	$2,20\ 10^{-7}$	$6,35\ 10^{-8}$	3,46	28,6	$1,9\ \ 10^{-3}$

Tableau 4.2 : Récapitulatif des résultats détaillés sur le trou R3E

On notera que ce type d'essais a été réalisé pour l'ensemble des trous (20 au total) et que pour la majorité, l'application des deux charges hydrauliques H1=5 cm et H2=10 cm a été suffisante pour l'obtention de l'écoulement et la détermination des différents paramètres a été donc possible. Pour les trous R2D et R4D, on a été obligé de passer à l'application de la charge hydraulique de 15 cm car l'application de la charge de 5 cm n'a pas donné d'écoulement. De même, on a été obligé de passer à l'application des charges 15 cm et 20 cm pour les trous R1A, R2A, R2E et R3E car l'application des premières charges 5 cm et 10 cm n'a pas produit d'écoulement.

Calcul d'erreur

Le tableau ci-dessous regroupe le calcul d'erreur effectué sur le coefficient de perméabilité et sur le potentiel hydrique. Ces chiffres sont très faibles montrant une certaine fiabilité de l'appareillage.

Calcul d'erreur (%)	R3D	R1E	R1B	R2A	R3A
Kfs	0,17	0,73	1,34	1,85	0,93
ϕm	1,23	1,09	1,98	1,69	0,49

Tableau 4.3 : Calcul d'erreur

IV. 2. 1. 3. Exemple d'application de l'analyse de Richards : Trou R4C

Une autre manière pour évaluer la conductivité hydraulique et le potentiel hydrique est d'utiliser l'analyse de Richards. Cette dernière tient compte de tous les termes de l'équation suivante :

$$CQ = 2\pi H^2 K_s + C\pi a^2 K_s + 2\pi H \emptyset_m$$

Dans l'équation ci-dessus, Q est le débit correspondant à la charge H. C est un coefficient qui dépend du rapport H/a, a étant le rayon du trou de la mesure. Ce coefficient qui dépend de la texture du sol est donné par des abaques. K_s et $\emptyset_m$ sont respectivement la conductivité hydraulique et le potentiel hydrique.

La résolution de cette équation s'effectue en utilisant l'approche des équations simultanées (Reynolds et al, 1985). Cette approche consiste à mesurer deux débits Q_1 et Q_2 correspondant à deux charges respectives H1 et H2. On a alors un système de deux équations à deux inconnues : K_s et ϕ_m.

$$C_1 Q_1 = 2\pi H_1^2 K_s + C_1 \pi a^2 K_s + 2\pi H_1 \emptyset_m$$

$$C_2 Q_2 = 2\pi H_2^2 K_s + C_2 \pi a^2 K_s + 2\pi H_2 \emptyset_m$$

Q_1 et Q_2 sont les débits correspondants respectivement aux charges hydrauliques H_1 et H_2.

De même, C_1 et C_2 sont les valeurs du coefficient C correspondant respectivement aux rapports H_1/a et H_2/a.

La conductivité hydraulique à saturation se calcule à partir de la relation :

$$K_s = G_2 Q_2 - G_1 Q_1$$

Les coefficients G_1et G_2 sont calculés à partir des équations suivantes :

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi[2H_1H_2(H_2 - H_1) + a^2(H_1C_2 - H_2C_1)]}$$

et

$$G_1 = G_2 \frac{H_2C_1}{H_1C_2}$$

De la même manière, le potentiel hydrique Φ_m est donné par :

$$\emptyset_m = J_1Q_1 - J_2Q_2$$

Avec :

$$J_1 = \frac{(2H_2^2 + a^2C_2)C_1}{\pi[2H_1H_2(H_1 \quad H_2) \mid a^2(H_1C_1 \quad H_2C_2]}$$

et

$$J_2 = J_1 \frac{(2H_1^2 + a^2C_1)C_2}{(2H_2^2 + a^2)C_1}$$

L'ensemble des calculs sont résumés dans le tableau suivant :

C_1	C_2	R_1 (cm/s)	R_2 (cm/s)	Q_1 (cm^3/s)	Q_2 (cm^3/s)
0,8	1,28	$1,6667 .10^{-3}$	$2,5.10^{-3}$	$5,87 .10^{-2}$	$8,8051 .10^{-2}$
G_2 (cm^{-2})	**G_1 (cm^{-2})**	**J_1 (cm^{-1})**	**J_2 (cm^{-1})**	**Kfs (cm/s)**	**ϕ_m (cm^2/s)**
$3,9623 .10^{-3}$	$4,9529 .10^{-3}$	$5,5488 .10^{-2}$	$2,4008 .10^{-2}$	$5,8146 .10^{-5}$	$1,14322 .10^{-3}$

Tableau 4.4 : Récapitulatif des calculs de l'analyse de Richards pour le trou R4C

Ce calcul est reproduit pour l'ensemble des trous. Les résultats sont donnés en Annexe.

IV.2.2. La variation de la perméabilité et du potentiel hydrique pour chaque rangée

Une fois l'ensemble des essais réalisés et les paramètres déterminés, une analyse de la variation de la perméabilité et du potentiel hydrique pour chaque rangée a été effectuée. Ainsi les figures suivantes 4.19 montre que les trous R1A, R1B et R1E ont la même perméabilité ainsi que le potentiel hydrique. Ce qui indique qu'on a le même type de sol (perméabilité faible et potentiel hydrique fort). En plus, ces endroits respectent le principe de la relation entre les deux variables (plus la perméabilité est faible plus le potentiel hydrique fort).

Le trou R1C présente une perméabilité forte et un potentiel hydrique fort et le trou R1D présente une faible perméabilité ainsi qu'un très faible potentiel hydrique. Les résultats obtenus pour ces deux derniers trous ne respectent pas le principe généralement admis. Nous attribuons ces différences à des hétérogénéités locales ou à des erreurs liées aux mesures.

Figure 4.19 : Variation de la perméabilité et du potentiel hydrique pour la rangée R1

La figure 4.20 suivante représente la variation de la perméabilité et du potentiel hydrique de la rangée 2. Les résultats montrent que les trous R2B, R2D et R2E ont même perméabilité et même potentiel hydrique. Ces valeurs semblent indiquer que le sol dans ce coin du site est de type limono-sableux à grains fins. Le trou R2A présente une très faible perméabilité et un très fort potentiel hydrique, ce qui indique que le sol est plutôt de type limono argileux. Les paramètres du trou R2C semble indiquer la présence d'un sol de type limono-sableux à grains moyens (le potentiel hydrique varie dans le sens inverse des diamètres des grains du sol).

Figure 4.20 : Variation de la perméabilité et du potentiel Hydrique pour la rangée R2

La figure 4.21 relative aux paramètres de la rangée 3 montre des résultats plus ou moins homogènes entre eux montre indiquant aussi que le sol est homogène dans cette direction.

Figure 4.21 : Variation de la perméabilité et du potentiel hydrique pour la rangée R3

L'ensemble des valeurs de cette rangée semblent indiquer que le sol au niveau des trous R3A, R3D et R3E est de type limono-argileux. Il devient limono-sableux à grains fins au niveau du trou R3B et de type limono-sableux à grains grossiers au niveau du trou R3C.

La figure 4.22 représente les variations de la perméabilité ainsi que celles du potentiel hydrique pour la rangée R4. La variation significative des valeurs de ces paramètres au niveau de cette rangée montre que le sol est assez hétérogène dans ces endroits. On pense que le sol est de type limono-argileux au niveau des trous R4A, R4D et R4E, de type limono-sableux à

grains grossiers au niveau du trou R4B et de type limono-argileux avec une forte proportion d'argile au niveau du trou R4C.

Figure 4.22 : Variation de la perméabilité et du potentiel hydrique pour la rangée R4

D’une manière générale, on peut conclure, sur la base des figures de variation des perméabilités et du potentiel hydrique, que le site est globalement de type limono-sableux à grains fins avec quelques hétérogénéités locales en quelques endroits dues à la présence de particules sableuses de grosseur moyenne à forte et de quelques passages argileux. La présence de poches argileuses s’explique par le potentiel hydrique fort enregistré en quelques endroits.

IV.2.3. La variation de la perméabilité et du potentiel hydrique pour l'ensemble du site

Pour avoir une idée générale sur la variation de la perméabilité et du potentiel hydrique sur le site en entier, nous avons donné les figures 4.23 et 4.24 ci-après sur lesquelles sont représentées les variations de ces paramètres selon les deux directions.

Ainsi et comme nous pouvons le constater sur la figure 4.24, c'est la rangée R3 qui présente les plus fortes perméabilités, particulièrement pour les trous R3C et R3B. Par contre, c'est la rangée R2 avec notamment le trou R2A la plus faible perméabilité est observée. Pour le reste, les perméabilités observées sont d'un ordre moyen et sont généralement comparables en valeur. Il faut noter que les perméabilités obtenues dans la rangée R4 sont légèrement supérieures aux autres rangées (en dehors de la rangée 3), ceci à cause des racines de la végétation localisées en cet endroit

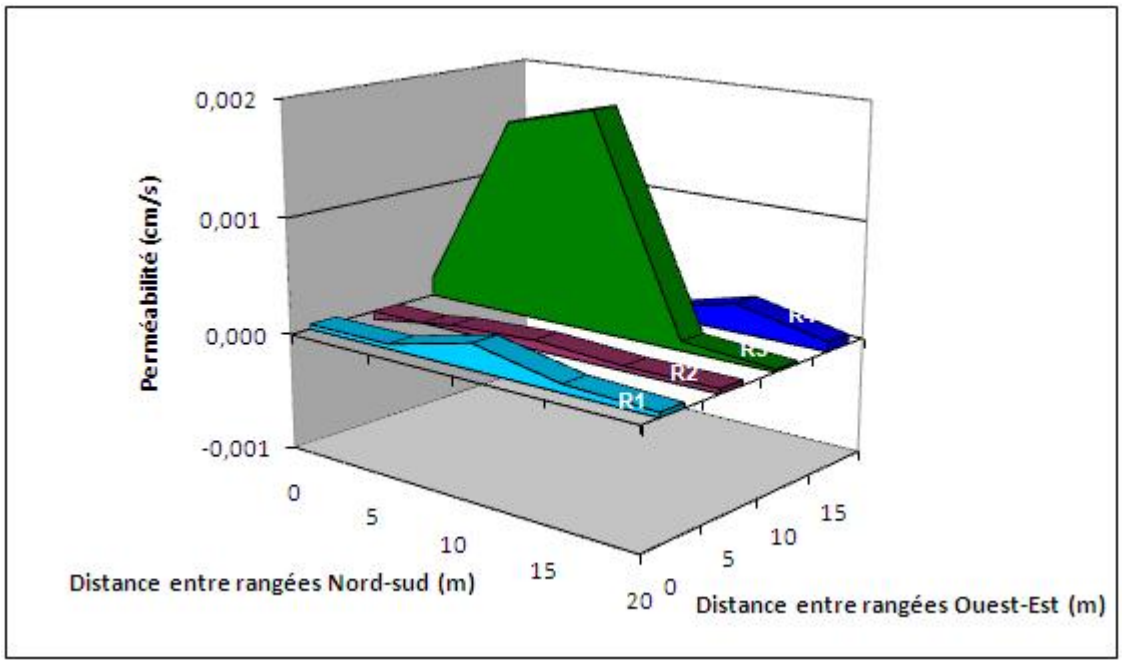


Figure 4.23 : Variation de la perméabilité sur le site d'étude

La figure 4.24 représente la variation du potentiel hydrique pour tout le site. Les plus fortes valeurs sont observées dans les rangées où on a des perméabilités faibles. Ceci reste dans la logique de ce qui peut être attendu, c'est-à-dire que la perméabilité diminue et le potentiel hydrique augmente quand la taille des particules du sol diminue.

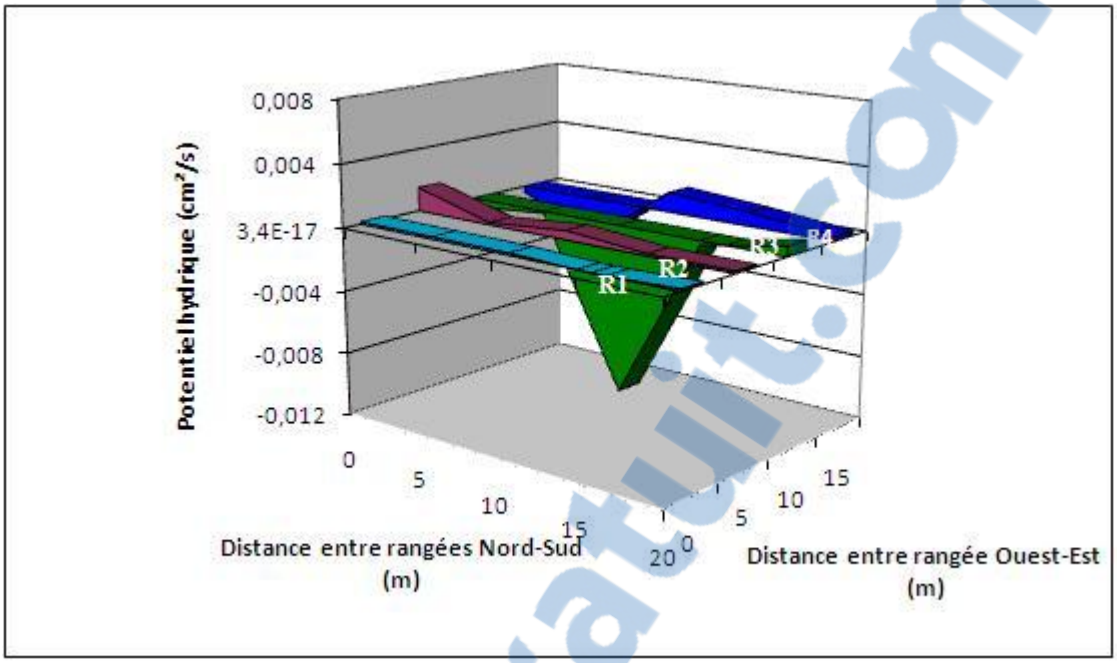


Figure 4.24 : Variation du potentiel hydrique sur le site d'étude

IV. 2.4. Carte de la perméabilité

A l'aide des valeurs de la perméabilité mesurée aux différents trous, la figure 4.25 a été dressée. Cette figure représente la variation de la perméabilité dans le plan. On constate que celle-ci est plus élevée au niveau de l'axe R3B-R3C et que plus on s'éloigne de cet axe, plus la perméabilité diminue. Au départ, la diminution est rapide, on le voit à travers les courbes des isovaleurs qui sont très rapprochées. Plus on s'éloigne vers la périphérie de la zone d'étude, plus la diminution est faible. Là aussi, cette diminution se voit à travers les courbes des isovaleurs qui deviennent de plus en plus éloignées.

La figure 4.25 et les valeurs des perméabilités obtenues laissent penser que dans l'axe R3B-R3C, le sol est plutôt de type limono-sableux et que vers la périphérie le sol devient limono-argileux.

Rapport-Gratuit.com

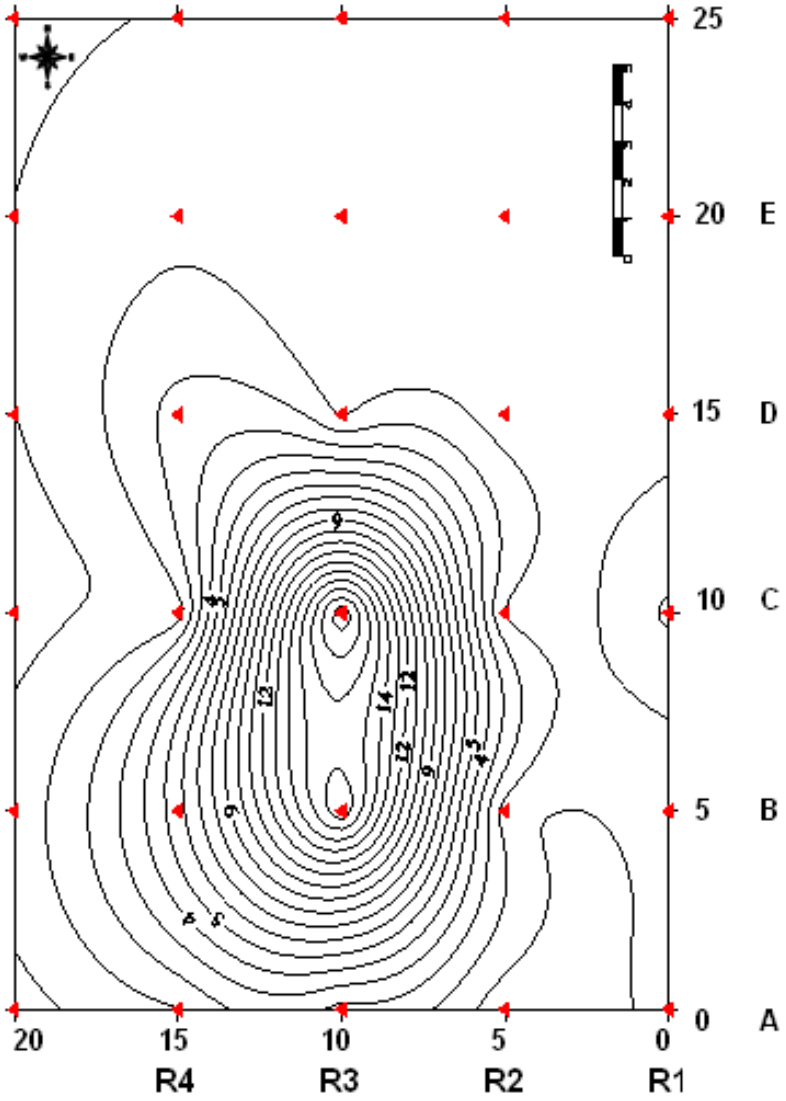


Figure 4.25 : Carte des perméabilités du site d'étude (Kfs en 10^{-4}cm/s)

IV.2.5. Carte du potentiel hydrique

De la même manière, la figure 4.26 a été dressée. Celle-ci représente la variation du potentiel hydrique dans le plan. Cette figure montre que la valeur la plus élevée se situe au point R3C et que la diminution varie selon les diagonales du site avec une diminution rapide dans le sens R1A-R4E que dans le sens R4A-R1E. Ceci est visible à travers les courbes des isovaleurs qui sont proches les unes des autres dans le premier sens que dans le second.

En comparaison avec la carte des perméabilités, on constate que la variation n'est pas tout à fait analogue. Les perméabilités diminuent à partir d'un axe central et diminue en se projetant vers la périphérie alors que le potentiel hydrique diminue à partir d'un point central dans le sens des diagonales du site d'étude.

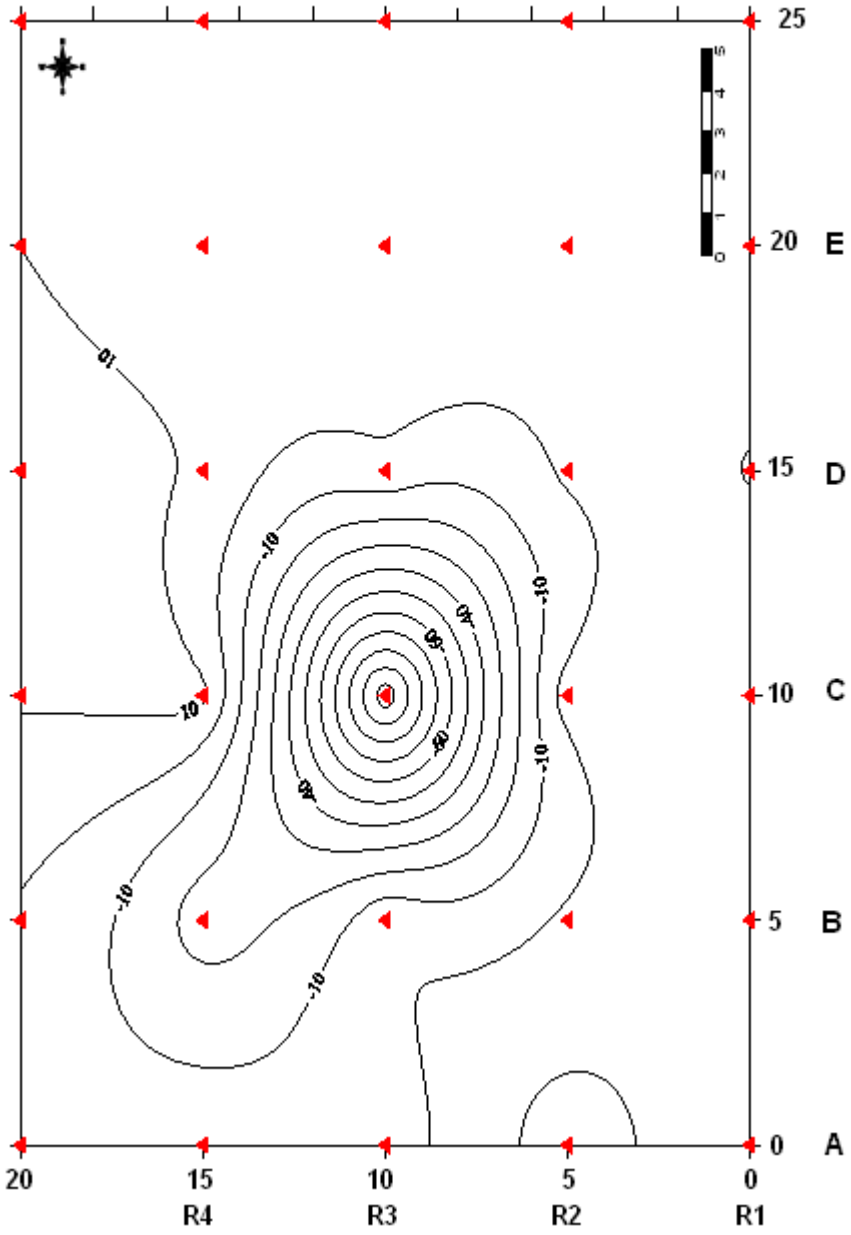


Figure 4.26 : Carte des potentiels hydriques du site d'étude (ϕ_m en 10^{-4} cm²/s)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

IV.2.6. Carte de l'absorption

La figure 4.27 illustre la variation de l'absorption sur le site de l'étude. Les valeurs les plus élevées sont observées au niveau des points D et C de la rangée R4 et au niveau du point A de la rangée R2. Cela s'explique pour les premiers points par l'influence des racines d'arbres relevées en ces endroits et pour le dernier point par la présence de sol argileux.

L'absorption diminue sur le site en partant à peu près de l'axe représenté par les points R4C-R4D et en allant vers la périphérie du site. Cette variation est un peu semblable à celle de la perméabilité mais en partant d'un axe légèrement décalé.

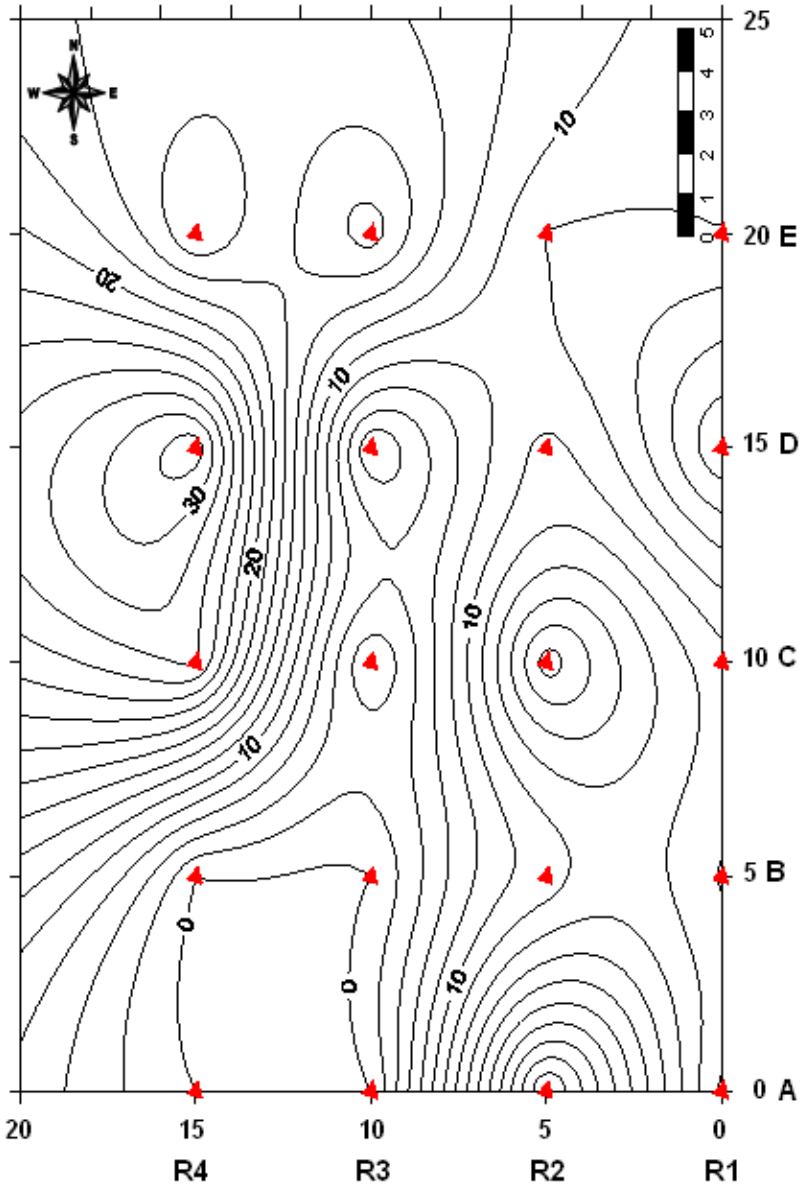


Figure 4.27 : Carte des absorptions sur le site d'étude (S en 10^{-2} cm/s)

IV.2.7 La superposition des cartes

La figure 4.28 représente une superposition des trois cartes dressées dans ce qui a précédé. D'une manière générale, on peut observer que la variation des trois paramètres respecte les relations qui existent entre eux. C'est-à-dire que là où on enregistre un potentiel hydrique fort, on enregistre aussi une absorption forte et une perméabilité faible.

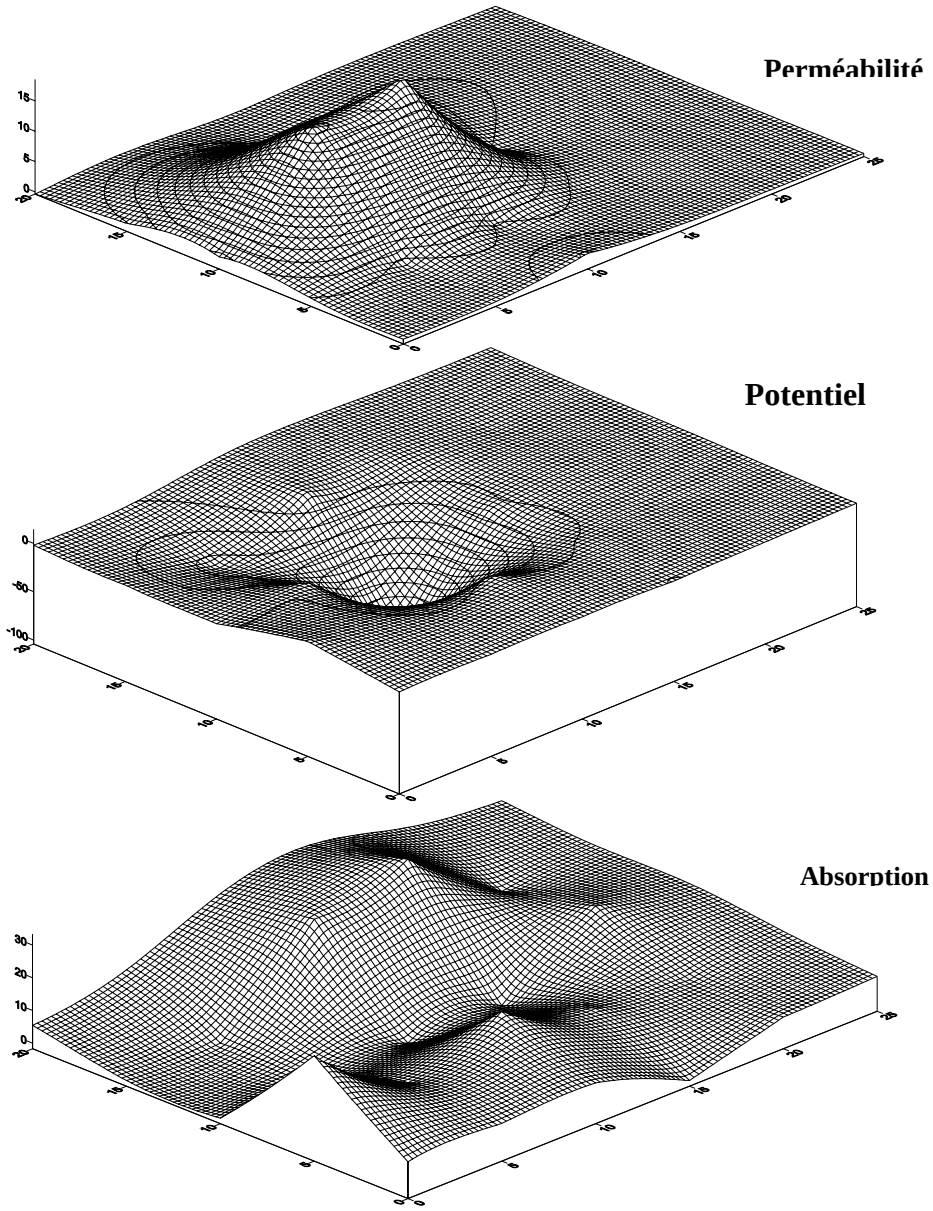


Figure 4.28 : Superposition des cartes de la perméabilité, du potentiel hydrique et de l'absorption du site d'étude

Par contre, le sens de variation n'est pas tout à fait identique. Ceci est dû essentiellement à la présence de racines en quelques endroits qui modifient les propriétés du sol principalement en ce qui concerne l'absorption et aussi aux légères différences des conditions météorologiques (principalement la pluie) qui prévalaient lors de la prise des mesures.

Il faut noter que quand le potentiel hydrique ou l'absorption augmente, la perméabilité diminue.

IV.3. Analyse des résultats de la succion

IV.3.1. Courbes de succion

Nous avons analysé dans ce qui a précédé les résultats des mesures concernant la perméabilité, le potentiel hydrique et l'absorption. Dans ce qui suit, nous allons examiner la variation de la succion en fonction de certains paramètres comme la température, la pluie ou les racines de la végétation. Il est évident que ces deniers influent sur la succion.

IV.3.1.1. L'influence de la température

Nous n'avons pas mesuré la température mais nous estimons que généralement celle-ci est douce pendant la nuit et est maximale pendant la journée entre 14H et 16H ou 17H. Pour cela, nous avons tracé, à titre d'exemple, la variation de la succion en fonction des heures de la journée du puits R2D.

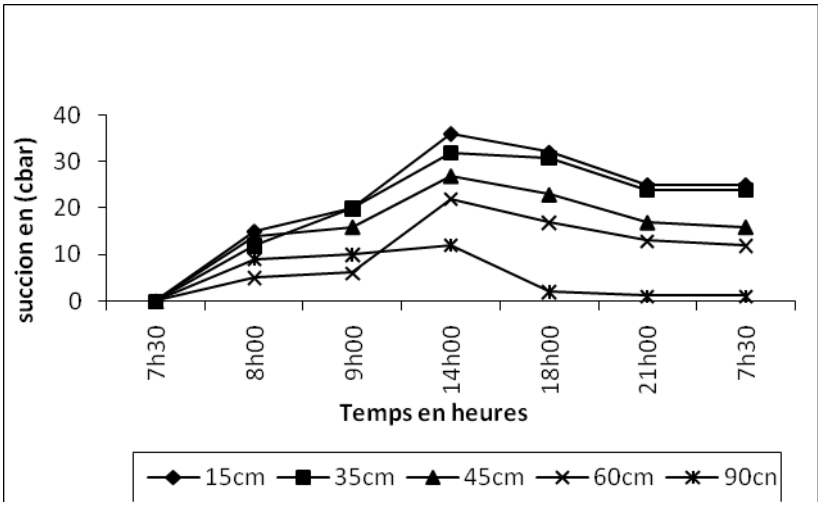


Figure 4.29 : Courbes de succion en fonction du temps pour différentes profondeurs R2D (21/04/2003).

La remarque principale qui se dégage de cette figure est que la succion commence à augmenter d'une manière un peu régulière du début de la journée (7H30) jusqu'à vers 14H. Ensuite, la succion prend une tendance de diminution plus ou moins régulière aussi jusque vers la fin de la journée. Après cela, elle se stabilise pendant la nuit.

Nous pensons que cette façon de varier est due à la température et à la végétation présente sur le site. En effet, du matin jusqu'au alentour de 14H, la température augmente induisant une évaporation ou évapotranspiration de l'eau. Pendant la baisse de la température qui se produit dès le début de l'après-midi, l'eau aura moins tendance à s'évaporer et les plantes auront moins besoin d'eau pour leurs mécanismes de nuit.

IV.3.1.2. L'influence de la pluie

La pluie joue un rôle très important sur la succion dans la mesure où cette dernière en saturant les premières couches de sol conduit à la diminution de celle-ci. Ce phénomène est confirmé par les résultats expérimentaux obtenus tel que le montrent les figures ci-dessous.

La figure 4.30 correspond à une journée sans pluie alors que celle 4.31 est relative à une journée dont la pluie moyenne qui est tombée est de 4,5 mm. Nous signalons que les mesures relatives à la journée pluvieuse ont été prises le lendemain.

Ce que nous pouvons constaté c'est que les succions mesurées après une journée de pluie sont beaucoup plus faibles que celles mesurées pendant une journée sèche. Ceci est dû au fait que la pluie contribue à la saturation du sol et, par conséquent, à la diminution de la succion. En outre, en temps sec, la succion est plus élevée sur les couches supérieures du sol, ceci à cause du fait que ce sont ces couches qui sont les plus influencées par la fluctuation de la température et l'évaporation ainsi que par l'aspiration des racines de la végétation. Enfin, nous constatons qu'après la journée pluvieuse, la succion varie peu pendant la journée. Ceci revient aux caractéristiques du sol et au temps de filtration.

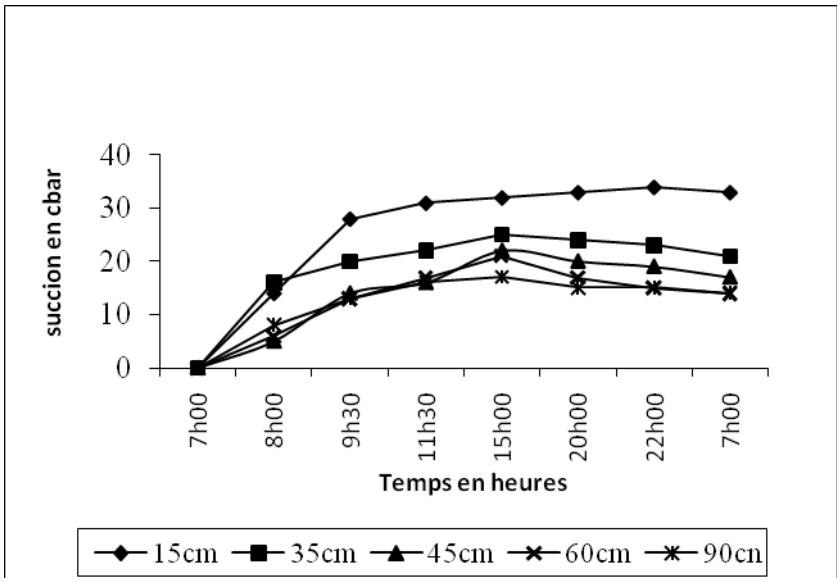


Figure 4.30 : Courbes de la succion en fonction du temps du puits R3B (25/03/2003)

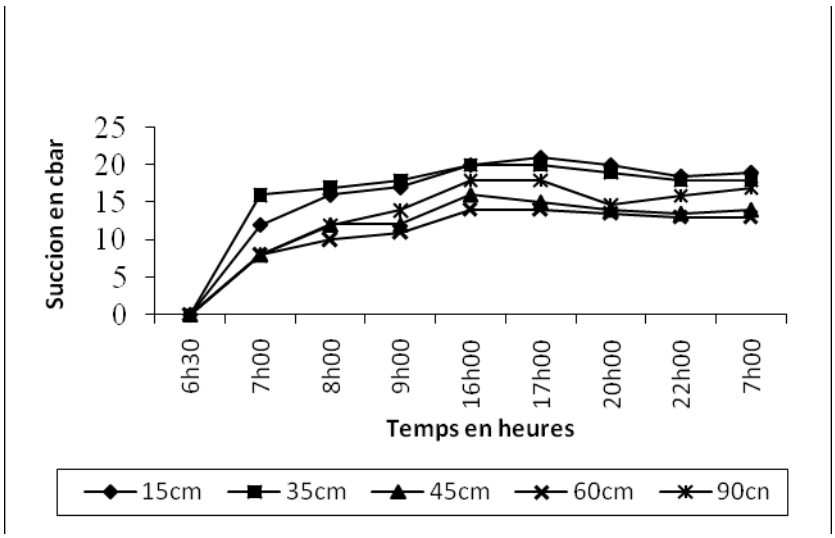


Figure 4.31 : Courbes de succion en fonction du temps du puits R3D (27/03/2003 ; pluie de 4,5 mm)

IV.3.1.3. L'influence des racines

La présence d'arbres sur le côté ouest du terrain d'expérimentation fait que la présence des réseaux des racines influe directement sur la succion dans les environs de cette région.

Nous avons représenté sur les figures 4.32 et 4.33 respectivement la variation de la succion en fonction des horaires de la journée pour le trou RE4 (Celui qui est le plus proche des racines) et la variation de la succion à un mètre de profondeur de toute la rangée 1.

Ces figures montrent d'une manière générale que la succion a tendance à décroitre pendant la journée, qu'elle est souvent plus forte en surface qu'en profondeur. Les explications, nous pensons que c'est à cause de la température qui augmente sensiblement pendant la journée et qui font que les racines de la végétation ont plus tendance à aspirer plus d'eau pendant la matinée. Cette aspiration s'atténue vers la fin de la journée.

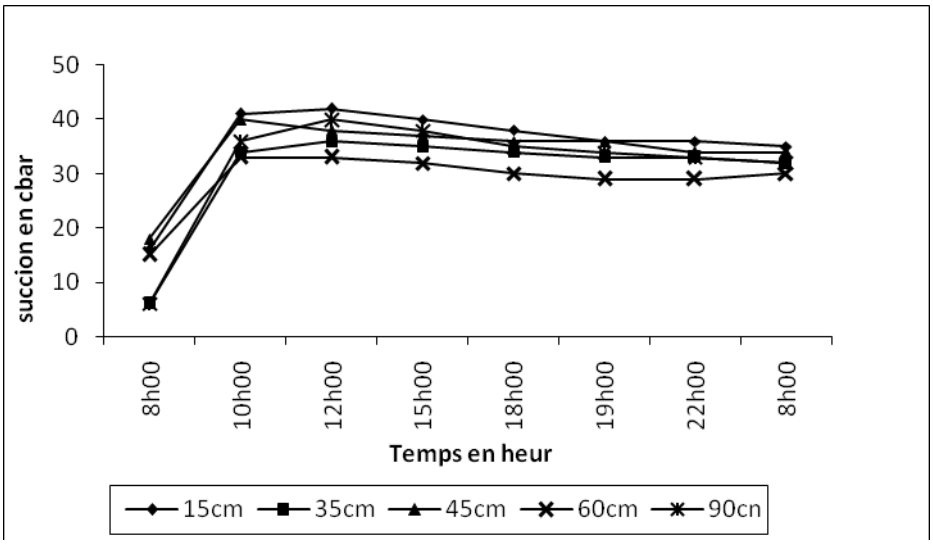


Figure 4.32 : Courbes de succion en fonction du temps en présence des racines (Puits R4E, 13/05/2003)

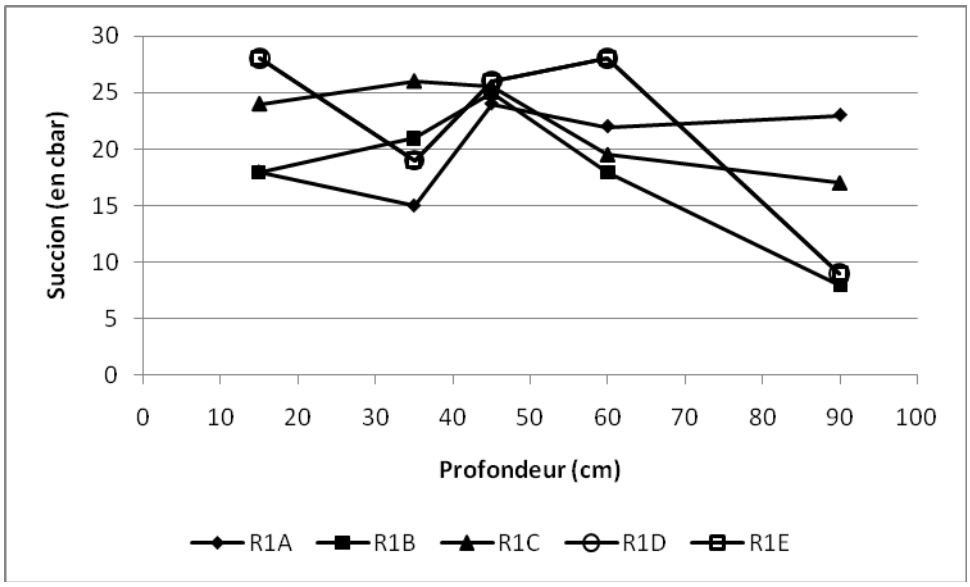


Figure 4.33: Les Courbes de la succion en fonction de la profondeur pour la rangée R1

La figure 4.33 ci-dessus représente la variation de la succion le long de la rangée 1. Quand on regarde de près cette figure, on remarque que cette variation est complexe et l'explication n'est pas évidente. On peut bien sûr observer que trois trous (B, D et E) voient la

succion supérieure en surface qu'en profondeur. Cette remarque est valable aussi pour les deux autres trous (A et C) mais avec moins d'intensité.

Cette différence de la succion entre la surface du sol et en profondeur dans les différents trous est due à la présence des racines dont l'activité est importante dans la zone supérieure du sol. Cette tendance de variation est retrouvée le long de la rangée 2 où l'on constate comme il est montré sur la figure 4.34 des valeurs de succion supérieures en surface qu'en profondeur.

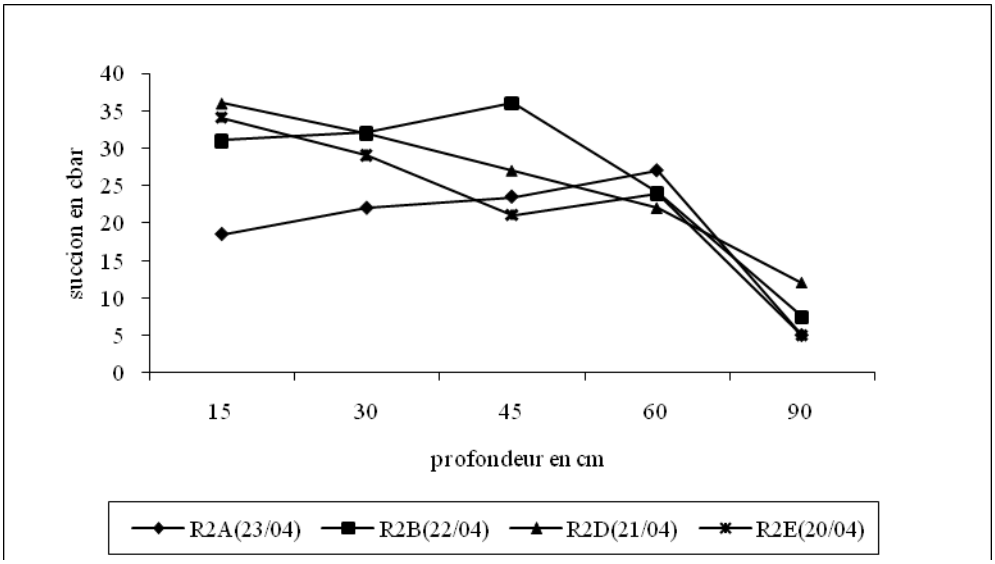


Figure 4.34 : Courbes de succion en fonction de la profondeur pour la Rangée R2

Ces tendances ne sont pas retrouvées en ce qui concerne les rangées 3 et 4 dont les variations de la succion en fonction de la profondeur sont respectivement représentées sur les figures 4.35 et 4.36. On notera que la figure 4.35 relative à la rangée 3 ne présente pas de tendance cohérente. Le trou R3A présente une valeur élevée de la succion en surface. Celle-ci diminue pour ensuite augmenter. Le trou R3B présente une courbe qui évolue peu en profondeur par contre les trous R3C et R3D présentent une succion plus élevée en profondeur. Enfin le trou R3E présente une succion plus faible en profondeur.

Il faut noter que les résultats présentés sur cette figure n'ont pas été prise le même jour. Les conditions météorologiques peuvent être à l'origine de ces différences dans le comportement du sol vis-à-vis de la succion.

Ces remarques peuvent être étendues à la rangée 4 avec nuance. En effet, la majorité des courbes présentent des évolutions faibles avec des succions plus élevées en profondeur saur la courbe du trou R4A qui présente une succion qui diminue avec la profondeur.

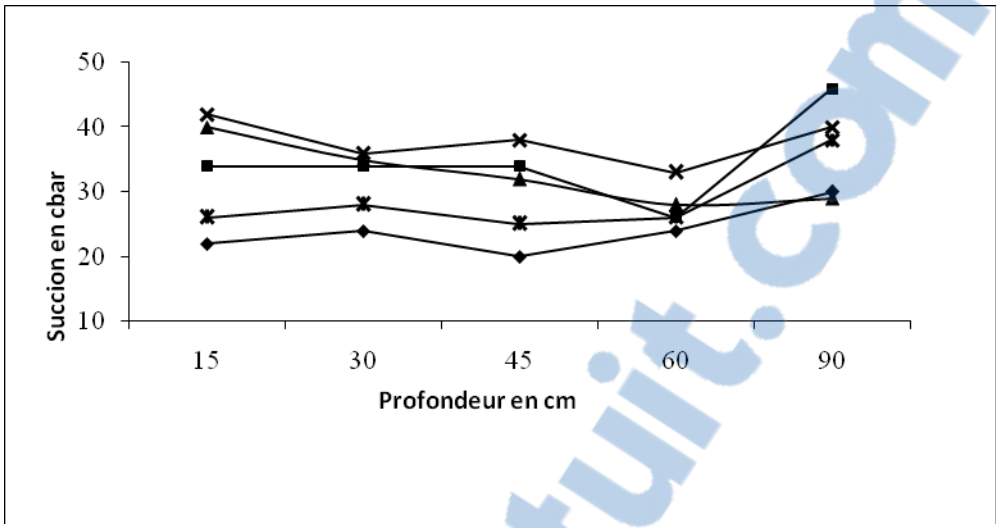


Figure 4.35 : Les Courbes de succion en fonction de la profondeur pour la Rangée R3

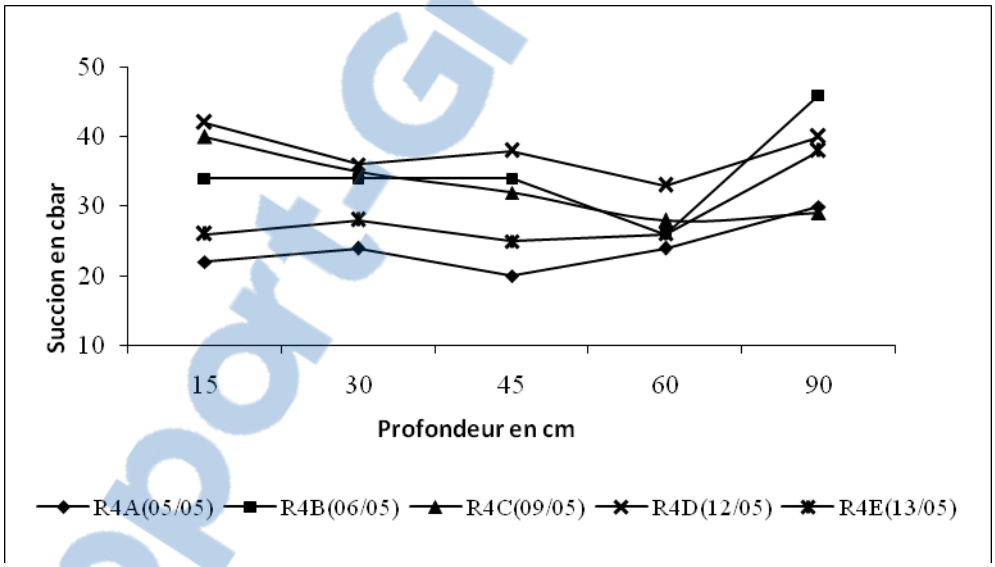


Figure 4.36 : Les Courbes de succion en fonction de la profondeur pour la rangée R4

Les remarques formulées ci-dessus sont encore plus visibles sur les figures 4.37, 4.38, 4.39 et 4.40 sur lesquelles sont représentées les variations de la succion en fonction de la profondeur pour l'ensemble des rangées. On constate que les courbes 4.37 et 4.38 où la tendance est à la diminution de la succion en fonction de la profondeur. Ceci à cause de la saturation qui est souvent plus élevée en profondeur et que cette dernière met beaucoup plus de temps pour réagir aux fluctuations des conditions climatiques. Pour les figures 4.39 et 4.30, les tendances sont plus difficiles à dégager.

Rapport-Gratuit.com

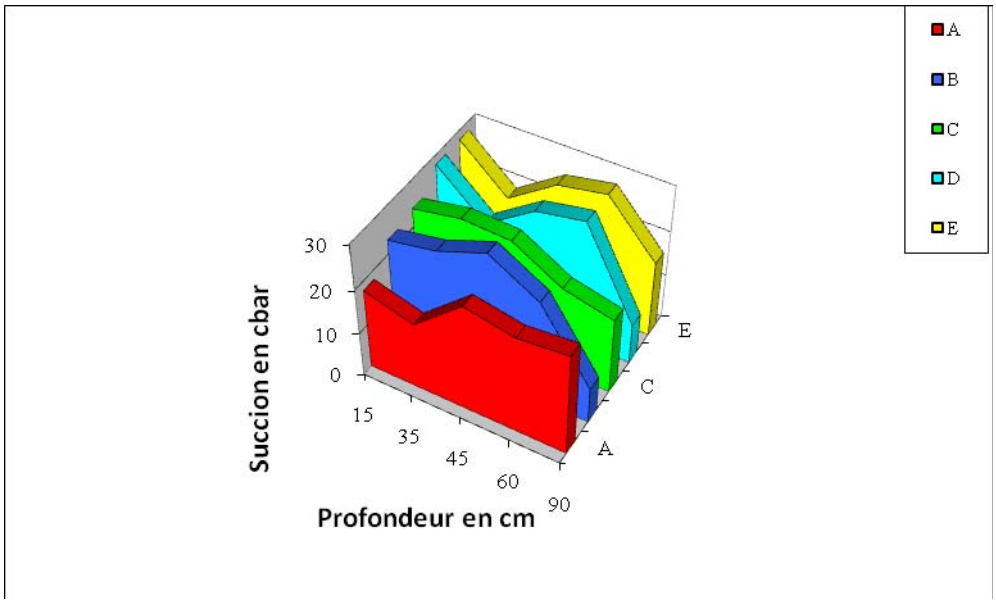


Figure 4.37 : Courbes de variation de succion en fonction de la profondeur pour la rangée R1

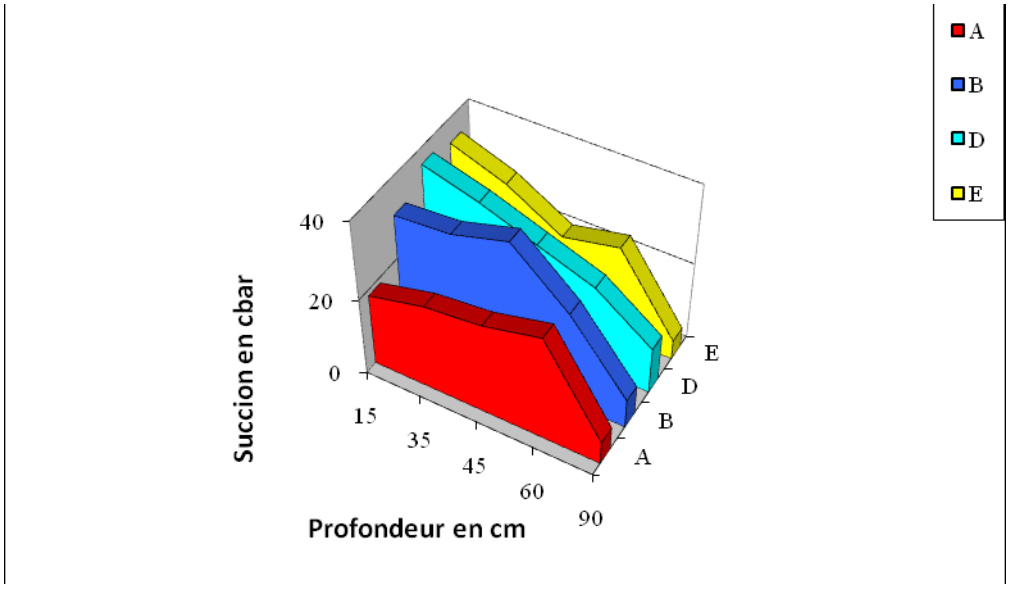


Figure 4.38: Courbes de variation de succion en fonction de la profondeur pour la rangée R2

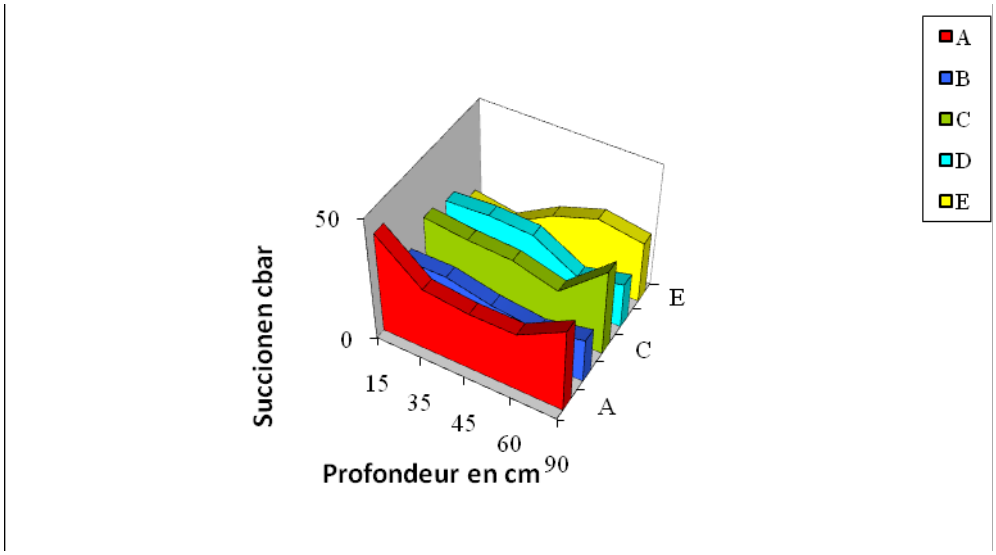


Figure 4.39: Courbes de variation de succion en fonction de la profondeur pour la rangée R3

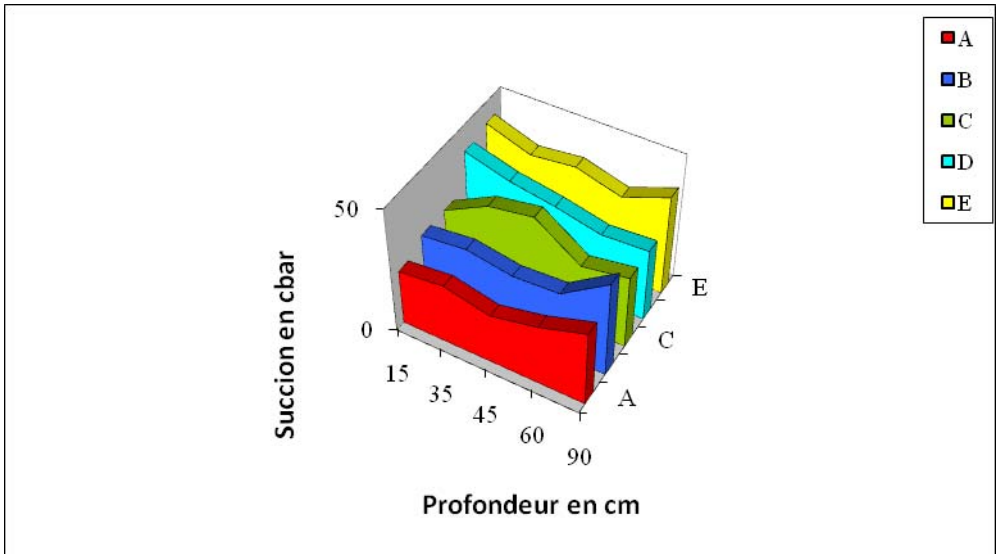


Figure 4.40: Courbes de variation de succion en fonction de la profondeur pour la rangée R4

Comme conclusion principale de cette partie, nous pensons que le terrain peut être divisé en deux parties. La première partie contient les rangées R1 et R2 et où la succion diminue en fonction de la profondeur (dans le sens de la saturation). La deuxième partie est constituée des rangées 3 et 4 où les valeurs de la succion mesurées en profondeur sont élevées. Ceci est dû à la présence des racines de la végétation et d'une couche d'argile sableuse à cette profondeur.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

IV.4. Analyse des résultats de la teneur en eau

L'autre paramètre lié à la perméabilité, le potentiel hydrique et la succion est la teneur en eau. Cette dernière joue un rôle important dans le comportement des sols. Pour cela, nous avons effectué des mesures de celle-ci sur le site. Nous présentons dans ce qui suit les résultats les plus représentatifs.

IV.4.1. Courbes de variation journalière de la teneur en eau

Pour illustrer la variation de la teneur en eau en fonction du temps d'une journée, nous représentons sur la figure 4.41 les résultats des mesures effectués sur le trou R2A le 16 mai 2003.

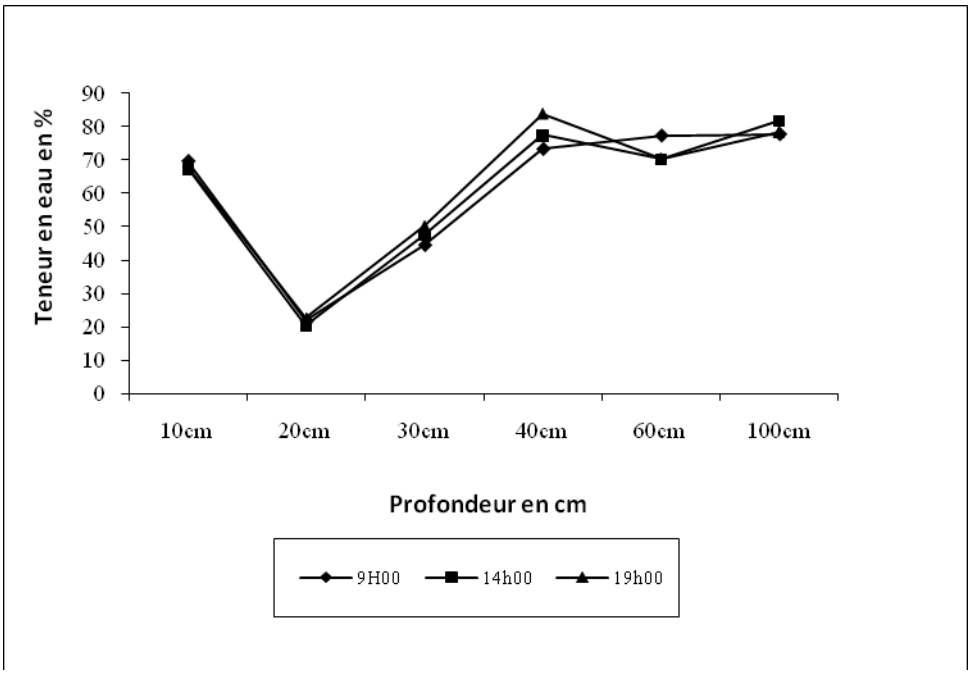


Figure 4.41 : Courbes de variation de teneur en eau dans la journée (R2A ; 16/05/2003)

Cette figure montre clairement que, en dehors d'interférences significatives extérieures, la teneur en eau change peu pendant la journée. Nous constatons que les courbes se superposent presque. Nous constatons aussi que la teneur en eau présente une valeur assez élevée pour chuter un peu et enfin suivre une courbe croissante pour se stabiliser au-delà de 40 cm.

IV.4.2. Courbes de variation de la teneur en eau en fonction de la profondeur

En plus de la variation de la teneur en fonction du temps de la journée, nous allons examiner la variation de celle-ci en fonction de la position spatiale sur le site d'étude. Les figures 4.42, 4.43, 4.44 et 4.45 sont relatifs à ce point.

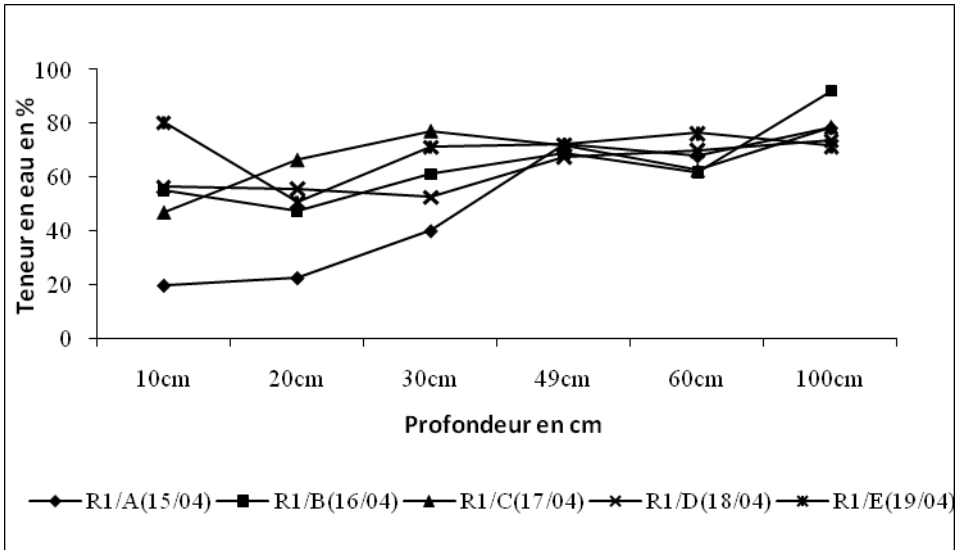


Figure 4.42 : Courbes de teneur en eau on fonction de la profondeur pour la rangée R1

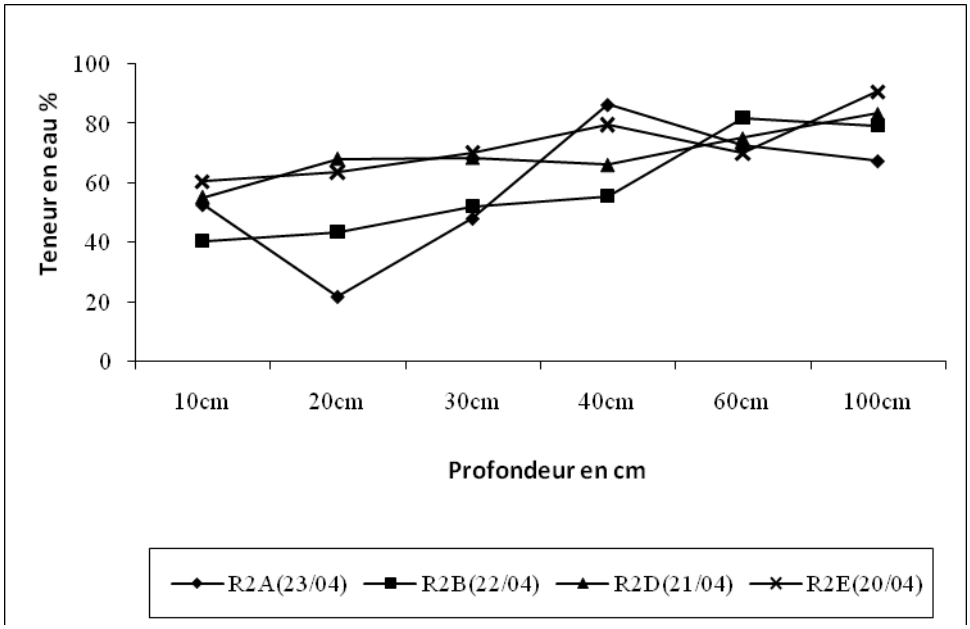


Figure 4.43 : Courbes de teneur en eau en fonction de la profondeur pour la Rangée R2

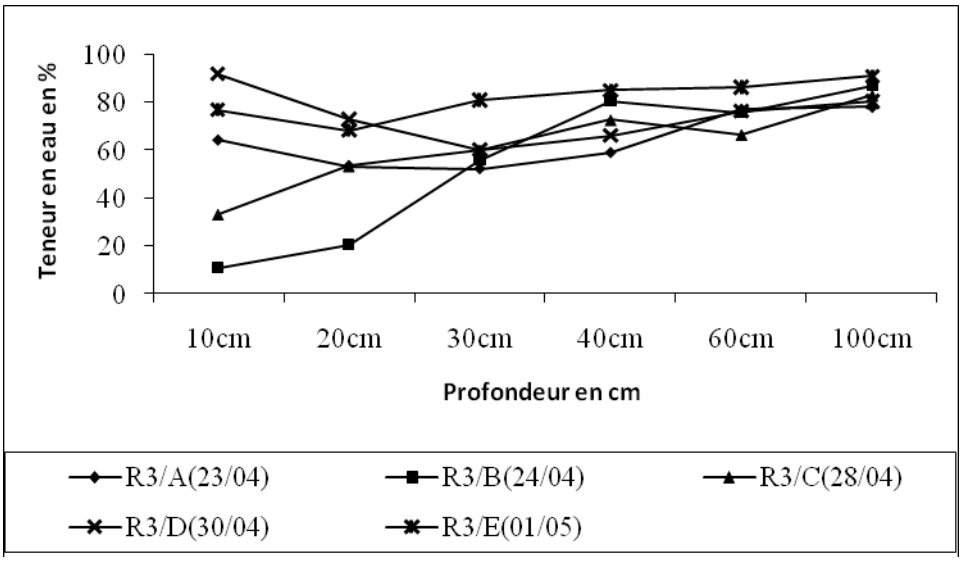


Figure 4.44: Courbes de teneur en eau en fonction de la profondeur pour la Rangée R3

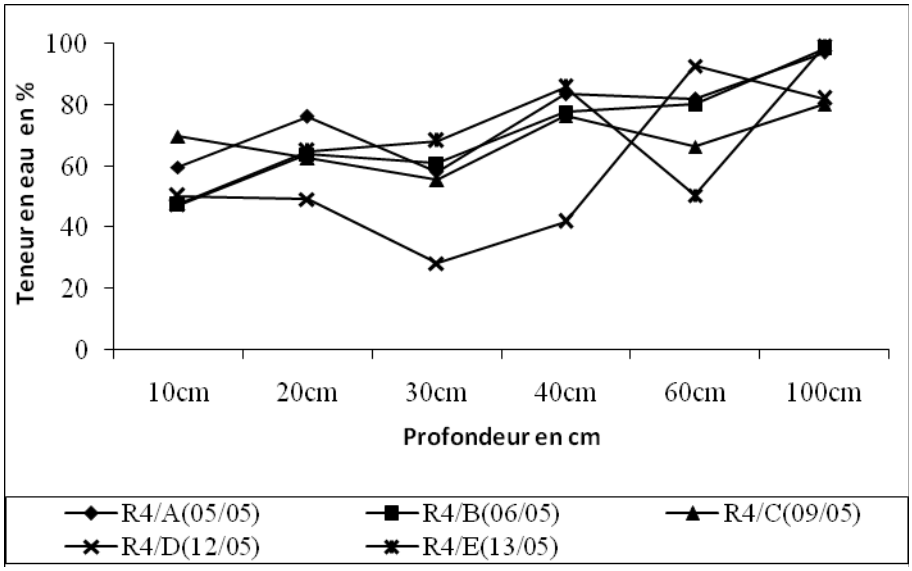


Figure 4.45 : Courbes de teneur en eau en fonction de la profondeur pour la Rangée R4

A la lumière de figures ci-dessus, nous pouvons dire que généralement, la teneur en eau augmente avec la profondeur, ceci est constaté sur la majorité des courbes. Ce phénomène est dû à l'infiltration de l'eau dans les profondeurs sous l'effet de la gravité.

De temps à autre, cette constatation n'est pas vérifiée. En effet, nous remarquons que la valeur de la teneur en eau est plus élevée en surface qu'en profondeur pour R1D (Figure 4.42), R2A (Figure 4.43) et R4D (Figure 4.45). Les raisons en sont nombreuses. Nous pensons que c'est dû principalement à la présence de passées argileuses ou sableux-argileuses qui retiennent l'eau plus longtemps.

IV.4.2.1. Cartes de la teneur en eau

Il est tout à fait évident que la teneur en eau des sols dans la nature dépend en premier lieu de la pluviométrie. Ensuite viennent des facteurs qui vont influencer la variation de celle-ci. C'est pourquoi, nous pouvons dire que, pour une même profondeur, les mesures ont montré que la teneur en eau varie peu quelque soit le trou considéré. Dans certains endroits, le taux d'humidité est beaucoup plus faible que celui enregistré en profondeur, ceci est dû à la présence de la végétation à proximité. Dans d'autres endroits, la teneur en eau est plus élevée en surface à cause de la nature du sol en surface. Ce dernier étant argileux, il retient l'eau beaucoup plus longtemps et l'infiltration met du temps.

La compilation des valeurs de la teneur en eau de la ligne D montrent qu'à chaque fois la valeur est plus élevée en surface qu'en profondeur, ceci confirme la présence de passée argileuse retenant l'eau beaucoup plus longtemps. De même, les valeurs de la teneur en eau de la rangée 4 sont souvent inférieures à celles des autres lignes. La végétation qui se trouve à proximité est la cause de ce phénomène.

IV.4.3. Corrélation entre teneur en eau et succion

Il est généralement admis que quand le taux d'humidité augmente dans un sol, la succion diminue. Nous avons voulu examiner ce point en comparant les valeurs de ces deux paramètres mesurés in situ. Pour cela, nous avons dressé les figures 4.46 et 4.47 suivantes. La première figure représente la corrélation entre la teneur en eau et la succion pour la rangée 3 à 1 mètre de profondeur alors que la seconde figure représente la corrélation entre ces mêmes paramètres pour la rangée 3 mesurés le 29 avril 2003. Ce qui ressort de ces deux figures est que la corrélation est faible pour le premier cas et acceptable pour le second cas. Le fait que les corrélations ne sont pas identiques et qu'elles ne sont très fortes est dû à l'hétérogénéité du site que ça soit au regard à la nature du sol ou à la présence de végétaux. A cela, il faut ajouter les conditions climatiques qui peuvent influencées énormément la variation de ces paramètres (vent, température, pluie, etc.).

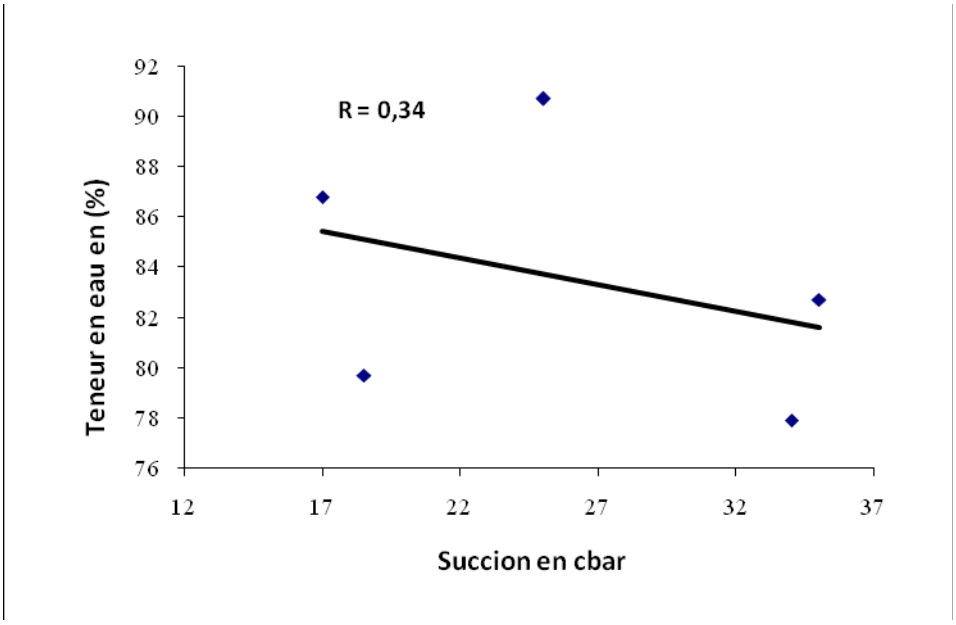


Figure 4.46 : Courbe de relation entre la teneur en eau et la succion pour le rangé R3 à 100 cm

Figure 4.47 : Courbe de relation entre la teneur en eau et la succion pour la rangé R3D du 29 avril 2003

Pour montrer que ces corrélations faibles sont dues aux difficultés de cerner tout les paramètres in situ, nous avons pensé mener une étude au laboratoire. Les détails sont donnés ci-après.

IV.4.3.1. Mesure en laboratoire

L'étude au laboratoire a consisté à prendre un sol et le mettre dans une caisse en bois (Voir la photo 4.1) dont les dimensions sont :

- Hauteur : 1 mètre,
- Longueur et largeur : 0,5 mètre.

Nous avons tenté de reproduire le profil du sol in situ sachant que ce dernier est très hétérogène. Nous avons donc décidé du profil suivant :

- Première couche : 30 cm de terre végétale,
- Deuxième couche : 25 cm de limon argileux,
- Troisième couche : 20 cm de cendre,
- Quatrième couche : 25 cm de limon sableux.

Nous avons placé un fond de gravier pour éviter l'emprisonnement des bulles d'air et pour permettre au sol de tasser.

Pour doter le sol de teneur en eau et de voir l'effet de l'infiltration, nous avons versé une certaine quantité d'eau en surface. Pour les mesures, nous avons utilisé les mêmes appareils et adopté le même mode opératoire que celui suivi in situ.

On a pris une quantité de sol à la profondeur d'un mètre, tel que l'ordre des couches est respecté du haut jusqu'au le bas, on a posé cette quantité dans une caisse de bois de dimensions (H = 1 m, L =l = 0,5 m). Pour assurer l'infiltration on a fait des trous puis une couche de gravier tout en bas, et pour éviter les bulles d'air et assurer le tassement du sol, on a versé une quantité d'eau dans la caisse. Les mesures s'effectuent après l'infiltration de l'eau versée et le mode opératoire de mesure est suivi comme sur le terrain. Les mesures ont été effectuées pendant une semaine, du 28 avril au 5 juin 2003. Les résultats obtenus sont illustrés ci-après.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Photo 4.1 : Placement des appareillages sur caisson de laboratoire

IV.4.3.1.1. Variation de la succion au cours du temps pour différentes profondeurs

Les résultats obtenus tels que représentés sur la figure suivante montre que le profil de la succion est identique pendant les 5 jours de mesure. Que cette succion varie peu mais diminue quand même quand les jours passent. Ceci est dû au fait que l'eau s'infiltre et augmente la teneur en eau qui conduit à la diminution de la succion (Cette diminution est faible).

La valeur de la succion est légèrement supérieure à 15 cm qu'à 30 cm. Cette valeur augmente ensuite entre 45 cm et 60 cm pour se stabiliser ou légèrement diminuer tout en bas. L'explication réside dans la nature des couches placées de haut en bas. En effet, la terre végétale laisse l'eau s'infiltrer rapidement. Par contre la couche d'argile la retient beaucoup plus longtemps. La stabilité ou la diminution tout en bas du profil adopté est dû à la nature de la dernière couche qui est un limon sableux et à la couche de gravier placée au fond, cette dernière étant très drainante.

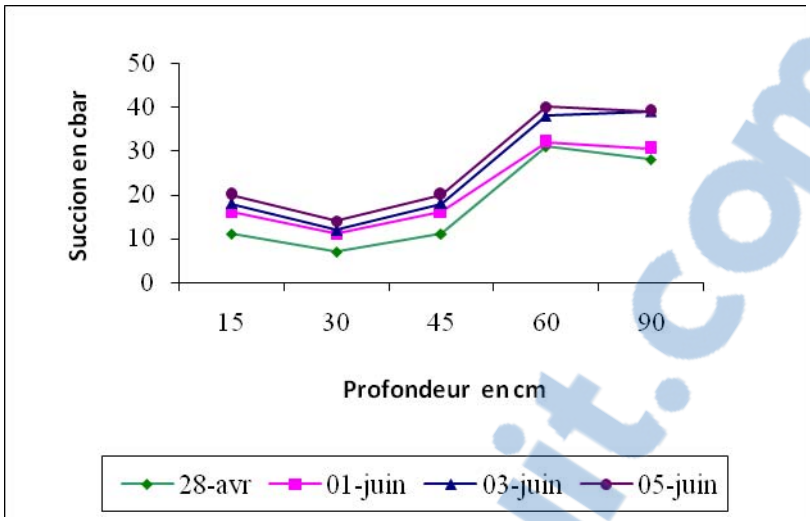


Figure 4.48 : Courbes de variation de la succion au cours du temps pour différentes profondeurs au laboratoire

IV.4.3.1.2. Variation de la teneur en eau au cours du temps pour différents profondeurs

La figure 4.45 ci-après représente la variation de la teneur en eau en fonction de la profondeur des 5 jours de mesure. Ce qui est remarquable, c'est que les courbes obtenues se superposent parfaitement montrant que la variation de la teneur en eau ayant conduit à la variation de la succion ne sont très perceptible. Ceci nous pousse à penser que de très faibles variations de la teneur en eau conduisent à une variation sensible de la succion.

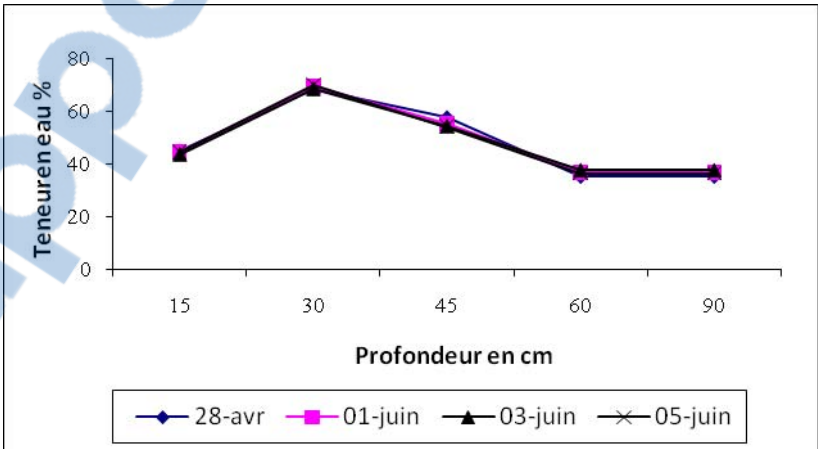


Figure 4.49 : Courbes de la variation de teneur en eau à différentes profondeurs en laboratoire

Rapport-Gratuit.com

Le second point à noter sur la base des courbes de la figure confirme le fait que la succion diminue quand la teneur en eau augmente. Ceci est très visible en comparant les allurées des courbes des figures 4.44 et 4.45. En effet, les premières varient dans un sens quand les secondes varient l'autre.

IV.4.3.1.3. Relation entre la teneur en eau et la succion

L'autre fait saillant de cette étude comparative entre les mesures in situ et celles de laboratoire est la qualité de la corrélation entre les valeurs de la succion et de la teneur en eau. En effet, la corrélation obtenue et donc l'illustration est donnée sur la figure 4.46 est très bonne avec un coefficient de 0,86. La relation est de type puissance.

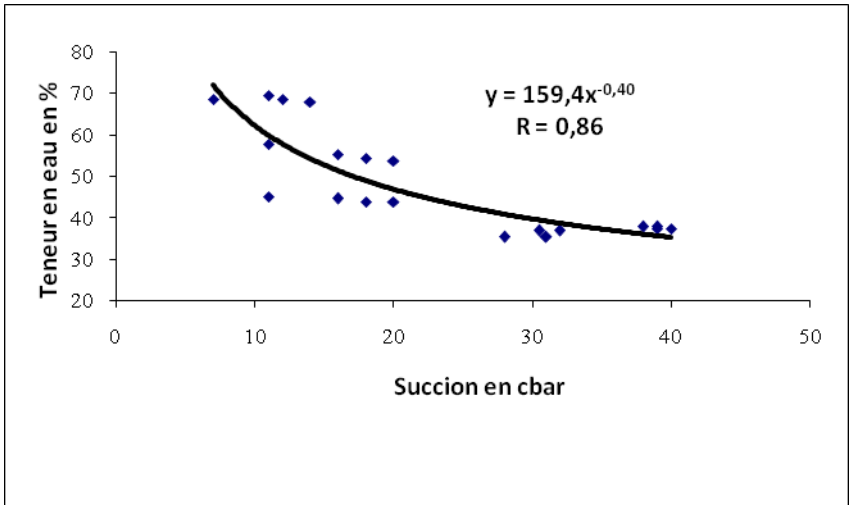


Figure 4.50 : Courbe de relation entre la teneur en eau et la succion au laboratoire

IV.5. Conclusion

Ce chapitre réservé aux mesures in situ et au laboratoire de la perméabilité, de la succion et de la teneur en eau montre d'abord la difficulté de cerner tous les paramètres et de contrôler les conditions d'essais quand il s'agit de réaliser une étude in situ. Ces difficultés ont deux origines principales : l'hétérogénéité des sols et la variation aléatoire des conditions climatiques. Ce commentaire trouve son fondement sur la qualité des courbes et de la corrélation obtenues lors de l'étude au laboratoire.

Concernant les paramètres mesurés, les résultats montrent que les valeurs de la perméabilité se situent 10^{-7}et 1.88 10^{-5} m /s (un rapport de presque 200), les valeurs du potentiel hydrique se situent entre 10^{-8} et 1.49 10^{-7} m^2 /s. Le paramètre α vari de 0 à 28.57 m^{-1} et l'absorption (S) de 0 à 33.36 10^{-4} $m/s^{1/2}$.

Ces résultats montrent aussi que la présence de la végétation au alentour d'un site influe directement et d'une manière importante sur la teneur en eau et sur la succion.

CONCLUSION GENERALE

La mesure in situ des paramètres des sols revêt une importance particulière car le sol se trouverait dans son état naturel. Il n'est pas perturbé par le prélèvement et le transport des échantillons. Même si les mesures restent ponctuelles, le volume de sol n'est plus limité comme dans le cas des études de laboratoire. Cette étude est menée dans ce cadre. Elle consiste à analyser la variation in situ des paramètres que sont la perméabilité non saturé, le potentiel hydrique et la teneur en eau. Ces paramètres gouvernent, avec d'autres, le comportement des sols vis-à-vis de certains phénomènes comme le tassement, le gonflement, le glissement, etc.

Les appareils utilisés sont le perméamètre de Guelph pour la perméabilité. Ce dernier est basé sur le principe de l'écoulement à charge constante dans le sol. Cet essai permet de mesurer les variations de débit pour différentes charges hydrauliques appliquées dans un trou. La teneur en eau fut mesurée à l'aide de la sonde de profil PR1 de Delta-T devices. Le fonctionnement de cet appareil est basé sur un concept électromagnétique pour déterminer cette teneur en eau. C'est ce qu'on appelle une mesure indirecte puisque ce n'est pas la teneur en eau qui est mesurée par l'appareil mais son effet sur la propagation d'ondes électromagnétiques. La succion quant à elle fut mesurée à l'aide d'un tensiomètre à bougie poreuse. Cet appareil permet de mesurer la succion du sol en mesurant en quelques la dépression provoquée par celui-ci quand il aspire l'eau pour équilibrer les pressions. Ces appareils ont fait leurs preuves et sont très utilisés que ça soit dans le cadre des travaux de recherche ou dans des travaux d'ingénierie.

Le site qui a servit à cette étude est celui de l'école polytechnique des ingénieurs de Lille (EPIL). C'est un site propice à ce genre d'étude car il à proximité de l'Université et il est suffisamment équipé.

Les conclusions qui émanent de cette étude sont pour certaines évidentes, pour d'autres plus pertinentes. Ainsi, la perméabilité non saturé dépend essentiellement de la nature du sol et du degré de saturation de celui-ci. Ainsi, sur le site, nous avons trouvé des valeurs importantes quand il s'était question de sol limoneux-sableux (rangée 3) alors que ces valeurs étaient très faibles quand l'endroit contenait des particules argileuses (Rangée 2). Les racines de la végétation augmentent généralement la perméabilité. Ceci a été visible sur la rangée 4.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

L'influence de ces facteurs se retrouve sur le potentiel hydrique et sur la variation de la teneur en eau. Il est évident qu'à chaque fois où le sol s'est trouvé dans un état de saturation donnée à cause de la pluie, le potentiel hydrique a diminué. En même temps, quand le sol était de nature limoneuse ou limoneux-sableux, le potentiel hydrique était plus ou moins faible alors que quand il était de nature argileuse, le potentiel hydrique augmente. C'est le cas de la teneur en eau, où d'une manière générale, augmente avec la profondeur à cause de l'infiltration de l'eau sous l'effet de la gravité. Par contre, par endroit, ce principe n'est pas observé soit parce que le sol contient des particules argileuses et empêchent l'eau de s'infiltrer rapidement, soit parce que des racines de la végétation participent à assécher un peu le sol lui diminuant sa teneur en eau.

L'autre apport principal qui ressort de cette étude est le fait qu'il est très difficile, voire impossible, de maitriser les conditions d'une étude in situ car le climat n'est pas maitrisable. A cela s'ajoute les hétérogénéités qui peuvent être non perceptibles en surface. Ceci a été évident avec les résultats de l'étude menée au laboratoire où toutes les logiques sont respectées. La perméabilité est forte pour les sols limoneux-sableux, la teneur en eau augmente avec la profondeur, les passées argileuses ont des perméabilités faibles et retiennent l'eau, d'où une forte teneur en eau. La corrélation entre la teneur en eau et la succion est de mauvaise à moyenne quand il s'était agit de l'étude in situ alors qu'elle était devenue bonne dans l'étude de laboratoire.

L'autre point notable lors de cette étude au laboratoire est le fait que pour un même point, la variation de la teneur qui a été presque imperceptible a donné une variation de la succion mesurable. Ceci nous a conduits à penser que de faibles variations de la teneur en eau conduisent à des variations significatives de la succion.

BIBLIOGRAPHIE

[1] AMRAOUI N. (1992) - Etude de l'infiltration dans les sols fin non saturés - Thèse de doctorat, INPL, Nancy, 320 p.

[2] BAKKARI A., (2006), - Observation et modélisation d'ouvrages en terre soumis à des processus de séchage et d'humidification - Thèse de Doctorat en géotechnique, Ecole Nationale des ponts et Chaussées, Paris (France), 2006.

[3] BROOKS R. H., COREY A.T. (1964) – Hydraulic properties of porous media -, Hydrology paper, n°3, Colorado State University, Fort-Collins, Colorado, USA, p.27.

[4] BUCKINGHAM E. (1907) – Studies of the movement of siol moisture. Bur. Of Siol Bull., N°38, Us. Dep. Of Agric (USDA), Washington DC.

[5] CASSAN M. (1980) – Les essais d'eau dans la reconnaissance des sols, pp : 126-140, Ed Eyrolles.

[6] DARDOURI W. (2002) – Détermination expérimentale de la courbe de rétention d'un sol naturel. Rapport de DEA de Génie Civil, Ecole Polytechnique Universitaire de Lille.

[7] DHOUIB B., SHARHOUR I., LAFHAJ Z., DEFAUT A. (1998) – Essai Lefranc pour la mesure de la perméabilité in situ : Etude Théorique et interprétation pratique. Revue française de Géotechnique.

[8] DIAW El HADJI B., (1996), « Modélisation du transfert d'eau en milieux poreux non saturés : Application à l'étude de la recharge des nappes d'eau souterraine en région Soudano-Sahélienne », Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg (France), 1996.

[9] ELRIK. D. E., REYNOLDS W. D. (1992) – Methods for analyzing constant-head well permeameter data. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol.56, p320-323.

[10] FREDLUND G., XING A., (1994) – Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil water characteristic curve. Canadian Géeotechnique Journal, Vol31, p553-546.

[11] GARDNER W. (1920) – The capillary potential and its relation to soil moisture constants. Soil Sci., Vol.10, p357-359.

[12] GENEVIEVE P., (1997) «Modélisation du transfert d'eau et de soulte dans les sols non saturés. Thèse de doctorat. Université du Québec

[13] KARA R. (1998) – Mesures in situ des très faibles perméabilités. Contribution à l'amélioration des méthodes de mesure par expérimentation en vraie grandeur et modélisation numérique. Thèse de doctorat I.N.P.L. Ecole Nationale Supérieure de Géologie Nancy, 183p.

[14] LAGHCHA A., (2006), « Contribution à l'étude des transferts gazeux et liquide au sein des parois en béton endommagées sous sollicitations thermo-hydrique », Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées (INSA), Lyon (France), 2006.

[15] LALLEMAND A., SAUTY P., (1976) – Simulation des écoulements en milieu non saturé les programmes DIFSOL, Van keulen, Bhuiyan, Acquisition des paramètres nécessaires à la simulation. BRGM, Département géologie de l'aménagement.

[16] LI XIANG-LING (1999), « Comportement Hydromécanique des Sols Fins : de l'état saturé à l'état non saturé », Thèse de Doctorat en Sciences appliquées, Université de Liège (Belgique), 1999.

[17] MCKEE, BUMB (1984) – The importance of unsaturated flow parameters in designing amonitoring system for hazardous wastes and environmental emergencies. In Proceedings, Hazadous Materials Control research Institute National Conference, Houston, Texas, p.50-58

[18] PER ATLE O., (1990) – Estimation and Scaling of the near-satured hydraulic conductivity. Nordic Hydrology, 30, 1999, p177-190.

[19] REYNOLDS W. D., ELRICK D.E., (1985) – Measurement of field – satured hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationship using the "Guelph Permeameter". Proceedings, National Water Well Association Conference on Characterization and Monitoring of the Vadose (unsaterate) Zone Denver, Colorado

[20] REYNOLDS W. D., ELRICK D.E., TOPP G.C., (1983) – A reeaxamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. Soil Sci., Vol.136, p250-268.

[21] RICHARDS L.A. (1949) – Concerning permeability units for soils. Soil Science Society of America, Vol5, p49-53.

[22] RICHARDS L.A. (1931) – Capillary conduction of liquids through porous medium. Physics 1, p.318-333.

[23] SALAH. N. (2000) – Détermination de la perméabilité dans les sols non saturés. DEA, Génie civil, Ecole centrale de Lille, USTL. 55p.

[24] SAM R., (2003) « Mesures expérimentales de la perméabilité in situ des limons», DEA, Géotechnique et Génie Civil, Ecole Polytechnique Universitaire de Lille – USTL.

[25] SCHOFIELD R.K. (1935) – The pF water in soil. Trans. Intern. Cong. Soil Sci.3rd, 2, p.37-48.

[26] SORIA UGALDE J.M., (2003), « Identification des paramètres hydrodynamiques du sol par modélisation inverse des flux d'infiltration : Application aux échelles locale et hydrologique », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble (France), 2003.

[27] TRIQUI. F. (2002) – Suivi de la propagation de l'eau dans les limons. Rapport de DEA de Géotechnique et Génie Civil, Ecole Polytechnique Universitaire de Lille – USTL.

[28] VAN ENUCHTEN. M. T., (1980) – The RTC code for quantifying the hydraulic function of unsaturated soils, US, Department of Agriculture. Research Service Riveside, California 92501, p.50.

[29] WILLIAMS and AL. (1983) – The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristics. Austr.j. Soil Res. N°21, p.15-32.

Annexes1 :

Calcul des teneurs en eau

Tableaux des résultats de la teneur en eau en fonction de la profondeur et du temps (15/04/2003)

A 9H00

Rangée R1

		A	B	C	D	E
		% Teneur en eau				
Profondeur en cm	10	26	40,4	49,6	54,9	64
	20	24,7	42,8	63,6	42,1	59,7
	30	43,5	55,4	63,2	40,7	70,5
	40	68,4	66,6	63,1	64,2	77,9
	60	69,4	53,7	76	75,1	64,6
	100	68,4	76,4	98	87,4	82,8

Rangée R2

Profondeur en cm	10	52,8	36,9	46,6	61,9	58,7
	20	35,3	40,8	63	67,4	65,1
	30	38	57,2	63,9	61,4	71,3
	40	68,9	59,6	63,5	62,1	79,8
	60	68,3	74,9	67	84,4	72,9
	100	75,2	80,4	92,5	97	96

Rangée R3

Profondeur en cm	10	52,2	12,8	26,9	63,5	62
	20	58,1	23,8	54,9	69,1	68,1
	30	59,4	61,7	66,9	65,8	72,4
	40	70,5	96,7	76,6	65,5	67,4
	60	66,2	71,3	62,5	69	71,5
	100	94,2	0	69,8	81,8	71,2

Rangée R4

Profondeur en cm	10	36,8	48,2	67,4	45,8	37,6
	20	73,5	52,7	58,6	61,8	54,9
	30	42	39,6	54,3	41,4	64,4
	40	60,9	47	74,8	42,3	74,9
	60	80,3	76,9	73,7	68	50
	100	92,7	88,6	81,4	66,4	78,6

A 14H00

Rangée R1

		A	B	C	D	E
		% Teneur en eau				
Profondeur en cm	10	19,7	38,7	61,61	57,9	71
	20	22,5	44,6	67,9	53,2	54,1
	30	40	58,9	65,3	50,8	72,5
	40	72,3	74	60,1	66,9	81,4
	60	67,8	56,7	76,3	70,6	68,2
	100	78,3	82,5	78	80	79,15

Rangée R2

Profondeur en cm	10	53	38,6	48,8	63,2	63
	20	22,2	41	65,9	70,2	65,9
	30	48,6	59,3	65,8	64,5	76,6
	40	84	62	62,4	62,6	81,8
	60	70,8	76,4	68,4	75,7	72,7
	100	72,5	89,6	82,2	87,6	90,8

Rangée R3

Profondeur en cm	10	54,2	12,91	25,9	77	64,3
	20	59,9	22,1	56,2	62,1	63,1
	30	63	57,9	66,7	58,7	72,6
	40	72,4	85	76,4	63,4	80,1
	60	69,1	76,7	66,6	72,3	82,2
	100	83,9	90,9	80	78,9	85,3

Rangée R4

Profondeur en cm	10	38,7	55,6	83,81	54,3	46,4
	20	63,3	55	75,1	47,8	53
	30	46,5	38,9	60,81	31,7	82,7
	40	73,4	48,5	73,9	35,5	84
	60	78,8	80,8	66	87,6	54,2
	100	89,6	83	85,4	79,8	98

A 18H00

Rangée 1

		A	B	C	D	E
		% Teneur en eau				
Profondeur en cm	10	29	48,5	58,4	57,5	58,7
	20	25,5	51,7	69,2	58	65,1
	30	42,2	52,9	69,1	58,3	71,3
	40	73,6	70,5	63,3	68,8	79,8
	60	66,7	65,7	72,6	71,4	72,9
	100	88,5	79,9	75,7	75,5	96

Rangée 2

		A	B	C	D	E
		% Teneur en eau				
Profondeur en cm	10	59,5	37,8	52,3	58,4	79,9
	20	22,4	40,9	64,4	70	81,5
	30	45,6	63,3	68,5	69,1	73,6
	40	74	65,3	64,9	66	78,2
	60	77	73,7	68,4	75,9	75,5
	100	68	94,7	81,4	82,9	79,9

Rangée 3

		A	B	C	D	E
		% Teneur en eau				
Profondeur en cm	10	55,1	13,7	31	79,2	68,9
	20	59,3	23,4	62,2	64	72
	30	62,8	62,5	59,5	59,3	78,2
	40	71,8	95,3	67,6	63	71,4
	60	69,2	69,4	70,6	73	73,8
	100	82,1	97,3	81,6	77,7	75,8

Rangée 4

		A	B	C	D	E
		% Teneur en eau				
Profondeur en cm	10	37,2	37,2	77,7	46	49
	20	80,5	80,5	65,8	59,2	62,7
	30	42,7	42,7	59,4	43,7	72,2
	40	61,7	61,7	79,8	44,8	85
	60	79,2	79,2	72,9	71,4	49,4
	100	80,2	80,2	93,8	77,1	93,6

Tableaux des résultats de la teneur en eau en fonction de la profondeur et du temps (15/ 05/2003)

A 9H00

Rangée R1

		A	B	C	**D**	**E**
		% Teneur en eau				
Profondeur en cm	10	28 ,5	51,5	69,1	76,5	80,5
	20	35,4	55,4	72,2	41,3	59,5
	30	45,6	63,8	73,8	41,8	81,0
	40	76,4	74,1	64,1	69,7	85,5
	60	69,4	68,3	76,3	70,2	69,4
	100	94,3	97,6	83,4	97,5	86 ,7

Rangée R2

Profondeur en cm	10	69,6	45,6	54,1	69,8	68,2
	20	21,9	47,3	75,7	73,2	70,5
	30	44,5	64,7	67,6	70,1	81,1
	40	73,2	59,6	60,6	62,1	92,0
	60	77,2	84,9	74,6	72,0	75,1
	100	77,6	83,3	98,2	98,2	98,3

Rangée R3

Profondeur en cm	10	78,9	15,6	31,7	76,1	66,4
	20	63,3	25,9	58,1	74,1	65,3
	30	64,6	59,5	58,2	75,7	71,3
	40	70,2	87,4	67,6	70,4	80,1
	60	77,2	82,7	75,4	74,1	85,6
	100	99,1	99,2	96,4	85,7	91,2

Rangée R4

Profondeur en cm	10	53	55,'	70,1	42,9	39,1
	20	70,1	60,7	60	54,9	56,6
	30	57,7	50,4	52,8	42	67,7
	40	92,6	76,5	74,7	41,9	78,6
	60	77	80,4	73,7	70,6	50,8
	100	86,3	98,2	95	83,7	85,8

A 14H00

Rangée R1

		A	B	C	**D**	**E**
		% Teneur en eau				
Profondeur en cm	10	29,6	50,1	61,3	64,5	81,3
	20	36,5	59,2	72,1	42,1	68,7
	30	47	69,6	85	39,9	86,6
	40	80,2	83,5	82,5	69,6	92,1
	60	71,9	68,6	5,9	74,9	70,1
	100	94,3	97,3	97,2	95,2	92,8

Rangée R2

Profondeur en cm	10	74,8	72,8	58,8	46,9	67,4
	20	68,9	73,4	73,5	46,3	20,4
	30	80,7	69,1	77,1	57,3	47,7
	40	92,4	61,5	68,6	60,9	87,3
	60	76,6	71,5	67,6	83,5	70,2
	100	98,3	97,3	90,4	96,8	81,7

Rangée R3

Profondeur en cm	10	78,2	15,9	27,3	80,9	67,3
	20	57,5	25,9	51,4	69,8	66,1
	30	60,3	59,7	66,1	69,5	72,2
	40	69	87,8	76,3	67,9	82,6
	60	75,9	81,2	65,7	74,4	85,9
	100	87,5	94	82,5	84,1	89,7

Rangée R4

Profondeur en cm	10	52,2	54,1	74,3	44,1	40,8
	20	60,1	58,9	61,6	56,8	55,9
	30	83,8	56,9	52,9	42,1	73,5
	40	85,3	79,9	76,8	42,1	81,1
	60	50,4	80,7	74,9	82,4	52,1
	100	86,5	87	96,4	81,6	82,3

A 18H00

Rangée 1

		A	B	C	**D**	**E**
		% Teneur en eau				
Profondeur en cm	10	34,9	51,9	63,6	77,5	83,8
	20	36,2	50,2	70,7	48,8	52,2
	30	51,8	72,6	82,5	45,8	72,4
	40	76,8	78,6	86,4	70,3	87,1
	60	76,6	60,1	74,4	78,8	74,3
	100	89,4	98,2	98,9	91,3	95,3

Rangée 2

		A	B	C	**D**	**E**
		% Teneur en eau				
Profondeur en cm	10	67,8	45,8	55	68,9	69,7
	20	22,7	45,7	78,2	71,3	74,2
	30	50,2	55,4	77,7	65,3	81,5
	40	83,7	59,7	62,2	63,2	94,9
	60	70,4	82,3	64,6	82,9	76,1
	100	78,2	91,3	84,3	95,1	98,5

Rangée 3

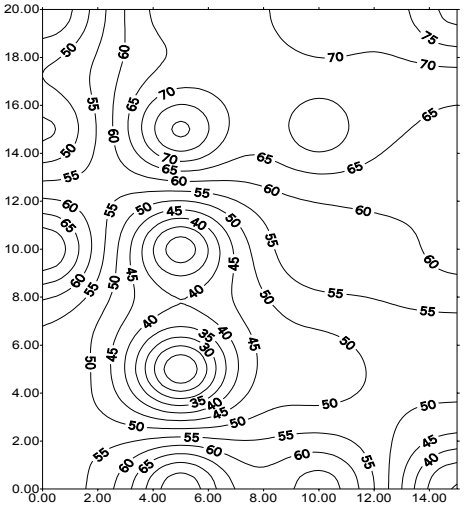
		A	B	C	**D**	**E**
		% Teneur en eau				
Profondeur en cm	10	79,9	17	29,2	82,5	67,6
	20	60,2	29,4	51,7	62,1	78,4
	30	59,3	74,3	55,2	61,4	82,2
	40	64,2	92,4	69,2	64,5	75,8
	60	75,7	82,7	69	75,5	69,2
	100	87,1	98,1	90,8	83,8	85,4

Rangée 4

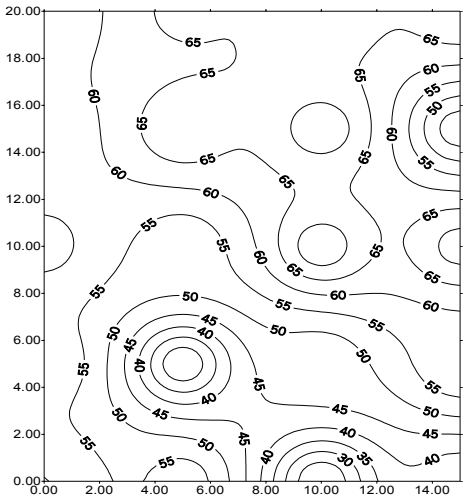
		A	B	C	**D**	**E**
		% Teneur en eau				
Profondeur en cm	10	53,5	57,8	78	46,8	41,8
	20	85,8	57,7	75,5	47,2	59,8
	30	44,4	52,4	55,9	38,8	62,3
	40	69,4	74,4	72,5	35,6	80,8
	60	82,1	79,9	57	88,1	42,5
	100	98,1	79,7	89,1	82,6	99,7

Les cartes de teneur

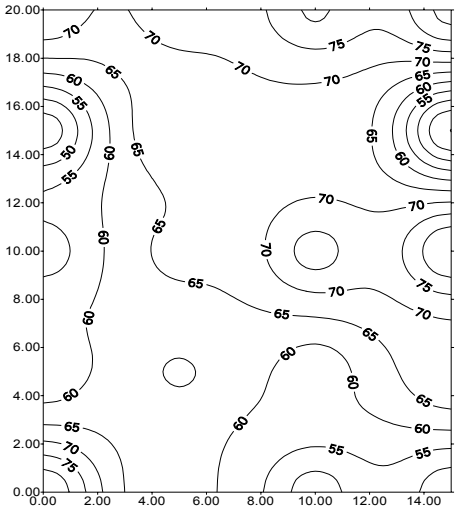
Les cartes de teneur en eau. Le 15 mai 2003 à 14h00



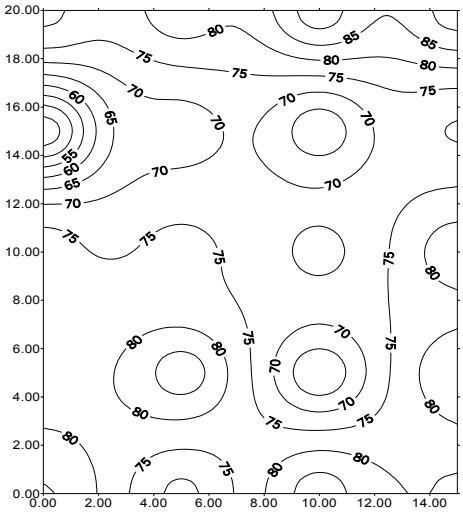
pour profondeur 10 cm



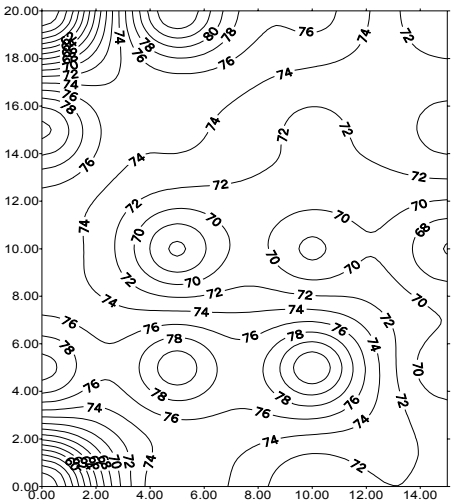
pour profondeur 20 cm



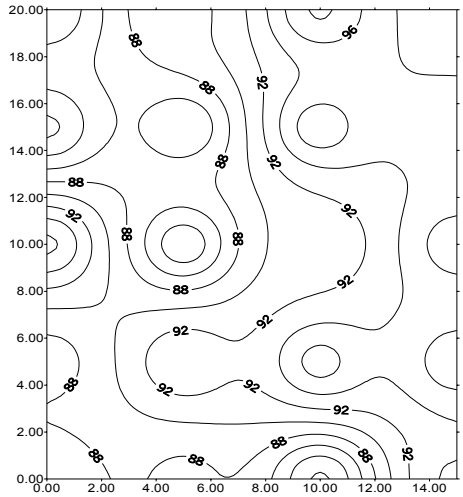
pour profondeur 30 cm



pour profondeur 40 cm

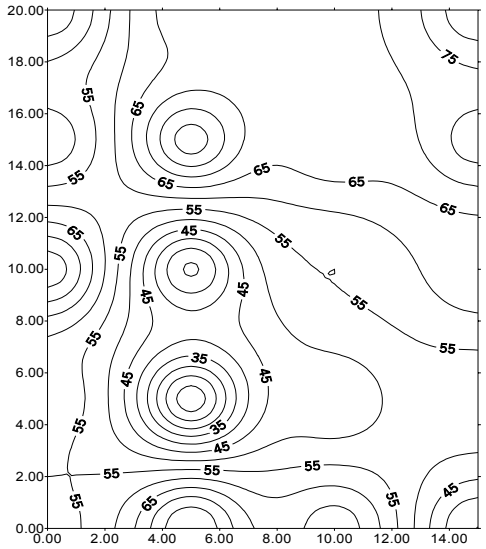


pour profondeur 60 cm

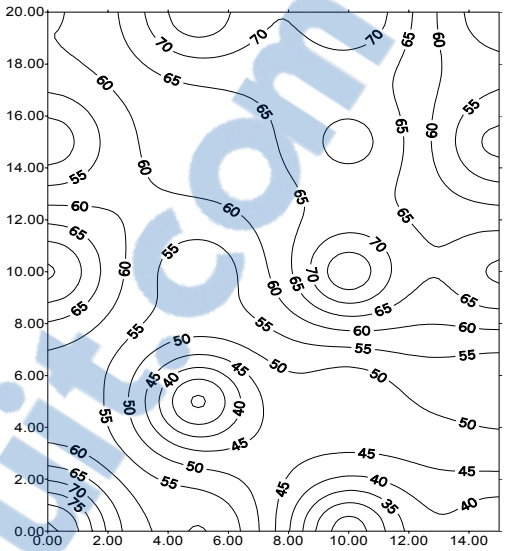


pour profondeur 100 cm

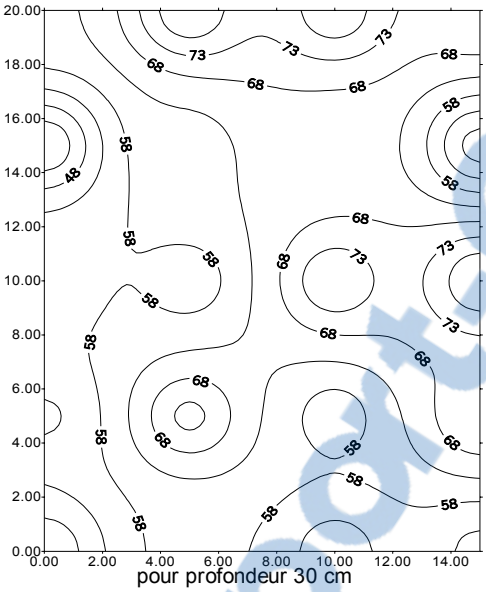
Les cartes de teneur en eau. Le 15 mai 2003 à 18 h00



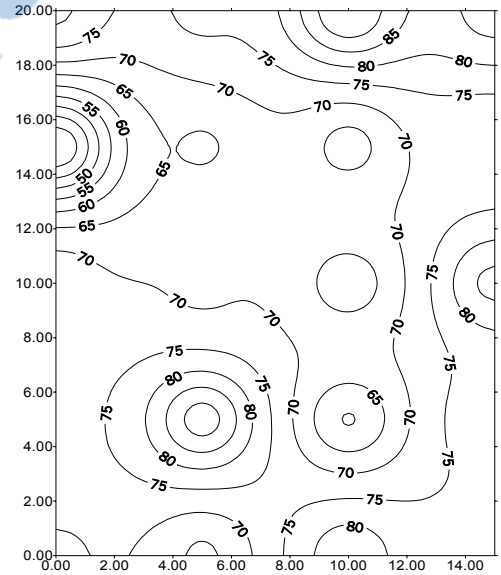
pour profondeur 10 cm



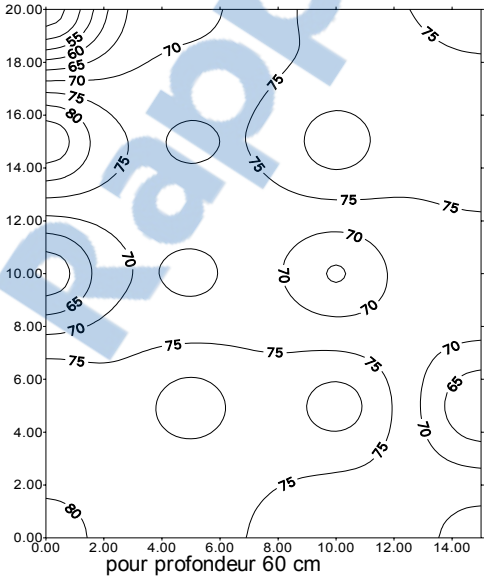
pour profondeur 20 cm



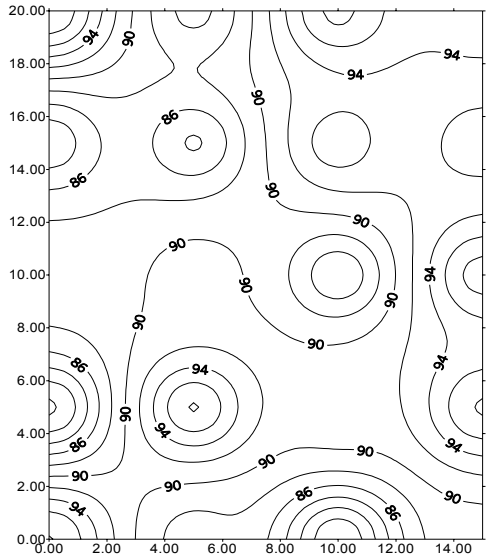
pour profondeur 30 cm



pour profondeur 40 cm



pour profondeur 60 cm



pour profondeur 100 cm

Rapport-Gratuit.com

	A			B			C			D			E		
	9H	14H	18H	9H	14H	18H	9H	14H	18H	9H	14H	18H	9H	14H	18H
	TENEUR EN EAU en %			%			%			%			%		
10	26	26	59,5	42	55	55,7	49,9	46,8	47,5	57,9	56,3	60,1	66,5	80,2	67,8
20	24,7	24,7	22,4	44,5	47,3	48,5	66,3	66,2	67,4	56,5	55,4	55,6	62	50,5	63,4
30	43,5	43,5	45,6	57,2	61,1	61,8	71,3	76,9	72,1	53	52,4	52,8	74,9	71	75,6
40	68,4	68,4	74	71,4	68,8	70,1	66	71,5	72,1	67,7	67,4	68,5	81	72	82,4
60	69,4	69,4	77	56,6	61,8	61,7	65,3	62,4	64,9	70,8	69,8	71,8	66,7	76,2	77,8
100	68,4	68,4	68	81,9	91,9	91,2	75,2	78,4	76,6	74,5	73,8	76,8	76,6	71,4	78,9

COURBE DES MESURES DE LA TENEUR EN EAU

Rangée R1 : 15/03/2003

Rangée R 2 : 20/03/2003

	A			B			C			D			E		
	9H	14H	18H	9H	14H	18H	9H	14H	18H	9H	14H	18H	9H	14H	18H
	TENEUR EN EAU en %			%			%			%			%		
10	62,7	60,5	63,3	60,1	55,1	60,1	X	X	X	40,9	40,4	41,5	56,5	52,5	50,9
20	64,9	63,6	65,7	70	68,1	72	X	X	X	44,5	43,4	45,6	22,1	21,7	20,6
30	73,2	70,1	72,9	64,4	68,4	67,8	X	X	X	53,2	52	52,3	40,9	47,9	47,2
40	82,6	79,6	81	63,7	66	62,3	X	X	X	57,4	55,4	57,9	68,2	86,3	84,4
60	74,6	69,8	72,4	78,6	75	72	X	X	X	83,5	81,8	83,7	73,6	72,3	71,9
100	96,7	90,6	93,6	87,5	83,3	87,1	X	X	X	78,6	79,3	78,9	71,1	67,4	65,5

Rangée R3 : 24/03/2003

	A			B			C			D avant pluie			D après pluie			E		
	9H	14H	18H	9H	14H	18H	9H	14H	18H	9H	14H	18H	9H	14H	18H	9H	14H	18H
	%			%			%			%			%			%		

10	63,2	64,1	53,4	11,2	10,8	11,6	33,8	33,1	29,3	82,7	83,8	84,5	80,8	91,6	86,6	76,6	76,5	74,4
20	53,8	53,2	55,2	22	20,4	21,1	55,2	53,3	49,7	65,5	65,8	86,1	70,5	72,6	77,5	69,5	68,1	65,9
30	53	52	59,4	56,1	55,9	56,7	62,6	60	67,2	60,4	59,6	58,6	66	60	73,4	76,7	80,8	75,9
40	60	58,8	68,5	81,8	80,3	88,9	75,2	72,5	81,2	66,3	64,6	66,6	67	65,7	68	73,7	84,8	82,9
60	78,4	77,1	72,5	79,3	75,6	76,4	67,9	66,3	64,7	74,8	74	74,8	74,1	76,1	75,3	79,8	86,2	86,6
100	78	77,9	80,2	82,9	86,8	95,4	83,4	82,7	81,3	80,8	79,7	79,6	80,3	80,2	72,3	76,4	90,7	90,3

Rangée R4 : 15/03/2003

	A			B			**C**			**D**			**E**		
	9H	14H	18H	9H	14H	18H	9H	14H	18H	9H	14H	18H	9H	14H	18H
	TENEUR EN EAU en %			%			%			%			%		
10	59	59,5	58,2	46,2	47,2	53,6	72,9	69,2	70,8	47,6	50,1	74,4	51,8	47,4	46,3
20	74,8	76	74	64,2	63,6	61,7	63,3	62,5	64,9	56,5	49,1	65,9	61,4	64,6	63,5
30	59,2	58	56,6	60,6	60,7	47,9	54,4	55,4	56,8	41,5	28,2	75,6	82,1	68	67,3
40	60,5	83,3	80,1	77	77,5	69,1	75,3	76,1	77,3	39,6	41,8	82,9	88,2	85,6	83,8
60	75,6	81,9	80	80,2	79,9	82	65,7	66,1	67,8	79,5	92,5	86,6	50,7	50,4	48,9
100	98	96,8	98,2	98	98	99	76,3	79,9	80,9	79,2	81,8	90,3	98	99	99,2

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Annexes 2

Calcul de la perméabilité

La variation de la vitesse en fonction de temps

Trou : R4C **23 /05/2003**

Profondeur : 38 cm

X = 35,22 cm^2

Y = 2,15 cm^2

T : 14 °c

Pluie : 1 mm

H = 5 cm

N° de lecture	Temps t (min)	Temps t (s)	Intervalle de temps dt (s)	Hauteur h (cm)	dh (cm)	Vitesse (cm/s)
0	0	0	0	0		
1	2	120	120	16,3	16,3	0,13583333
2	4	240	120	16,3	0	0
3	6	360	120	16,3	0	0
4	8	480	120	16,325	0,025	0,00020833
5	10	600	120	16,35	0,025	0,00020833
6	12	720	120	16,4	0,05	0,00041667
7	14	840	120	16,4	0	0
8	16	960	120	16,5	0,1	0,00083333
9	18	1080	120	16,5	0	0
10	20	1200	120	16,525	0,025	0,00020833
11	22	1320	120	16,6	0,075	0,000625
12	24	1440	120	16,65	0,05	0,00041667
13	26	1560	120	16,675	0,025	0,00020833
14	28	1680	120	16,7	0,025	0,00020833
15	30	1800	120	16,75	0,05	0,00041667
16	32	1920	120	16,8	0,05	0,00041667

17	34	2040	120	16,825	0,025	0,00020833
18	36	2160	120	16,875	0,05	0,00041667
19	38	2280	120	16,925	0,05	0,00041667
20	40	2400	120	17,2	0,275	0,00229167
21	42	2520	120	17,4	0,2	0,00166667
22	44	2640	120	17,6	0,2	0,00166667
23	46	2760	120	17,7	0,1	0,00083333
24	48	2880	120	17,9	0,2	0,00166667
25	50	3000	120	18	0,1	0,00083333
26	52	3120	120	18,1	0,1	0,00083333
27	54	3240	120	18,3	0,2	0,00166667
28	56	3360	120	18,4	0,1	0,00083333
29	58	3480	120	18,6	0,2	0,00166667
30	60	3600	120	18,8	0,2	0,00166667
31	62	3720	120	19,1	0,3	0,0025
32	64	3840	120	19,3	0,2	**0,00166667**
33	66	3960	120	19,5	0,2	**0,00166667**
34	68	4080	120	19,7	0,2	**0,00166667**

R1 = 0.00166667

H2 = 10 cm

N° de lecture	Temps t (min)	Temps t (s)	Intervalle de temps dt (s)	Hauteur (cm)	dh (cm)	Vitesse (cm/s)
0	0	0	0	19,7		
1	2	120	120	24,05	4,35	0,03625
2	4	240	120	24,2	0,15	0,00125
3	6	360	120	24,5	0,3	0,0025
4	8	480	120	24,7	0,2	0,00166667
5	10	600	120	25,1	0,4	0,00333333

6	12	720	120	25,3	0,2	0,00166667
7	14	840	120	25,6	0,3	0,0025
8	16	960	120	25,9	0,3	0,0025
9	18	1080	120	26,2	0,3	0,0025
10	20	1200	120	26,5	0,3	0,0025
11	22	1320	120	26,8	0,3	0,0025
12	24	1440	120	27	0,2	0,00166667
13	26	1560	120	27,2	0,2	0,00166667
14	28	1680	120	27,5	0,3	0,0025
15	30	1800	120	27,8	0,3	0,0025
16	32	1920	120	28,1	0,3	0,0025

R2 = 0,0025 cm/s

Trou : R3E **21/05/2003**

Profondeur : 38 cm

X = 35,22 cm^2 ***

Y = 2,15 cm^2

T : 14 °c

Pluie : 1 mm

H2 = 5 cm

N° de lecture	Temps t (min)	Temps t (s)	ntervalle de temps dt (s)	Hauteur (cm)	dh (cm)	Vitesse (cm/s)
0	0	0	0	0		
1	2	120	120	19,6	19,6	0,163333333
2	4	240	120	19,5	-0,1	0,000833333
3	6	360	120	19,5	0	0
4	8	480	120	19,5	0	0
5	10	600	120	19,4	-0,1	0,000833333
6	12	720	120	19,4	0	0
7	14	840	120	19,4	0	0
8	16	960	120	19,4	0	0
9	18	1080	120	19,35	-0,05	0,000416667
10	20	1200	120	19,325	-0,025	0,000208333
11	22	1320	120	19,325	0	0
12	24	1440	120	19,3	-0,025	0,000208333
13	26	1560	120	19,3	0	0
14	28	1680	120	19,3	0	0
15	30	1800	120	19,3	0	0
16	32	1920	120	19,3	0	0
17	34	2040	120	19,3	0	0
18	36	2160	120	19,3	0	0
19	38	2280	120	19,3	0	0

20	40	2400	120	19,3	0	0
21	42	2520	120	19,3	0	0
22	44	2640	120	19,3	0	0
23	46	2760	120	19,3	0	0
24	48	2880	120	19,3	0	0
25	50	3000	120	19,3	0	0

R1 = 0 cm/s

H=10 cm

N° de lecture	Temps t (min)	Temps t (s)	ntervalle de temps dt (s)	Hauteur (cm)	dh (cm)	Vitesse (cm/s)
0	0	0	0	19,3		
1	2	120	120	22,2	2,9	0,024166667
2	4	240	120	22,2	0	0
3	6	360	120	22,2	0	0
4	8	480	120	22,2	0	0
5	10	600	120	22,2	0	0
6	12	720	120	22,2	0	0
7	14	840	120	22,2	0	0
8	16	960	120	22,2	0	0
9	18	1080	120	22,2	0	0
10	20	1200	120	22,2	0	0
11	22	1320	120	22,2	0	0
12	24	1440	120	22,2	0	0
13	26	1560	120	22,2	0	0
14	28	1680	120	22,2	0	0
15	30	1800	120	22,2	0	0
16	32	1920	120	22,2	0	0

R2 = 0 cm/s

H = 15 cm

N° de lecture	Temps t (min)	temps t (s)	ntervalle de temps (s)	Hauteur (cm)	dh (cm)	Vitesse (cm/s)
0	0	0	0	22,2		
1	2	120	120	25,6	3,4	0,028333333
2	4	240	120	25,7	0,1	0,000833333
3	6	360	120	25,8	0,1	0,000833333
4	8	480	120	25,9	0,1	0,000833333
5	10	600	120	26	0,1	0,000833333
6	12	720	120	26,1	0,1	0,000833333
7	14	840	120	26,15	0,05	0,000416667
8	16	960	120	26,25	0,1	0,000833333
9	18	1080	120	26,3	0,05	0,000416667
10	20	1200	120	26,3	0	0
11	22	1320	120	26,4	0,1	**0,000833333**
12	24	1440	120	26,5	0,1	**0,000833333**
13	26	1560	120	26,6	0,1	**0,000833333**
14	28	1680	120	26,7	0,1	**0,000833333**

R3= 0,00083333 cm/s

Rapport-Gratuit.com

H = 20cm

N° de lecture	Temps t (mn)	Temps t (s)	ntervalle de temps dt (s)	Hauteur (cm)	dh (cm)	Vitesse (cm/s)
0	0	0	0	26,7		
1	2	120	120	30,8	4,1	0,034166667
2	4	240	120	31	0,2	0,001666667
3	6	360	120	31,2	0,2	**0,001666667**
4	8	480	120	31,4	0,2	**0,001666667**
5	10	600	120	31,6	0,2	**0,001666667**
6	12	720	120	31,6	0	0
7	14	840	120	31,8	0,2	0,001666667
8	16	960	120	31,9	0,1	**0,000833333**
9	18	1080	120	32	0,1	**0,000833333**
10	20	1200	120	32,1	0,1	**0,000833333**
11	22	1320	120	32,2	0,1	0,000833333
12	24	1440	120	32,2	0	0

R4 = 0,0016667 cm/s

R4' = 0,0008333 cm/s

Localisation des trous sur le site

Trou	X (m)	Y (m)
R1A	0	0
R1B	5	0
R1C	10	0
R1D	15	0
R1E	20	0
R2A	0	5
R2B	5	5
R2C	10	5
R2D	15	5
R2E	20	5
R3A	0	10
R3B	5	10
R3C	10	10
R3D	15	10
R3E	20	10
R4A	0	15
R4B	5	15
R4C	10	15
R4D	15	15
R4E	20	15

Les vitesses d'écoulement d'eau sous différentes charges hydrauliques appliquées pour chaque trou

Trou	R1	R2	R3	R4
R1A	0,00041667	0,0008333	0	0
R1B	0	0	0,00041667	0,0008333
R1C	0,00041667	0,0020833	0	0
R1D	0,00041667	0,00104167	0	0
R1E	0	0	0,00041667	0,0008333
R2A	0	0	0,0008333	0,000625
R2B	0,00041667	0,0008333	0	0
R2C	0,00097222	0,00166667	0	0
R2D	0	0,00041667	0,0008333	0
R2E	0	0	0,00041667	0,0008333
R3A	0,00041667	0,00166667	0	0
R3B	0,000625	0,00166667	0	0
R3C	0,00020833	0,0133333	0	0

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Calcul des paramètres pour chaque rangée

Rangée R1 :

	R1A	**R1B**	**R1C**	**R1D**	**R1E**
Kfs (cm/s)	4,109E-05	4,109E-05	0,00022159	7,1174E-05	4,109E-05
ϕ_m (cm²/s)	0,00014382	0,00014382	0,00014382	-0,0000301	0,00014382
α (cm^{-1})	0,28571429	0,28571429	1,54081633	-2,365853	1,54081633
S ($cm/s^{1/2}$)	0,095336813	0,098014499	0,107128134	*	0,079728433

Rangée R2 :

	R2A	R2B	R2C	R2D	R2E
Kfs (cm/s)	-0,000068239	4,109E-05	8,143E-05	4,109E-05	4,109E-05
ϕ_m (cm²/s)	0,00149505	0,00014382	0,00056743	0,00014382	0,00014382
α (cm^{-1})	-0,04564324	0,28571429	0,14350585	0,28571429	0,28571429
S ($cm/s^{1/2}$)	0,304945695	0,108329608	0,211456252	0,106048729	0,079185441

Rangée R3 :

	R3A	R3B	R3C	R3D	R3E
Kfs (cm/s)	0,00016143	0,00168029	0,00188574	8,0712E-05	2,2013E-05
ϕ_m (cm²/s)	-0,00055178	-0,00013208	-0,01070981	-0,00027589	0,00063543
α (cm^{-1})	-0,29255319	-12,72222	-0,01070981	-0,29255319	0,03464203
S ($cm/s^{1/2}$)	*	*	*	*	0,190647457

Rangée R4 :

	R4A	R4B	R4C	R4D	R4E
Kfs (cm/s)	9,392E-05	0,00056352	4,4025E-05	0,00024654	8,218E-05
ϕ_m (cm²/s)	-0,00041579	-0,00249475	0,00127085	0,00086289	0,00028763
α (cm^{-1})	-0,22588235	-0,22588235	0,03464203	0,28571429	0,28571429
S ($cm/s^{1/2}$)	*	*	0,264380455	0,333635744	0,120162498

Calcul des paramètres hydrauliques par la méthode de Guelph pour le site d'étude

Trou	***Kfs (cm/s)***	***ϕ_m (cm²/s)***	***α (cm^{-1})***	***S ($cm/s^{1/2}$)***
R1A	4,109E-05	0,00014382	0,28571429	0,09533681
R1B	4,109E-05	0,00014382	0,28571429	0,0980145
R1C	0,00022159	0,00014382	1,54081633	0,10712813
R1D	7,1174E-05	-0,0000301	-2,365853	*
R1E	4,109E-05	0,00014382	1,54081633	0,07972843
R2A	-0,000068239	0,00149505	0,00668876	0,30494569
R2B	4,109E-05	0,00014382	0,28571429	0,10832961
R2C	8,143E-05	0,00056743	0,14350585	0,21145625
R2D	4,109E-05	0,00014382	0,28571429	0,10604873
R2E	4,109E-05	0,00014382	0,28571429	0,07918544
R3A	0,00016143	-0,00055178	-0,29255319	0,07874008
R3B	0,00168029	-0,00249475	-12,72222	0,05291503
R3C	0,00188574	-0,01070981	-0,01070981	0,08049845
R3D	8,0712E-05	-0,00027589	-0,29255319	0,11349009
R3E	2,2013E-05	0,00063543	0,03464203	0,19064746

R4A	9,392E-05	-0,00041579	-0,00249475	0,08843076
R4B	0,00056352	-0,22588235	-0,22588235	0,1029563
R4C	4,4025E-05	0,00127085	0,03464203	0,26438046
R4D	0,00024654	0,00086289	0,28571429	0,33363574
R4E	8,218E-05	0,00028763	0,28571429	0,1201625

Trou	***Kfs (m/s)***	ϕ_m ***(m²/s)***	α ***(m^{-1})***	***S 10^{-4} (m/s)***
R1A	4,109E-07	1,4382E-08	28,5714286	9,53368135
R1B	4,109E-07	1,4382E-08	28,5714286	9,80144989
R1C	2,2159E-06	1,4382E-08	154,081633	10,7128134
R1D	7,1174E-07	-3,01E-08	-236,58	*
R1E	4,109E-07	1,4382E-08	154,081633	7,97284328
R2A	0,0000001	1,495E-07	0,66887563	30,4945695
R2B	4,109E-07	1,4382E-08	28,5714286	10,8329608
R2C	8,143E-07	5,6743E-08	14,3505845	21,1456252
R2D	4,109E-07	1,4382E-08	28,5714286	10,6048729
R2E	4,109E-07	1,4382E-08	28,5714286	7,91854406
R3A	1,6143E-06	-5,5178E-08	-29,255319	*
R3B	1,6803E-05	-2,4947E-07	-1272,222	*
R3C	1,8857E-05	-1,0710E-06	-1,070981	*
R3D	8,0712E-07	-2,7589E-08	-29,255319	*
R3E	2,2013E-07	6,3543E-08	3,46420323	19,0647457
R4A	9,392E-07	-4,1579E-08	-0,249475	*
R4B	5,6352E-06	-2,2588E-05	-22,588235	*
R4C	4,4025E-07	1,2709E-07	3,46420323	26,4380455
R4D	2,4654E-06	8,6289E-08	28,5714286	33,3635744
R4E	8,218E-07	2,8763E-08	28,5714286	12,0162498

Remarque:

* désigne que les calculs sont impossibles pour S .

Valeurs de la teneur en eau utilisées

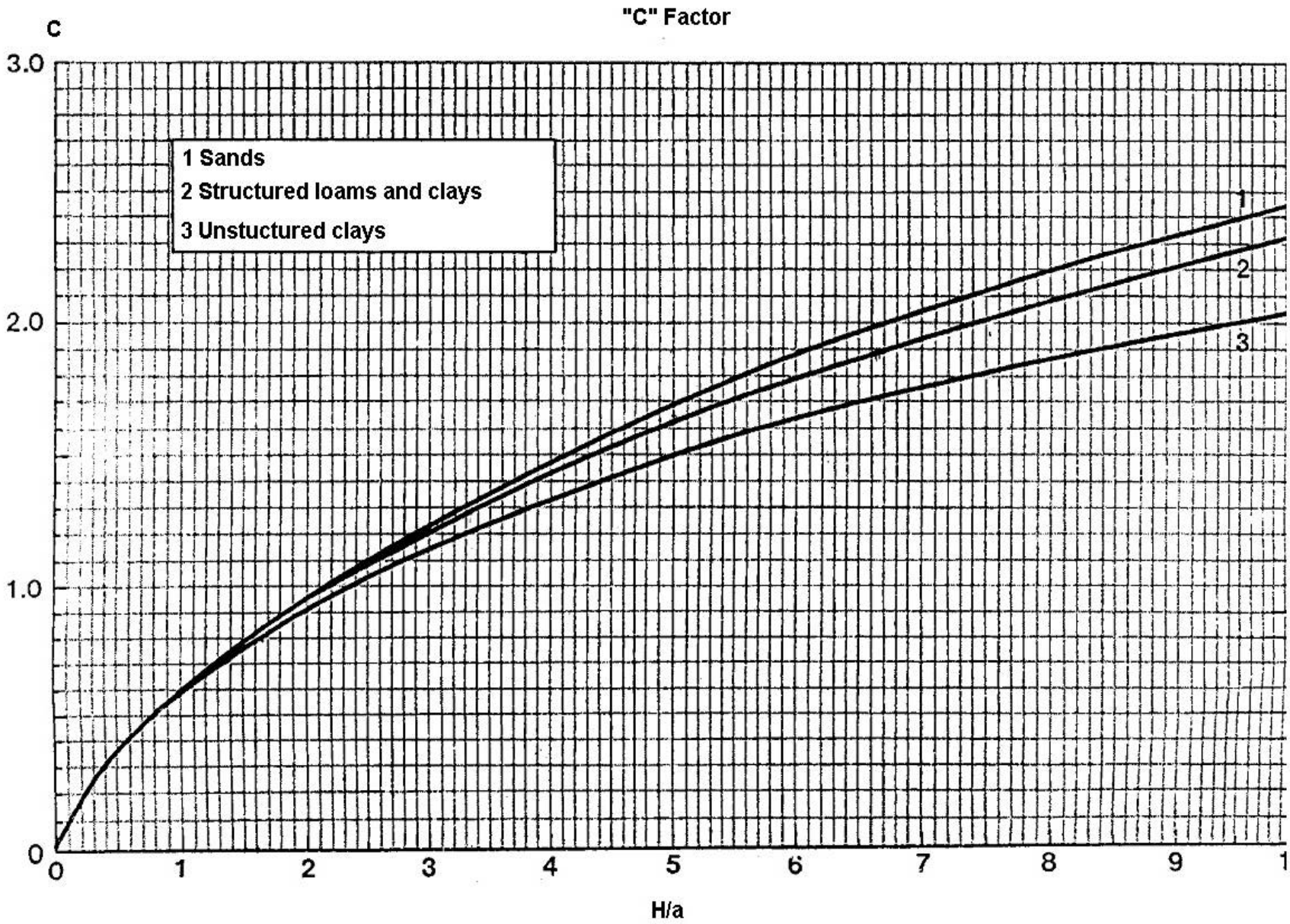
Trou	Teneur en eau mi (θ)%	Δθ %
R1A	68,4	31,6
R1B	66,6	33,4
R1C	60,1	39,9
R1D	64,2	35,8
R1E	77,9	22,1
R2A	68,9	31,1
R2B	59,2	40,8
R2C	60,6	39,4
R2D	60,9	39,1
R2E	78,2	21,8
R3A	69,0	31,0
R3B	86,0	14,0
R3C	67,6	32,4
R3D	35,6	64,4
R3E	71,4	28,6
R4A	60,9	39,1
R4B	47,0	53,0
R4C	72,5	27,5
R4D	35,5	64,5
R4E	74,9	25,1

Valeur de facteur de structure et de facteur C

Facteur de structure	H1/a	H2/a	H3/a	H4/a
	1,66	3,33	5	6,66

Calcul de la perméabilité et du potentiel hydrique par l'analyse de Richards

Trou	*Q1 (cm^3/s)*	*Q2 (cm^3/s)*	*G2 (cm^{-2})*	*G1 (cm^{-2})*	*J1 (cm^{-1})*	*J2 (cm^{-1})*	*φm (cm^2/s)*	*Kfs (cm^2/s)*
R1A	**0.01467512**	**0.02934883**	**0.00396232**	**0.0049529**	**0.05548852**	**0.02400865**	**0.00010967**	**4.365E-05**
R1B	0.01467512	0.02934883	0.00298872	0.00341867	1.18588956	0.78610339	0	3.7546^{E}-05
R1C	0.01467512	0.07337383	0.00396232	0.0049529	0.05548852	0.02400865	0	0.00021805
R1D	0.01467512	0.03668751	0.00396232	0.0049529	0.05548852	0.02400865	0	7.2683^{E}-05
R1E	0.01467512	0.02934883	0.00298872	0.00341867	1.18588956	0.78610339	0	3.7546E-05
R2A	**0.02934883**	**0.02201250**	**0.00298872**	**0.00341867**	**1.18588956**	**0.78610339**	**0.01750037**	**0**
R2B	0.01467512	0.02934883	0.00396232	0.0049529	0.05548852	0.02400865	0.00010967	1.4536E-05
R2C	0.03424159	0.05870012	0.00396232	0.0049529	0.05548852	0.02400865	0.0004907	6.2993E-05
R2D	0.01467512	0.02934883	0.00340154	0.00400672	0.91290363	0.52918725	0	4.1032E-05
R2E	0.01467512	0.02934883	0.00298872	0.00341867	1.18588956	0.78610339	0	3.7546E-05
R3A	**0.01467512**	**0.05870012**	**0.00396232**	**0.0049529**	**0.05548852**	**0.02400865**	**0**	**0.0001599**
R3B	0.02201250	0.05870012	0.00396232	0.0049529	0.05548852	0.02400865	0	0
R3C	0.00733738	0.46959883	0.00396232	0.0049529	0.05548852	0.02400865	0	0.00182436
R3D	0.00733738	0.02934988	0.00396232	0.0049529	0.05548852	0.02400865	0	7.9952E-05
R3E	0.02934883	0.04402500	0.00298872	0.00341867	1.18588956	0.78610339	0.00019626	3.1244E-05
R4A	**0.00489167**	**0.02934988**	**0.00396232**	**0.0049529**	**0.05548852**	**0.02400865**	**0**	**9.2066E-05**
R4B	0.02934988	0.17610000	0.00396232	0.0049529	0.05548852	0.02400865	0	0.0005524
R4C	0.05870012	0.08805000	0.00396232	0.0049529	0.05548852	0.02400865	0.00114322	5.8146E-05
R4D	0.08805000	0.17610000	0.00396232	0.0049529	0.05548852	0.02400865	0.00065784	0.00026166
R4E	0.02934988	0.05870012	0.00340154	0.00400672	0.91290363	0.52918725	0.0001	8.2074E-05


"C" Factor
C
3.0
2.0
1.0
0
1 Sands
2 Structured loams and clays
3 Unstuctured clays
1
2
3
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
1
H/a

Annexe 3

Valeurs de la succion

Tableaux succion

Rangée R1/ A, Le 15/04/2003

	Succion cbar			
	9h30	10h30	11h30	12h30
15 cm	7	9	14	18
35 cm	5	5	7	15
45 cm	12	14	18	24
60 cm	10	14	20	22
90 cm	18	21	22	23

Rangée R1/ B, Le 16/04/2003

	Succion cbar			
	9h30	10h30	15h00	16h00
15cm	9	10	23	18
35cm	8	10,5	25	21
45cm	8	8	29	25
60cm	2	2	23	18
90 cm	1	1	8	8

Rangée R1/ B, Le 17/04/2003

	Succion cbar												
	7h00	7h15	7h30	8h30	9h30	10h30	11h30	12h00	12h30	13h30	18h50	22h00	7h00
15cm	0	8	11	12	14	15,5	20	22	23	24	22	16	16
35cm	0	6	13	15	17,5	19,5	21	22,5	24	26	25	21	21
45cm	0	2	3	8	13	15	17	20	23	25,5	20	14	14
60cm	0	2	2	4	6	9,5	16	17	19	19,5	16	10	10
90cm	0	3	9	12	15	17	17,5	17,5	17	17	17	17	17

Rapport-Gratuit.com

Rangée R1/D, Le 18/04/2003

	Succion cbar								
	8h00	8h30	9h00	10h00	14h00	18h30	20h00	22h00	7h00
15cm	8	11	12	15	28	22	21	19	18
35cm	7	8	11	11	19	16	14	12	11
45cm	8	12	14	17	26	21	19,5	18	16
60cm	6	8	10	15	28	21	19	18	16
90cm	4	5	6	8	9	9	9	9	9

Rangée R1/E, Le 19/04/2003

	Succion cbar								
	7h30	8h00	9h00	10h00	11h00	14h00	18h00	22h00	7h30
15cm	0	7	11	14	19	28	23	22	22
35cm	0	5	7	11	14	19	17	17	15
45cm	0	4	5	7,5	9,5	26	12	11	10
60cm	0	2	3	6	9,5	28	12	11	10
90cm	0	12	12,5	14	17	17	17	17	17

Rangée R2/ A, le 23/04/03

	valeurs de succion en bar							
	7h30	8h00	9h00	15h00	16h00	17h00	19h00	22h00
15cm	0	8	14	18,5	18,5	18,5	17,5	17
35cm	0	4	10	22	22	22	21	16
45cm	0	3	7	23,5	23,5	23	21	15
60cm	0	8	16	27	27	28	23	18
90cm	0	2	6,5	6	5	4	3	3

Rangée R2 /B, le 22/04/03

	valeurs de succion en bar												
	8h00	8h30	9h30	10h30	11h30	12h30	13h30	14h30	15h30	16h30	17h30	22h00	7h30
15cm	0	4	20	24	28	28	30	31	31,5	36	36	37	35
35cm	0	3	18	22	27	29	30	32	32	29	28	23	21
45cm	0	8	23	27	31	33	35	36	36	33	32	26	24
60cm	0	3	28	23	20	21	23	24	22,5	19	19	14	11
90cm	0	2	6	6	6	6	7	7,5	7	9	6	6	9

Rangée R2 /D, le 21/04/03

	valeurs de succion en bar						
	7h30	8h00	9h00	14h00	18h00	21h00	7h30
15cm	0	15	20	36	32	25	25
35cm	0	12	20	32	31	24	24
45cm	0	14	16	27	23	17	16
60cm	0	5	6	22	17	13	12
90cm	0	9	10	12	2	1	1

Rangée R2 /E, le 21/04/03

	valeurs de succion en bar						
	7h00	8h00	9h00	15h00	18h00	22h00	7h30
15cm	0	3	15	34	34	34	34
35cm	0	2	14	29	27	26	26
45cm	0	3	7	21	19	18	18
60cm	0	8	18	24	21	20	20
90cm	0	2	7	5	5	5	5

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Rangée R3 /A, le 24/04/03

	valeurs de succion en bar											
	7h00	8h00	9h30	10h30	11h30	12hy30	13h30	14h30	15h30	16h30	22h00	7h30
15cm	0	20	34	33	40	41	41	41	27	37	35	47
35cm	0	11	19	21	24	24	26	26	25	23	19	16
45cm	0	4	14	18	20	22	24	24	24	22	17	14
60cm	0	6	15	19	22	22	24	24	19	20	16	13
90cm	0	21	31	33	34	34	34	32	35	30	30	8

Rangée R3 /B, le 25/04/03

	valeurs de succion en bar							
	7h00	8h00	9h30	11h30	15h00	20h00	22h00	7h00
15cm	0	14	28	31	32	33	34	33
35cm	0	16	20	22	25	24	23	21
45cm	0	5	14	16	22	20	19	17
60cm	0	6	13	17	21	17	15	14
90cm	0	8	13	16	17	15	15	14

Rangée R3 /B, le 27/04/03 pluv=

	valeurs de succion en bar								
	6h30	7h00	8h00	9h00	16h00	17h00	20h00	22h00	7h00
15cm	0	12	16	17	20	21	20	18,5	19
35cm	0	16	17	18	20	20	19	18	18
45cm	0	8	12	12	16	15	14	13,5	14
60cm	0	8	10	11	14	14	13,5	13	13
90cm	0	8	12	14	18	18	14,7	16	17

Rangée R3 /C, le 28/04/03

	valeurs de succion en bar												
	7h00	7h15	7h30	8h00	9h00	10h00	11h00	12h00	13h00	15h00	18h00	22h00	7h30
15cm	0	12	16	18	20	21	26	26	27	25	21	20	17
35cm	0	9	13	15	16,5	19	25	25	25	25	21	20	17
45cm	0	2	4	6	15	17	23	23,5	24	25	21	20	17
60cm	0	2	6	8	12	13	18	18,5	19	19	16	15	13
90cm	0	4	10	14	25	30	34	35	35	35	31	30	30

Rangée R3 /D, le 29/04/03

	valeurs de succion en bar															
	7h30	9h00	10h00	11h00	12h00	14h00	22h00	8h00	9h30	10h30	12h30	14h30	15h30	16h30	19h00	22h00
15cm	0	13	16	20	23	24	16	17	18	18	20	20	20,5	20	16	16,5
35cm	0	16	19	22	24	25	18	19	19	20	20	22	21	20	19	18
45cm	0	4	12	19	23	24	16	17	18	18	20	20	20	19	18	17
60cm	0	2	7	14	15	14	15	16	16	18	18	16	16	15	14	12,5
90cm	0	5	11	15	18,5	18,5	17	20	18	22	22	23	22	21	19	18

Rangée R3 /E, le 30/04/03

	valeurs de succion en bar						
	8h00	10h00	12h00	15h00	18h00	22h00	8h00
15cm	8	12	13	15	12	11	12
35cm	6	8	10	12	10	7	8
45cm	12	17	20	22	19	17	18
60cm	15	20	24	28	26	24	26
90cm	14	19	23	25	20	18	20

Rangée R4 /A, le 05/05/03 Pluv=4,9 mm

	valeurs de succion en bar						
	9h00	10h00	11h00	13h00	15h00	18h00	22h00
15cm	9	16	20	20	22	22	22
35cm	12	19	22	24	24	24	24
45cm	7	14	18	20	20	20	20
60cm	13	18	22	24	24	24	24
90cm	2	19	26	30	30	30	30

Rangée R4 /B, le 06 .07 /05/03

	valeurs de succion en bar												
	8h00	9h00	10h00	12h00	15h00	18h00	22h00	8h00	10h00	12h00	15h00	18h00	22h00
15cm	14	21	24	25	26	24	22	22	25	30	34	34	24
35cm	16	24	28	27	28	25	22	24	29	32	34	34	25
45cm	13	21	26	25	25	23	21	21	26	28	34	34	22
60cm	6	12	25	24	25	25	24	25	25	26	26	26	25
90cm	12	26	35	36	38	36	34	39	41	46	46	44	35

Rangée R4 /C, le 08 /05/03

	valeurs de succion en bar								
	8h00	9h00	10h00	11h00	13h00	15h00	18h00	22h00	8h00
15cm	8	16	31	36	37	44	43	43	48
35cm	2	11	25	30	31	35	37	37	37
45cm	4	16	36	39	40	38	39	40	40
60cm	3	8	26	27	28	26	26	27	27
90cm	7	20	21	25	25	24	25	29	29

Rangée R4 /D, le 12 /05/03 Pluv = 4 mm

	valeurs de succion en bar							
	8h00	10h00	12h00	15h00	16h00	18h00	22h00	8h00
15cm	16	30	36	40	41	40	40	44
35cm	25	33	35	35	35	34	34	33
45cm	19	29	31	32	31	30	30	28
60cm	17	28	28	28	27	27	27	25
90cm	18	28	29	29	29	30	30	28

Rangée R4 /D, le 12 /05/03 Pluv = 1 mm

	valeurs de succion en bar							
	8h00	10h00	12h00	15h00	18h00	19h00	22h00	8h00
15cm	16	41	42	40	38	36	36	35
35cm	6	34	36	35	34	33	33	32
45cm	18	40	38	37	36	36	34	34
60cm	15	33	33	32	30	29	29	30
90cm	6	36	40	38	35	34	33	32

Rangée R1 /A le, 15 /05/03

	Succion cbar						
	9h00	11h00	12h00	14h00	17h00	19h00	20h00
15cm	20	23	26	30	20	20	20
35cm	20	23	28	33	26	24	23
45cm	18	22	27	31	24	22	21
60cm	16	24	19	23	23	22	22
90cm	2	13	20	26	24	24	23