



**CARACTERISATION DES PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES
DES SOLS DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL CROP-NEWS DE
KAMBOINSE**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE
L'ENVIRONNEMENT
OPTION : Infrastructures et Réseaux Hydrauliques
(IRH)**

Présenté et soutenu publiquement le 20 juillet 2015 par

Fanta COULIBALY

Travaux dirigés par: Dr. Dial NIANG, Enseignant-Chercheur
Centre Commun de Recherche Eau et Climat (2iE)

Dr. Rabah LAHMAR, Enseignant-Chercheur
Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique
pour le Développement (CIRAD)

Mr Vivien Chaim DOTO, Doctorant
Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau (LEAH)

Mr Jean-Marie DOUZET
Chercheur au CIRAD-Ouagadougou

Jury d'évaluation du stage :

Président : **Dr Mahamadou KOÏTA**

Membres et correcteurs : **Dr. Angelbert BIAOU**

Dr. Adjadi MOUNIROU

Dr. Dial NIANG

Promotion [2014/2015]



DEDICACE

Je dédie ce mémoire :

Tout d'abord à DIEU, LE TOUT PUISSANT, qui m'a montré le chemin de la vérité et pour son soutien sans failles

A tous ceux dont le soutien ne m'a jamais fait défaut dans mes études. Je pense notamment à:

Ma mère TOUGRI Perpétue et à mon père COULIBALY Abdoulaye pour leur amour exceptionnel, leur conseil et leur soutien inconditionnels.

A mes frères et à mes sœurs pour leur encouragement, leur compréhension, leur soutien.

A toute la famille COULIBALY

A tous mes amis et toute la promotion de IRH 2014/2015

A tous ceux qui ont contribué de façon directe ou indirecte à cette réussite.

REMERCIEMENTS

La mise en œuvre de ce travail de mémoire et la rédaction du présent document ont été rendues possible grâce au concours de plusieurs acteurs. C'est l'occasion pour nous de témoigner notre reconnaissance à toutes ces personnes qui n'ont ménagé aucun effort pour la réussite de ce travail. Nous tenons donc à adresser nos sincères remerciements particulièrement à :

- ◆ **Dr. Dial NIANG**, Enseignant-chercheur à l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), qui a proposé le thème. Toute ma reconnaissance pour sa disponibilité à guider et à orienter notre travail, ainsi que pour ses précieux conseils, et sa patience ;
- ◆ **Monsieur Vivien Chaim DOTO**, Doctorant à l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), qui n'a ménagé aucun effort pour m'encadrer. Merci pour sa disponibilité, ses encouragements et ses conseils ;
- ◆ **Monsieur Jean Marie DOUZET**, Chercheur au CIRAD basé au Burkina Faso, pour sa collaboration, sa disponibilité et ses conseils ;
- ◆ **Dr. Rabah LAHMAR**, Chercheur au CIRAD, responsable du projet ABACO en détachement au 2iE, chef du site expérimental Crop-News de Kamboinsé, de qui j'ai eu des encouragements et des conseils ;
- ◆ Tout le corps professoral et administratif de 2iE, plus particulièrement à tous ceux qui ont été mes enseignants.

Mes sincères remerciements vont aussi à l'endroit de Monsieur Mathieu KABORE, Monsieur Alexandre OUEDRAOGO, Monsieur Seydou YAMEOGO, à tous les stagiaires avec qui j'ai collaboré, qui n'ont cessé de me soutenir par leurs conseils et leurs attentions.

A toutes ces personnes, je réitère ma profonde gratitude.

RESUME :

Cette étude a été menée sur le dispositif Crop-News de Kamboinsé. Il s'agit d'une expérience mettant en association un arbuste natif (le *Piliostigma*) et une céréale (le sorgho) selon deux pratiques culturales distinctes (zaï+mulch et semi-direct+mulch). L'objectif recherché est une amélioration des caractéristiques physiques de ces sols pour faciliter les transferts hydriques.

Compte tenu du rôle assigné aux organisations superficielles des sols, des mesures de terrain ont été effectuées pour évaluer l'impact de la dégradation du milieu sur leur fonctionnement hydrique (conductivité hydraulique à saturation, capacité d'infiltration et conductivité hydraulique non saturée). C'est dans ce contexte qu'un dispositif expérimental constitué de vingt-quatre parcelles de mesure a été installé. Pour procéder aux mesures de terrain, un infiltromètre Muntz et un infiltromètre à disque ont été utilisés.

Les résultats ont montré deux types de comportement des parcelles. En effet, certaines parcelles (11, 15, 16, 23 et 24) ont une très faible capacité d'infiltration avec des valeurs de K_s de l'ordre de 1 mm/h alors que d'autres parcelles (4, 7, 9 et 12) sont plus aptes à l'infiltration avec des valeurs de K_s de l'ordre de 8 à 10 mm/h. Nous avons remarqué également que la conductivité hydraulique non saturée et la sorptivité diminuent lorsque la succion augmente, ceci est dû au fait qu'au voisinage de la saturation, le nombre de pores mis en jeu est important et il a tendance à décroître lorsqu'on s'en éloigne.

Mots clés : Conductivité hydraulique, infiltration, sorptivité, porosité, saturation.

ABSTRACT

This study was conducted on the Kamboinsé Crop-News long-term experiment site. The experiment concerns the intercropping of cereals (*Sorghum*) with native evergreen wood shrubs (*Piliostigma*) in two distinct cultural practices, Zaï technique (Zaï+mulch) and no-tillage (mulch). The objective aimed, is to improve the physical characteristics of these soils to ease water transfers.

Taking account into the role assigned to the surface soil organizations, the field measurements were performed to assess the impact of environmental degradation to their water functioning (hydraulic conductivity at saturation, infiltration capacity and unsaturated hydraulic conductivity). It is in this context that an experiment site that is made up of of twenty-four measurement plots was installed. To carry out the field measurements, two infiltrometers (Muntz and TRIMS) were used.

The results showed two types of behaviour of plots. Some plots (11, 15, 16, 23 and 24) have the lowest infiltration capacity which the K_s is 1 mm / h while the other plots (plot 4, 7, 9 and 12) are more suitable for infiltration with the K_s is 8 to 10 mm / h. We also noted that the hydraulic conductivity at unsaturated state and sorptivity decrease when the suction increases, this is due to the fact that close to saturation condition, the number of pores involved is important and it tends to decrease when it is away from the saturation state.

Key words: Hydraulic conductivity, infiltration, sorptivity, porosity, saturation.

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

ΔS	: Variation de stock d'eau [mm]
c	: Capacité capillaire [L]
D	: Diffusivité capillaire [L/T]
div	: Divergent
g	: Accélération de la pesanteur [m/s ²]
grad	: Gradient
H	: Charge hydraulique ou énergie totale [m]
h	: Hauteur de pression [m]
$I(t)$: Infiltration cumulée [mm]
$i(t)$: Flux d'infiltration [mm/h]
K	: Conductivité hydraulique non saturée [L/T]
K_s	: Conductivité hydraulique à la saturation [L/T]
q	: Débit [m/s]
r	: Rayon [L]
S	: Sorptivité capillaire [L/t ^{1/2}]
$t_{\text{gé0}}$: Temps géométrique [mn]
t_{grav}	: Temps gravitaire [mn]
t_p	: Temps de ruissellement [mn]
t_{stab}	: Temps de stabilisation [mn]
z	: Charge gravitationnelle [m]
α, n, m	: Constantes du sol [-]
η	: Paramètre de forme [-]
θ	: Teneur en eau [cm ³ /cm ³]
θ_{cr}	: Teneur en eau à la capacité de rétention [cm ³ /cm ³]

θ_f	: Teneur en eau finale [cm^3/cm^3]
θ_i	: Teneur en eau initiale [cm^3/cm^3]
θ_{pf}	: Teneur en eau au point de flétrissement permanent [cm^3/cm^3]
θ_r	: Teneur en eau résiduelle [cm^3/cm^3]
θ_s	: Teneur en eau à la saturation [cm^3/cm^3]
λ_c	: Longueur capillaire [L]
λ_m	: Dimension moyenne des pores fonctionnels [L]
ρ_w	: Masse volumique de l'eau [Kg/m^3]
ϕ	: Succion [cm]
ϕ_e	: Succion d'entrée de l'air [cm]
Φ_0	: Potentiel du flux [L^2/T]
ABACO	: Agroecology-based aggradation-conservation agriculture
BUNASOL	: Bureau national des sols/ Burkina Faso
CIRAD	: Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
Fig.	: Figure
INERA	: Institut d'Etudes et de Recherches Agricoles/ Burkina Faso
TRIMS	: Triple ring infiltrometer at multiple suctions
WASA	: Woody Amendements for Sudano-Sahélian Agriculture.
2iE	: Institut Internationale d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

TABLE DE MATIERES

DEDICACE.....	I
REMERCIEMENTS	II
RESUME :.....	III
LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS.....	V
I. INTRODUCTION.....	4
II. SOLS ET EQUATIONS MATHÉMATIQUES	6
2.1. DEFINITION	6
2.2. TEXTURE ET STRUCTURE DU SOL.....	6
2.3. ETAT DE L'EAU DANS LE SOL.....	6
2.4. NOTION D'INFILTRATION D'EAU DANS LE SOL.....	8
2.5. TRANSFERT HYDRIQUES EN MILIEU NON SATURE	9
2.5.1. <i>La conductivité hydraulique</i>	9
2.5.2. <i>La sorptivité</i>	10
2.5.3. <i>Loi dynamique</i>	10
2.5.4. <i>Equation de continuité</i>	10
2.5.5. <i>Equation générale du mouvement de l'eau</i>	11
III. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE	13
IV. MATERIEL ET METHODES	14
4.1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL	14
4.2. MATERIELS	15
4.2.1. <i>Infiltromètre de Müntz ou méthode du double anneau</i>	15
4.2.2. <i>Infiltromètre à disque</i>	16
4.3. METHODES DE CALCUL	17
4.3.1. <i>Infiltromètre de Müntz</i>	17
4.3.2. <i>Infiltromètre à disque</i>	18
V. RESULTATS ET DISCUSSION.....	24
5.1. CAPACITE D'INFILTRATION ET CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE A SATURATION	24
5.2. CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE NON SATUREE.....	25
5.3. SORPTIVITE	27
5.4. DIMENSION MOYENNE DES PORES FONCTIONNELS	28
5.5. TEMPS GRAVITAIRE.....	28
	1

VI. CONCLUSION	30
BIBLIOGRAPHIE	31
ANNEXES:	35

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Conductivité hydraulique à saturation K_s (cm/h) sur l'ensemble des parcelles	24
Tableau 2: Taille moyenne des pores fonctionnels pour les six parcelles à $h = -40$ mm.....	28
Tableau 3 : Temps gravitaire (mm) pour la pression $h = -40$ mm sur les six parcelles	28

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Variation temporelle du régime d'infiltration et de l'infiltration cumulative.....	9
Figure 2:Localisation de la zone d'étude	14
Figure 3:Parcelles expérimentales du dispositif Crop- News de Kamboinsé	15
Figure 4: Exemple d'évolution temporelle de la capacité d'infiltration.....	18
Figure 5: Calcul des paramètres K_s et α de la relation de Gardner (1958), à partir de la mesure des flux d'infiltration en régime permanent $q_\infty(h_1)$ et $q_\infty(h_2)$ aux pressions h_1 et h_2	20
Figure 6: Exemple de relation entre $\frac{dI}{d\sqrt{t}}$ et \sqrt{t}	22
Figure 7 : Evolution de la conductivité hydraulique non saturée en fonction de différentes succions sur quelques parcelles.....	26
Figure 8: Evolution de la sorptivité en fonction de différentes succions sur quelques parcelles...	28

LISTE DES PHOTO

Photo 1: Le double anneau (Müntz).....	16
Photo 2: Infiltromètre à disque (TRIMS).....	17

I. INTRODUCTION

Au Burkina Faso, tout comme dans l'ensemble des pays sahéliens, l'économie repose en majorité sur l'agriculture, une activité dépendant des conditions climatiques et des ressources naturelles. Cependant, on assiste de plus en plus à une dégradation de ces ressources naturelles, en particulier les sols. Les fortes fluctuations de la production agricole peuvent s'expliquer par ce phénomène, mais aussi par les aléas climatiques. En effet, la pluviométrie est caractérisée par de fortes irrégularités spatio-temporelles et les sols eux, deviennent incultes à cause de l'apparition de plus en plus fréquente de glacis caractérisés par de forts taux de ruissellement au détriment de l'infiltration.

Face à pareille situation, plusieurs stratégies faisant appel à la maîtrise de l'eau ont été élaborées (Lamso, 2002). C'est dans cette perspective que l'expérience Crop-News a été développée sur le site de Kamboinsé dans le cadre du projet ABACO (Agroecology-Based Aggradation-Conservation Agriculture). Cette expérience vise à restaurer et à conserver les propriétés fertilisantes des sols à travers l'association d'arbustes natifs (*PilioStigma reticulatum*) et d'une céréale (Sorgho) (Lahmar et Hamma, 2011).

Au niveau de cette expérience, une étude sur les transferts hydrique a été initiée et notre thème de recherche intitulé «caractérisation des paramètres hydrodynamiques des sols du dispositif expérimental Crop-News de Kamboinsé», en est une des thématiques abordées.

En effet, selon les travaux de Casenave et Valentin (1992) le comportement hydrodynamique des couches superficielles du sol, et plus particulièrement des premiers centimètres, reste difficile à caractériser in situ (Guedenon, 2010). Pourtant ceux-ci jouent un rôle primordial dans la partition entre l'eau qui va pénétrer dans le sol, et participer à l'alimentation hydrique de la plante, et celle qui va ruisseler. Pour mieux comprendre le comportement superficiel des parcelles expérimentales, il a été initié cette étude dont l'objectif général est la détermination des propriétés hydrauliques de surface des sols du dispositif expérimental Crop-News de Kamboinsé. Cet objectif global se décline de façon spécifique par :

- la détermination de la conductivité hydraulique saturée K_s et de la capacité d'infiltration sur l'ensemble des parcelles ;
- la détermination de la conductivité hydraulique non saturée K .

Cette étude a été menée sur le site expérimental de Kamboinsé et elle est structurée en quatre parties :

- La première partie résume l'ensemble des concepts et des équations mathématiques décrivant le sol;
- Quant à la deuxième partie, elle regroupe les chapitres matériels et méthodes;
- La troisième partie synthétise l'ensemble des résultats et leur analyse ;
- La dernière partie quant à elle, regroupe la conclusion et les recommandations.

II. SOLS ET EQUATIONS MATHÉMATIQUES

2.1. Définition

Le sol peut être défini comme un réservoir d'eau pour l'alimentation en eau des plantes et des êtres vivants (Bruand et Coquet, 2006). Il est constitué de trois phases dépendantes les unes des autres (Niang, 2014) :

- La phase solide (matrice), composée de deux sortes d'éléments :
 - a. les éléments minéraux constitués de particules de taille et de forme diverses (Graviers, sables, limons, argiles, oxydes de fer, d'aluminium, etc....) ;
 - b. les éléments organiques constitués de débris végétaux ou animaux en état de décomposition plus ou moins avancée ;
- La phase liquide appelée aussi solution du sol, composée de l'eau de substances dissoutes provenant de l'altération des roches, de la décomposition des matières organiques et des apports par l'Homme ;
- La phase gazeuse, représentée par l'air du sol de composition assez similaire à celle de l'air atmosphérique (N_2 , O_2 , CO_2 , traces de gaz rares et vapeur d'eau) avec toutefois davantage de CO_2 et moins d' O_2 , étant donné l'activité biologique dans le sol.

L'importance relative des phases liquide et gazeuse, ainsi que leur composition, varient fortement dans le temps et l'espace. Lorsque la fraction gazeuse est absente, on parle de milieu saturé et dans le cas où les trois phases sont présentes, le sol est dit non saturé.

2.2. Texture et structure du sol

La dynamique de l'eau et des substances dissoutes dans le sol est étroitement liée à l'architecture de la phase solide à travers deux caractéristiques principales : la texture et la structure.

La texture est l'expression des proportions relatives des diverses classes de dimension des particules solides existant dans le sol. L'association de ces particules définit la porosité texturale ou microporosité.

La structure rend compte de la façon dont sont organisées les associations élémentaires comme les agrégats. Ce deuxième niveau d'organisation définit la porosité structurale ou macroporosité.

2.3. Etat de l'eau dans le sol

L'état de l'eau dans le sol se caractérise par la teneur en eau du sol et son potentiel hydrique.

La teneur en eau du sol est le paramètre physique utilisée pour caractériser la disponibilité de l'eau dans le sol au moment de la mesure. Elle est fonction de la porosité et de la perméabilité du sol. Pour caractériser l'état et le comportement de l'eau du sol, la teneur en eau seule ne suffit pas. Il faut tenir compte de l'état énergétique de l'eau du sol qui se traduit par le concept de potentiel sol-eau (Mermoud A. , 2010).

Le potentiel traduit l'état de liaison de l'eau du sol ou la quantité d'énergie qu'il faudrait fournir pour l'extraire du sol. L'énergie potentielle est exprimée sous forme de potentiel H en colonne d'eau par la somme algébrique de la charge de pression h et de la charge gravitationnelle z :

$$H = h - z \quad (1)$$

Avec :

Z : charge de gravité et h : charge de pression.

L'état de pression de l'eau dans le sol peut être très différent selon que l'on ait affaire à un sol saturé en eau, ou non saturé. La charge de pression en milieu saturé est égale à la hauteur de pression de l'eau et est de signe positif tandis qu'en milieu non saturé elle est négative et vaut l'opposé de la succion ψ .

La variation de la valeur de la succion ou de la charge de pression en fonction de la teneur en eau volumétrique est appelée la courbe de rétention du sol. La capacité capillaire du sol est l'inverse de la pente de la courbe de rétention. (Musy et Higy, 2004)

$$c = -\frac{d\theta}{d\Psi} = \frac{d\theta}{dh} \quad (2)$$

Pour pouvoir résoudre les problèmes liés au transport de l'eau et des solutés dans les sols, un nombre croissant de modèles utilisent la loi de Darcy généralisée et requièrent par conséquent que $\theta(h)$ soit décrit par une fonction mathématique continue et dérivable (Bruand et Coquet, 2006). Parmi les fonctions proposées, nous avons retenu celles de :

- van Genuchten (1980)

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + (\alpha\Psi^n)]^{-m} \quad (3)$$

Avec α , n et m des constantes du sol. Ces valeurs sont déterminées en ajustant la fonction aux valeurs expérimentales. Le paramètre n est soumis à la contrainte $n > 1$ de façon à ce que la courbe de rétention approche la saturation avec une pente nulle.

θ_s est la teneur en eau volumique à saturation du sol, θ_r , la teneur en eau résiduelle

- Brooks et Corey : (Mermoud, 2010)

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{\Psi}{\Psi_e}\right)^{-\lambda} \quad \text{Si } \Psi > \Psi_e \quad (4)$$

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = 1 \quad \text{Si } \Psi < \Psi_{ei} \quad (5)$$

Avec :

λ : l'index de distribution des pores (il est d'autant plus élevé que le sol est grossier) ;

Les paramètres λ , ψ_e , θ_r , voire θ_s sont obtenus par calage sur les valeurs expérimentales.

2.4. Notion d'infiltration d'eau dans le sol

L'infiltration caractérise le processus de pénétration de l'eau dans le sol lorsque celui-ci reçoit une averse ou s'il est soumis à une submersion. L'eau d'infiltration remplit en premier lieu les interstices du sol et des forces de succion (Musy et Higy, 2004). Le flux maximal d'eau $i(t)$ que le sol peut absorber à travers sa surface est appelé le régime d'infiltration. Il est exprimé en mm/h et dépend fortement des propriétés du sol, ainsi que du régime d'alimentation qui est caractérisé par le taux d'apport d'eau à la surface (Mermoud, 2010). L'infiltration cumulative $I(t)$ se traduit par le total du volume d'eau infiltrée pendant une période donnée. Elle est égale à l'intégrale dans le temps du régime d'infiltration.

$$I(t) = \int_{t=0}^t i(t).dt \quad (6)$$

L'infiltrabilité i varie et décroît en général au cours du temps. Cela est lié à plusieurs aspects comme (Mermoud, 2010) :

- Une diminution du gradient de succion
- Une possible modification des propriétés du sol (dégradation de la structure, migration de particules, etc...)

La Figure 1 illustre la variation temporelle du taux d'infiltration $i(t)$ et celle de l'infiltration cumulée $I(t)$.

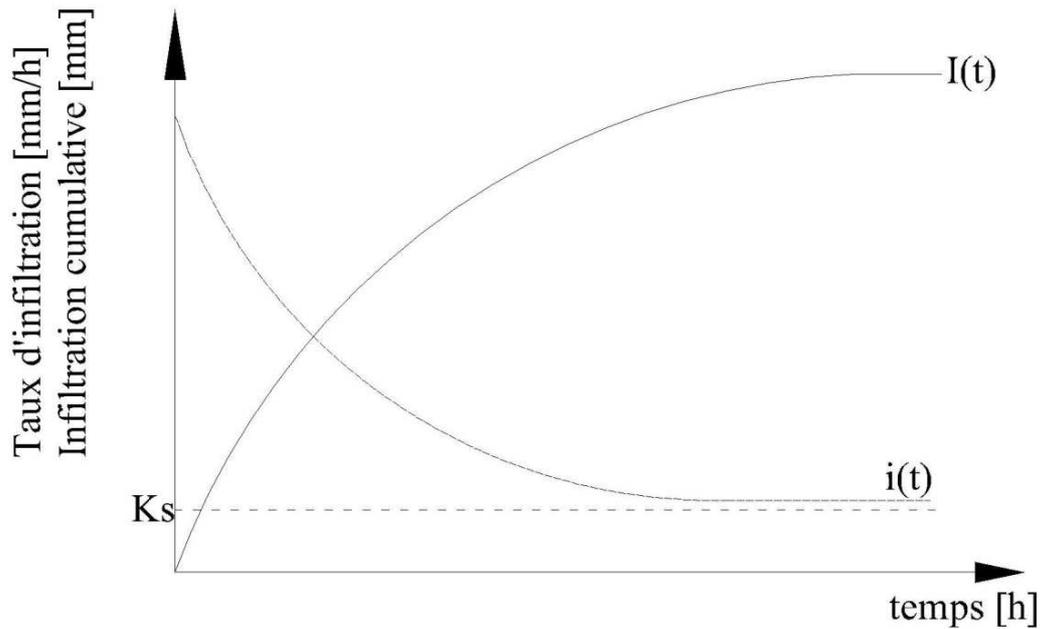


Figure 1 : Variation temporelle du régime d'infiltration et de l'infiltration cumulative.

De cette figure, on constate que la conductivité hydraulique à la saturation est la limite du taux d'infiltration lorsque le temps tend vers l'infinie.

2.5. Transfert hydriques en milieu non saturé

Les processus de circulation de l'eau dans le sol et dans la zone racinaire des plantes, se déroulent en général dans des conditions de sol non saturé. Ces processus d'écoulement sont extrêmement complexes et difficiles à décrire quantitativement car ils donnent lieu à des variations de l'état de la teneur en eau pendant l'écoulement. Ces variations impliquent des relations complexes entre la teneur en eau, la succion et la conductivité hydraulique (Guedenon, 2010).

2.5.1. La conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique K est l'un des paramètres décrivant la dynamique des mouvements de l'eau dans le sol. Elle peut être exprimée en fonction, soit de θ , soit de h . la relation $K(\theta)$ est fortement non linéaire mais moins affectée par l'hystérésis que $K(h)$. La relation $K(\theta)$ est donnée par la formule de Brooks et Corey (1964) comme suit :

$$\frac{K}{K_s} = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta \quad (7)$$

K_s : Conductivité hydraulique à la saturation ;

θ_r : Teneur en eau résiduelle ;

θ_s : Teneur en eau à la saturation ;

η : Paramètre de forme.

La relation $K(h)$ est donnée par la formule de Gardner (1985) :

$$K(h)=K_s e^{\alpha h} \quad (8)$$

Avec K_s : la conductivité hydraulique à la saturation et α une constante caractéristique du sol.

2.5.2. La sorptivité

La sorptivité est la capacité d'un sol à absorber l'eau par capillarité. Elle est fonction du type de sol mais aussi des conditions initiales et aux limites. Plus le contraste d'humidité $\Delta\theta$ est important, plus la sorptivité est grande. La formule de Parlange (1975) est une des méthodes qui permettent son estimation :

$$S^2=2\int_{\theta_i}^{\theta}(\theta_s + \theta - 2\theta_i)D(\theta)d\theta \text{ avec } D: \text{ diffusivité capillaire (L/T)}$$

2.5.3. Loi dynamique

La conductivité hydraulique n'est pas constante en milieu non saturé. Elle varie avec la teneur en eau θ et la charge de pression h . Une diminution de l'humidité se traduit par une décroissance très rapide de la conductivité hydraulique, si bien que $K=K(\theta)$ (Mermoud, 2010). La loi de Darcy étendue aux milieux non saturés s'écrit donc :

$$q = -K(\theta) \text{ grad } H \quad (10)$$

avec :

q : débit par unité de surface;

k : conductivité hydraulique à la succion imposée ;

θ : la teneur en eau ;

H : la charge hydraulique ou énergie totale.

2.5.4. Equation de continuité

L'équation de continuité s'obtient par application de la loi de la conservation de la matière à un volume élémentaire de sol. La loi de conservation exprime que le régime de variations de la teneur en eau dans le temps est égal au régime de variations spatiales du flux. En milieu non saturé, l'équation de continuité s'écrit sous la forme suivante :

$$\operatorname{div}q = -\frac{\partial\theta}{\partial t} \quad (11)$$

2.5.5. Equation générale du mouvement de l'eau

On l'obtient en associant l'équation dynamique à la loi de continuité :

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \operatorname{div}[K(\theta)\operatorname{grad}(h - z)] \quad (12)$$

Cette équation démontre clairement que l'écoulement de l'eau dans un sol non saturé dépend des deux relations caractéristiques du milieu, à savoir :

- La relation charge de pression-teneur en eau : $h(\theta)$
- La relation conductivité hydraulique-teneur en eau $K(\theta)$ ou conductivité hydraulique-charge de pression $K(h)$.

Ces relations doivent être déterminées expérimentalement car elles dépendent de la structure et de la texture du sol. En général ce ne sont pas des fonctions univoques de l'humidité θ , particulièrement la courbe caractéristique $h(\theta)$ qui diffère selon que l'on se retrouve en période d'humidification ou de dessèchement.

L'équation générale des transferts d'eau dans le sol peut être simplifiée en exprimant l'équation uniquement en fonction de θ ou de h .

a. L'équation en h

On peut retenir comme seule variable dépendante de la pression h en faisant appel à la notion de capacité capillaire c définie par :

$$C(h) = \frac{d\theta}{dh} \quad (13)$$

La capacité capillaire traduit l'aptitude d'un sol à retenir ou à libérer l'eau suite à une variation de succion. Etant donné que $h = f(\theta)$ et $\theta = f(x, y, z \text{ et } t)$, la dérivée partielle $\partial h / \partial t$ peut s'écrire comme suit :

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{dh}{d\theta} \frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{1}{c(h)} \frac{\partial\theta}{\partial t} \quad (14)$$

$$\text{Et donc : } \frac{\partial\theta}{\partial t} = c(h) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (15)$$

En introduisant cette relation dans l'équation générale, on obtient :

$$c(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \operatorname{div}[K(h)\operatorname{grad}(h - z)] \quad (16)$$

Cette expression, dite équation de Richards (1931) présente l'avantage d'être applicable à tout domaine d'écoulement, qu'il soit saturé ou non car la pression varie continûment dans tout le domaine d'écoulement contrairement à la teneur en eau qui devient constant dans la zone saturée amenant des indéterminations. Elle est positive dans la zone saturée et négative dans zone non saturée. Les relations $c(h)$ et $K(h)$ peuvent se déduire des fonctions hydrauliques de base $h(\theta)$ et $K(\theta)$.

b. L'équation en θ

Si l'on choisit θ comme variable, on aboutit à une équation de forme analogue à celle des équations de diffusion et de conduction de la chaleur en faisant appel à une fonction de diffusivité définie par :

$$D(\theta) = \frac{K(\theta)}{c(h)} = K(\theta) \frac{dh}{d\theta} \quad (17)$$

Puisque $h=f(\theta)$ et $\theta= f(x, y, z, t)$, les dérivées partielles $\frac{\partial h}{\partial x}$, $\frac{\partial h}{\partial y}$ et $\frac{\partial h}{\partial z}$ peuvent s'écrire ainsi :

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{dh}{d\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (18) \quad \frac{\partial h}{\partial y} = \frac{dh}{d\theta} \frac{\partial \theta}{\partial y} \quad (19) \quad \text{et} \quad \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{dh}{d\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (20)$$

En introduisant ces relations dans l'équation générale, on obtient :

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \text{div}[D(\theta)\text{grad } \theta] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} = \text{div}[D(\theta)\text{grad } \theta] - \frac{dK}{d\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (21)$$

Cette équation aux dérivées partielles non linéaire du second ordre est dite de Folkker-Planck. Pour la résoudre il est nécessaire de déterminer les fonctions $D(\theta)$ et $K(\theta)$.

III. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

Notre zone d'étude est située dans la zone soudano-sahélienne, sur le site de Kamboinsé. Les sols du plateau mossi dont fait partie la zone de Kamboinsé sont de type cuirassés et pauvres en éléments nutritifs, ils sont caractérisés par une faible capacité d'infiltration et de rétention de l'eau. Ces sols sont qualifiés de sol ferrugineux tropicaux lessivés reposant sur du matériau sableux plus profonds ; des sols hydromorphes peu humifères à pseudogley hérités en association avec des lithosols sur cuirasse ferrugineuse. Ils présentent une texture à dominance sablo-argileuse en surface et argileuse en profondeur. La profondeur de la zone d'enracinement est très variable et peut-être limitée par l'horizon induré (INERA, 1995).

La localité de Kamboinsé est dominée par une végétation de type savane arbustive claire, parsemée de quelques grands arbres et d'une strate herbacée. Cette végétation est de plus en plus réduite pour des besoins d'habitations et d'infrastructures.

On distingue dans cette formation arbustive plusieurs espèces dominantes comme le *Combretum micranthum*, le *Tamarindus indica*, le *Diospyros mespiliformis*, etc... (INERA, 1995).

Les champs cultivés comportent des cultures annuelles soient le mil et le sorgho. A proximité des points d'eau et du barrage de Kamboinsé, situé non loin de notre site d'étude, sont cultivés des espèces maraichères comme l'oignon, le piment, le concombre, le chou, la tomate etc...

IV. MATERIEL ET METHODES

4.1. Dispositif expérimental

Cette étude se déroule dans la localité de Kamboinsé (Fig.2) située au Nord de la ville Ouagadougou (capitale du Burkina Faso), à environ 17 Km du centre-ville, dans la province du Kadiogo. Les coordonnées géographiques du dit site sont: longitude $12^{\circ}27'59,86''$ N et la latitude $1^{\circ}32'57,14''$ O en degrés, minutes, secondes (DMS).

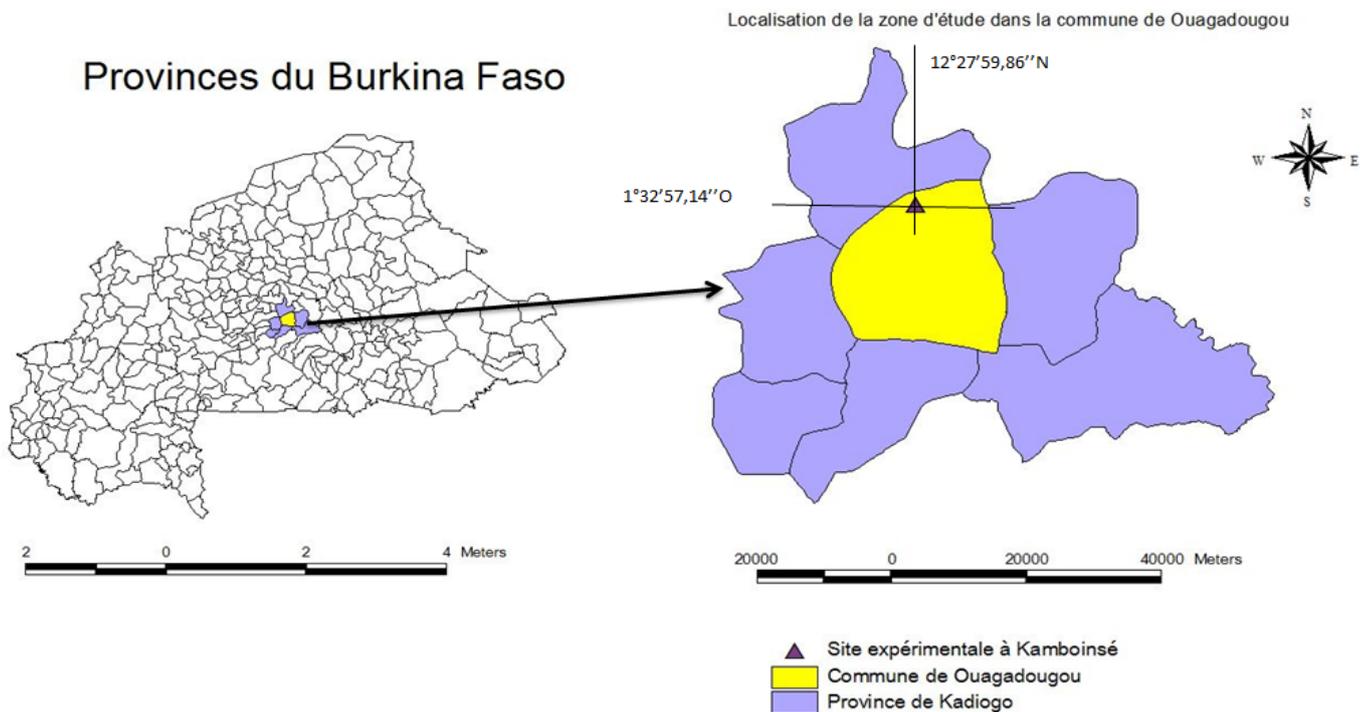


Figure 2: Localisation de la zone d'étude

Le site expérimental « Crop-News » de Kamboinsé a été installé en 2012 dans le cadre des projets ABACO et WASSA, pour une agriculture basée sur de nouvelles pratiques innovantes. Partant des enseignements des insuffisances et des limites des différents types d'aménagements dans un contexte de pauvreté et face à la persistance des aléas climatiques et de la faible productivité de l'agriculture pluviale, plusieurs stratégies faisant appel à la maîtrise de l'eau ont été élaborées. Cette expérience vise à mieux comprendre la dynamique de l'eau dans un sol sur lequel est conduite une association de sorgho et d'un arbuste (*Piliostigma reticulatum*), introduit à des densités croissantes, avec deux pratiques culturales : le zai et le semis direct (Fig. 3).



Figure 3:Parcelles expérimentales du dispositif Crop- News de Kamboinsé

4.2. Matériels

Pour la caractérisation des propriétés hydrauliques de surface des parcelles expérimentales, nous avons utilisé deux types d'appareil : l'infiltromètre de Müntz et l'infiltromètre à disque.

4.2.1. Infiltromètre de Müntz ou méthode du double anneau

Les essais de détermination de la conductivité hydraulique à saturation K_s et de la capacité d'infiltration ont été faits avec le double-anneau (Photo 1).

C'est un dispositif destiné à caractériser l'infiltrabilité d'un sol dans le cas d'un écoulement monodimensionnel vertical (Boivin, 1990). Il exige beaucoup d'eau et de temps, et ne convient pas pour des pentes supérieures à 5 %. Le Müntz est composé de deux anneaux en tôle d'acier : un anneau intérieur de diamètre 25 cm et un anneau extérieur de diamètre 33 cm.



Photo 1: Le double anneau (Mûntz)

4.2.2. Infiltromètre à disque

L'infiltromètre à disque est de nos jours largement utilisé pour la mesure de la conductivité hydraulique non saturé K , de la sorptivité capillaire S des sols au voisinage de la saturation. Le principal avantage de cette technique est qu'elle permet d'explicitier la relation entre la conductivité hydraulique et le potentiel de l'eau du sol, et d'enduire des informations sur le fonctionnement hydrodynamique de la macroporosité du sol (Coquet et al., 2000).

Un infiltromètre à disque à succion contrôlée (Photo 2) est structuré comme suit :

- Une embase circulaire ;
- Un disque creux muni à sa base d'une membrane en nylon dont la porosité a été parfaitement calibrée;
- Un réservoir d'alimentation gradué
- Un vase de Mariotte permettant de régler la pression. Elle est munie d'une pince de Mohr qui sert d'obturateur.

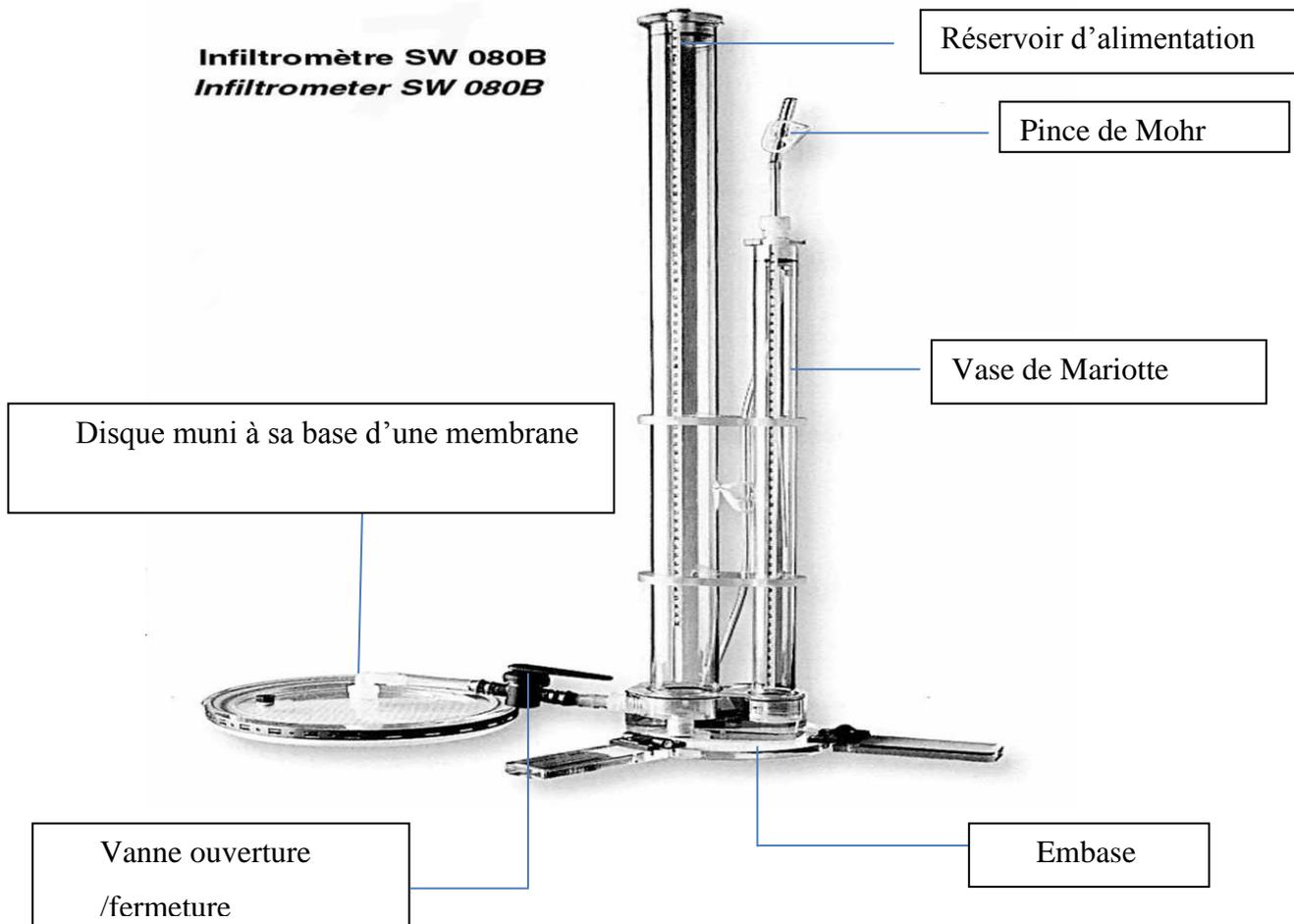


Photo 2: Infiltromètre à disque (TRIMS)

4.3. Méthodes de calcul

4.3.1. Infiltromètre de Müntz

La méthode de l'infiltromètre de Müntz a été utilisée pour déterminer la conductivité hydraulique à saturation de la surface du sol. L'appareil est constitué de deux cylindres concentriques qui sont introduits dans le sol sur quelques centimètres de profondeur. Les essais ont été réalisés en imposant une charge constante (3 cm) dans le cylindre central. La présence du cylindre externe permet de limiter la diffusion latérale de l'eau. Le processus d'infiltration débute généralement par une décroissance rapide puis diminue plus lentement pour aboutir à un régime stable, caractérisé par une valeur de la capacité d'infiltration (Fig.4) proche de la conductivité hydraulique à saturation.

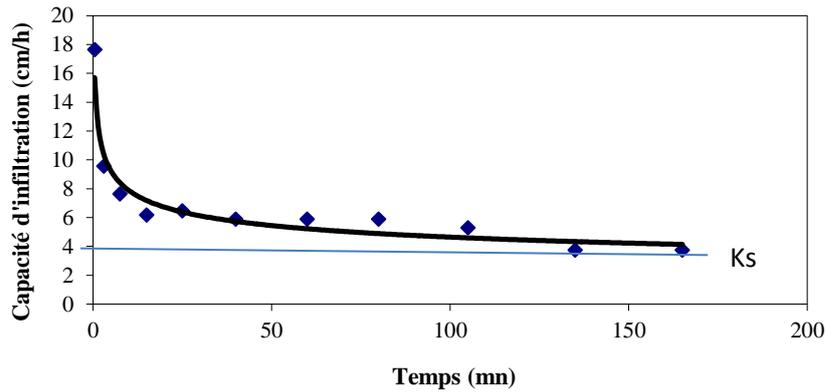


Figure 4: Exemple d'évolution temporelle de la capacité d'infiltration

Auteur : Fanta COULIBALY

Sur chaque parcelle, nous avons effectué une mesure représentant la valeur de la conductivité hydraulique à saturation.

4.3.2. Infiltromètre à disque

Il existe plusieurs méthodes d'analyse pour les paramètres hydrodynamiques du sol à travers l'infiltromètre à disque. Nous allons en énumérer un certain nombre, mais pour cette étude c'est la méthode mono-test en régime transitoire qui sera utilisée en ce sens qu'elle fournit une très bonne estimation de la conductivité hydraulique non saturée.

Méthode en régime quasi-permanent fondée sur la solution de Wooding (1968)

Wooding (1968) a établi une solution approchée pour calculer le flux en régime permanent à partir d'un disque de rayon r :

$$q_{\infty}(h_0) = K(h_0) + \frac{4\Phi(h_0)}{\pi r} \quad (22)$$

$q_{\infty}(h_0)$ est le flux d'infiltration en régime permanent, $K(h_0)$, la conductivité hydraulique du sol à la charge de pression h_0 , r le rayon du disque et $\Phi(h_0)$ le potentiel d'écoulement (Gardner, 1958) défini par:

$$\Phi(h_0) = \int_{h_i}^{h_0} K(h)dh \quad (23)$$

h_0 est la pression initiale de l'eau dans le sol.

La solution proposée par Wooding (1968) résulte de la résolution de l'équation de Richards linéarisée (Pullan, 1990) appliquée au cas du régime permanent d'infiltration axisymétrique. Elle repose sur les hypothèses suivantes:

Le sol est considéré comme un milieu semi-infini (limité uniquement par sa surface), homogène et isotrope;

- la pression initiale h_i du sol est constante sur tout le profil;
- la relation $K(h)$ est de type exponentiel (Gardner, 1958):

$$K(h) = K_s \exp(\alpha h) \quad (24)$$

K_s est la conductivité hydraulique à saturation et α une constante caractéristique du sol.

Avec cette dernière hypothèse, le potentiel d'écoulement devient:

$$\Phi(h_0) = \frac{K(h_0) - K(h_i)}{\alpha} \quad (25)$$

Si $K(h_i)$ peut être négligé devant $K(h_0)$, on obtient:

$$\Phi(h_0) = \frac{K(h_0)}{\alpha} \quad (26)$$

et l'équation (20) se simplifie en:

$$q_\infty(h_0) = K(h_0) \left[1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right] = K_s \exp(\alpha h_0) \left[1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right] \quad (27)$$

Méthode multipotentiel (Ankeny et al., 1991)

La relation (27) montre que, pour un disque de rayon r et une pression d'eau h_0 donnés, le flux d'infiltration ne dépend que de deux paramètres: la conductivité hydraulique à saturation K_s et le coefficient α . D'où l'idée d'utiliser deux mesures de $q_\infty(h_0)$ réalisées au même endroit à deux valeurs de h_0 différentes pour en déduire les deux inconnues K_s et α (Reynolds et Elrick, 1991; Ankeny et al., 1991). Ecrite sous forme logarithmique, l'équation (27) devient:

$$\ln(q_\infty(h_0)) = \ln \left[K_s \left(1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right) \right] + \alpha h_0 \quad (28)$$

Si l'on représente $\ln(q_\infty(h_0))$ en fonction de h_0 (Fig. 5), α correspond à la pente de la droite représentée par l'équation (8) et K_s se déduit de l'ordonnée à l'origine.

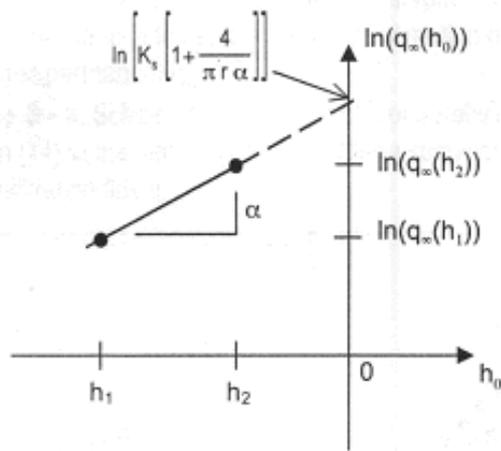


Figure 5: Calcul des paramètres K_s et α de la relation de Gardner (1958), à partir de la mesure des flux d'infiltration en régime permanent $q_\infty(h_1)$ et $q_\infty(h_2)$ aux pressions h_1 et h_2 .

Méthode monopotentiel (White et Sully, 1987)

White et Sully (1987) ont établi une relation entre potentiel d'écoulement $\Phi(h_0)$ et sorptivité capillaire S :

$$\Phi(h_0) = \frac{bS^2}{\theta_0 - \theta_i} \quad (29)$$

Où S dépend des teneurs volumiques en eau initiale θ_i et finale θ_0 , et b est un paramètre dépendant de la forme des relations $K(h)$ et $\theta(h)$. Il est fréquemment admis (Warrick et Broadbridge, 1992), que la valeur $b = 0.55$ convient pour la plupart des sols. La combinaison des équations (9) et (2) donne:

$$q_\infty = K(h_0) + \frac{4bS^2(h_0)}{\pi r(\theta_0 - \theta_i)} \quad (30)$$

La sorptivité capillaire se déduit du comportement à l'origine de l'infiltration cumulée

$$I(t) = \int_t q(t) dt \quad (31)$$

En effet, pour t proche de 0, on a (Philip, 1969; Smetten et al., 1995):

$$I(t) = S\sqrt{t} \quad (32)$$

L'avantage de cette méthode est qu'elle ne fait intervenir qu'une mesure à un seul potentiel. Elle est cependant sensible à l'estimation de $S(\theta_0, \theta_i)$ et aux erreurs de mesure de la teneur en eau.

Méthode fondée sur le régime transitoire

L'infiltration axisymétrique transitoire à partir d'une source circulaire à la surface du sol a été décrite par plusieurs chercheurs. Vandervaere et al. (2000b) ont proposé une expression similaire à l'équation à deux inconnues de Philip pour l'infiltration axisymétrique unidimensionnelle:

$$I = C_1\sqrt{t} + C_2t \quad (33)$$

Où I est l'infiltration cumulée et t le temps. C_1 et C_2 sont des coefficients qui peuvent être obtenus à partir des équations proposées par Haverkamp et al. (1994):

$$C_1 = S \quad (34)$$

$$C_2 = \frac{2-\beta}{3}K + \frac{\gamma S^2}{r(\theta_0 - \theta_1)} \quad (35)$$

Où γ est une constante comprise entre 0,6 et 0,8; Haverkamp et al. (1994) proposent de retenir une valeur de 0,7. β est un paramètre compris entre 0 et 1, dépendant du type de sol et de la charge de pression h_0 . L'avantage de cette méthode est qu'elle ne requiert pas d'estimation du flux en régime permanent et prend donc moins de temps. En revanche, elle ne fournit qu'un intervalle de valeurs pour la conductivité hydraulique K , entre K_{\min} pour $\beta = 0$ et K_{\max} pour $\beta = 1$. Vandervaere (1995) propose d'utiliser la valeur médiane $\beta = 0,6$ (en supposant une loi de distribution log-normale de la conductivité hydraulique) pour le calcul de la conductivité hydraulique, qui sera affectée d'un facteur d'incertitude de $\pm 1,4$.

Tous nos essais ont été analysés par la méthode différentielle (Vandervaere et al., 1997; Vandervaere et al., 2000b). Cette méthode consiste à dériver l'infiltration cumulée I (équation 33) en fonction de la racine carrée du temps \sqrt{t} , soit:

$$\frac{dI}{d\sqrt{t}} = C_1 + 2C_2\sqrt{t} \quad (36)$$

Une régression linéaire sur les valeurs principales permet de déterminer C_1 et C_2 (Fig. 6), et donc S et K à partir des équations 35 et 36. L'examen de cette figure montre que les premiers points ne sont pas situés sur la droite, ceci est dû à l'influence du sable de contact (Ndiaye., 2001), si bien qu'ils ne sont pas pris en compte pour la détermination des paramètres C_1 et C_2 .

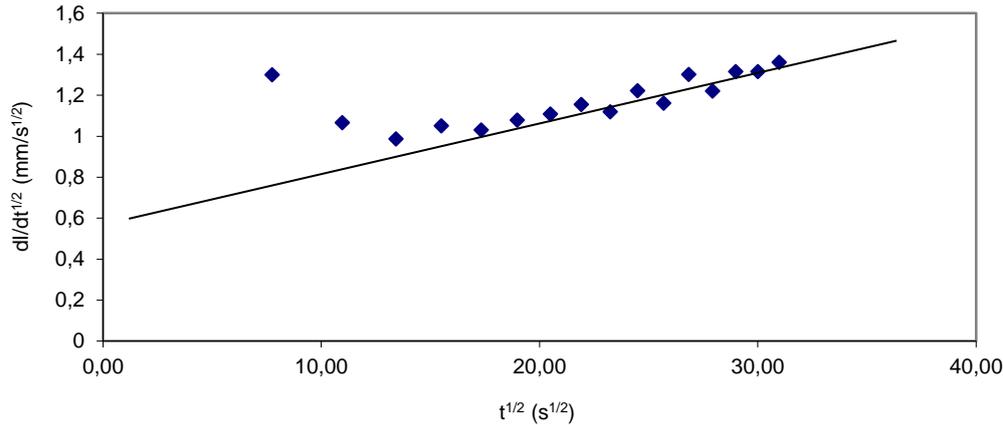


Figure 6: Exemple de relation entre $\frac{dl}{d\sqrt{t}}$ et \sqrt{t}

Si dans la formule qui donne la conductivité hydraulique:

$$K = \frac{3}{2-\beta} \left[C_2 - \frac{\gamma C_1^2}{r(\theta_0 - \theta_i)} \right] \quad (37)$$

on néglige les effets latéraux représentés par le second terme de l'équation (37), l'équation devient:

$$K = \frac{3}{2-\beta} C_2 \quad (38)$$

Avec $\beta = 0,6$

La connaissance de la sorptivité capillaire S et de la conductivité hydraulique K a été utilisée par certains auteurs (Philip, 1985; White et Sully, 1987) pour définir la longueur capillaire λ_c qui est une échelle macroscopique exprimant l'importance relative des forces capillaires et gravitaires agissant sur la pénétration de l'eau dans le sol. Sa formulation mathématique est la suivante:

$$\lambda_c = \frac{bS^2}{(\theta_0 - \theta_i)K} \quad (39)$$

En utilisant les lois élémentaires de la capillarité, Philip (1985) a introduit la dimension moyenne des pores hydrauliquement fonctionnels, λ_m , donnée par l'équation suivante:

$$\lambda_m = \frac{\sigma}{\rho_w g \lambda_c} \quad (40)$$

Où σ est le coefficient de tension superficielle de l'eau (0,072 N/m à 25°C), ρ_w la masse volumique de l'eau (1000 Kg/m³) et g l'accélération de la pesanteur (9,81 m²/s).

En introduisant dans l'équation (40), les valeurs numériques de σ , ρ_w et g on obtient, en exprimant λ_m en μm .

$$\lambda_m = 13.3 \frac{(\theta_0 - \theta_i) K}{S^2} \quad (41)$$

Détermination du temps gravitaire

Le temps gravitaire est obtenu à partir de K et de S , il s'agit du temps à partir duquel la gravité l'emporte sur les forces de capillarité (Philip, 1969). Il est déterminé par la formule suivante :

$$t_{grav} = \left(\frac{S}{K} \right)^2 \quad (42)$$

V. RESULTATS ET DISCUSSION

5.1. Capacité d'infiltration et conductivité hydraulique à saturation

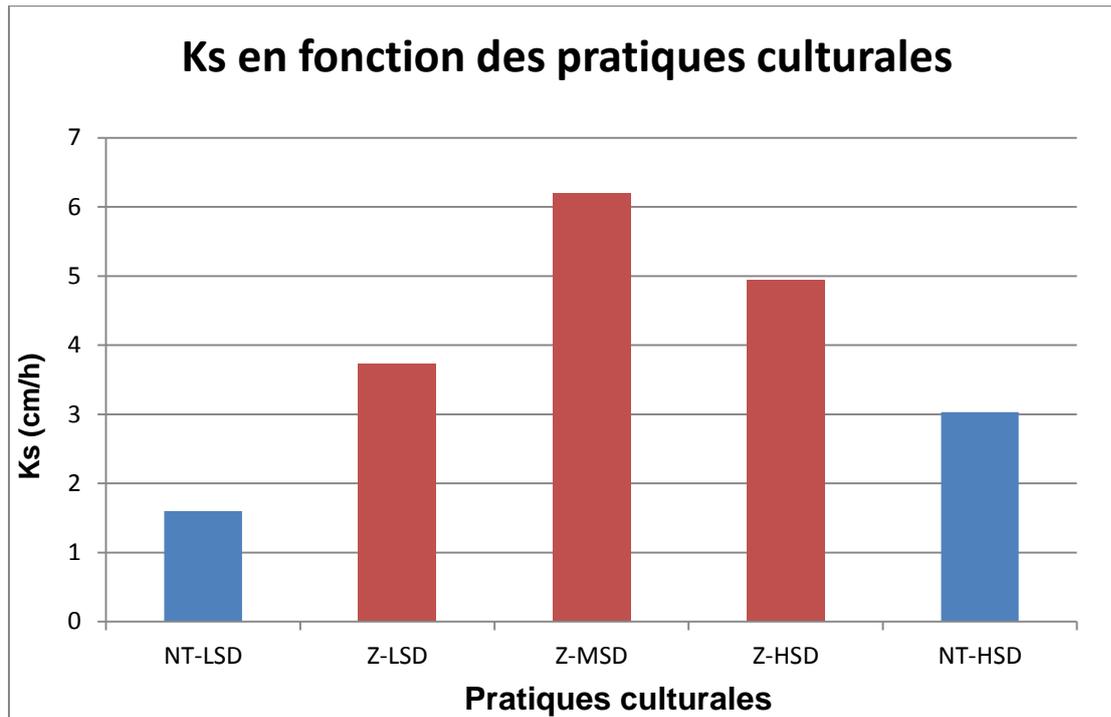
Les mesures d'infiltrométrie avec la méthode du double anneau se sont faites sous une pression de 3 cm et ont concerné l'ensemble des parcelles. Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau 1.

Tableau 1: Conductivité hydraulique à saturation Ks (cm/h) sur l'ensemble des parcelles

Parcelles	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ks (cm/h)	5,0	4,0	2,0	10,4	6,1	3,9	10,2	5,0	9,0	4,0	1,0	8,0
Parcelles	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Ks (cm/h)	4,0	4,1	1,7	1,6	1,0	1,2	2,0	3,2	4,8	2,5	1,7	0,4

L'examen de ce Tableau 1 montre de grandes différences selon l'organisation de la surface. Ces différences sont sans doute imputables aux réorganisations de la couverture du sol. En effet, nous remarquons de fortes valeurs sur les parcelles 4, 7, 9 et 12 caractérisées par des conditions favorables pour l'infiltration. Par contre sur les parcelles 11, 15, 16, 23 et 24, la capacité d'infiltration est très faible. Ceci est certainement dû à l'existence d'un micro horizon sus-jacent à porosité réduite surmontant, le plus souvent, un matériau à faible diffusivité gazeuse (Valentin, 1981).

De ces valeurs, l'effet des pratiques culturales sur la conductivité hydraulique saturée Ks a été évalué (présenté ci-dessous).



On note de cette figure, les plus fortes valeurs de conductivité hydraulique sur les parcelles à zaï + mulch. Ainsi le zaï + mulch crée des conditions favorables à l'infiltration.

Aucun effet du *piliostigma* n'est noté sur les propriétés hydrauliques de surface au stade actuel.

5.2. Conductivité hydraulique non saturée

Les essais d'infiltrométrie à disque ont été effectuées aux pressions -20, -40 et -60 mm sur l'ensemble des parcelles et les résultats obtenus sur les six premières parcelles sont représentés à la Figure 7 (le reste des graphiques est reporté en Annexe 3). Au total 72 essais ont été effectués durant cette campagne de mesures. Sur l'ensemble des parcelles, nous remarquons une diminution très importante de la conductivité hydraulique non saturée lorsque la succion augmente. Ceci est dû au fait qu'au voisinage de la saturation la porosité est très importante et qu'elle a tendance à diminuer au fur à mesure que l'on s'en éloigne, entraînant ainsi une diminution de la perméabilité. En comparant les parcelles entre elles, nous remarquons des comportements différents de cette courbe de rétention. En effet, au niveau de certaines parcelles la décroissance de la conductivité hydraulique non saturée est très rapide (parcelles 1, 2 et 5 de Fig.7). C'est la conséquence de la diminution des pores mis en jeu lorsqu'on s'éloigne de la saturation. Par exemple en prenant la succion 20 mm, les valeurs de la conductivité hydraulique non saturée diffèrent selon les parcelles à cause de la différence

de leur capacité d'infiltration. Nous remarquons également que ces valeurs sont faibles dans leur ensemble à cause de la présence du paillage qui a tendance à ralentir l'infiltration.

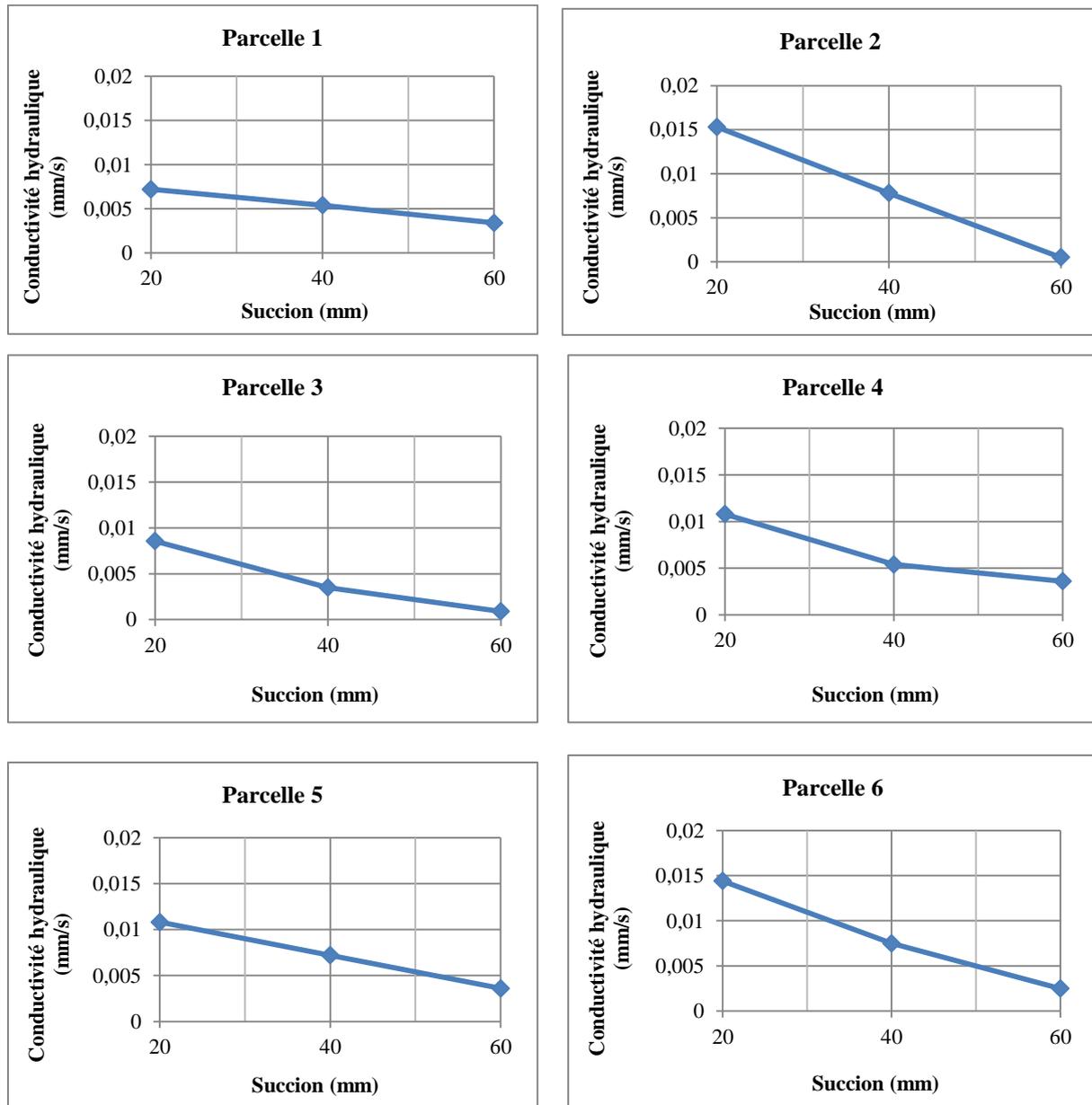
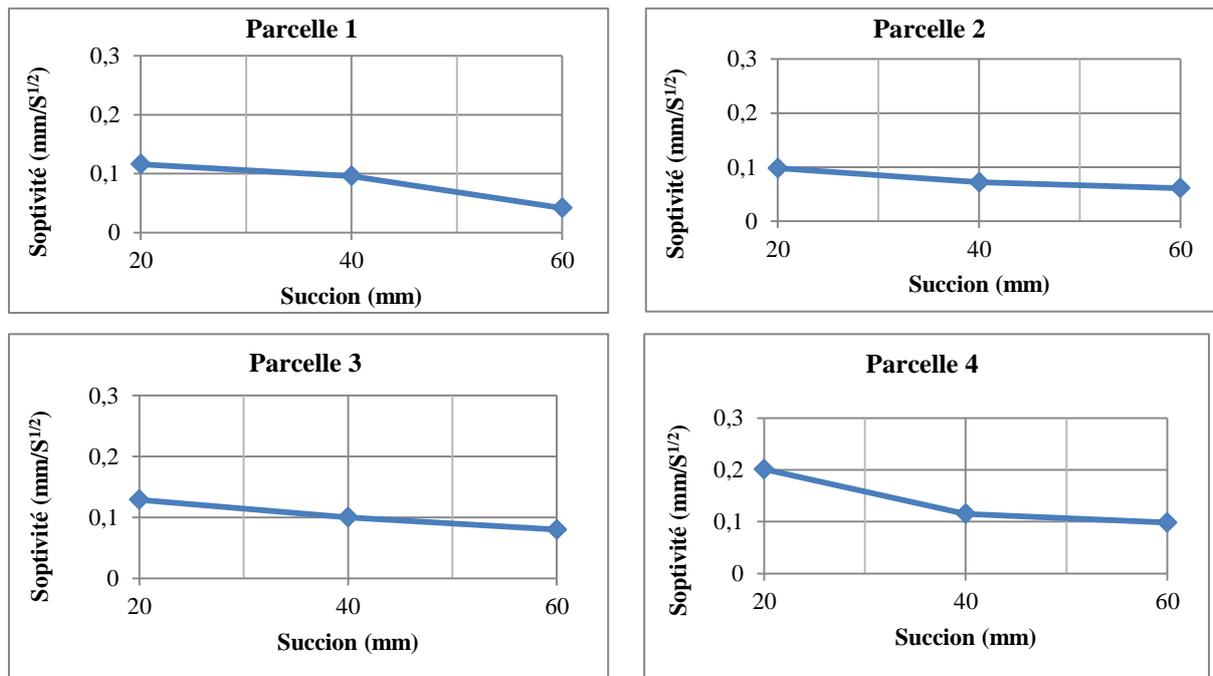


Figure 7 : Evolution de la conductivité hydraulique non saturée en fonction de différentes succions sur quelques parcelles

Cette couverture du sol évite l'apparition de plages de sol dénudé liée à l'impact de l'effet splash. Ce processus protège les plus fines particules du sol, qui viennent boucher les pores et fixer les graviers «20 mm» dans la matrice du sol, ce qui a tendance à limiter l'infiltration de l'eau en profondeur.

5.3. Sorptivité

Les valeurs de la sorptivité sont représentées à la Figure 8. La sorptivité comme la conductivité hydraulique non saturée suit une loi log-normale (Vauclin et al., 1992). L'analyse de la Figure 8 montre que la sorptivité décroît de façon non linéaire lorsque la succion passe de 20 à 60 mm. Les valeurs de sorptivité obtenues montrent aussi un comportement différencié suivant les parcelles avec la même tendance que celles de la conductivité hydraulique avec des différences plus faibles. La différence de comportement notée au niveau des 2 paramètres hydrodynamiques du sol (K et S) est sans doute imputable aux différences pédologiques, à l'état superficiel du sol et à sa porosité car plus un sol est filtrant, plus l'organisation de son système poral entraîne une augmentation de la conductivité hydraulique à saturation (Vandervaere, 1995; Niang, 2000 et Ndiaye, 2001).



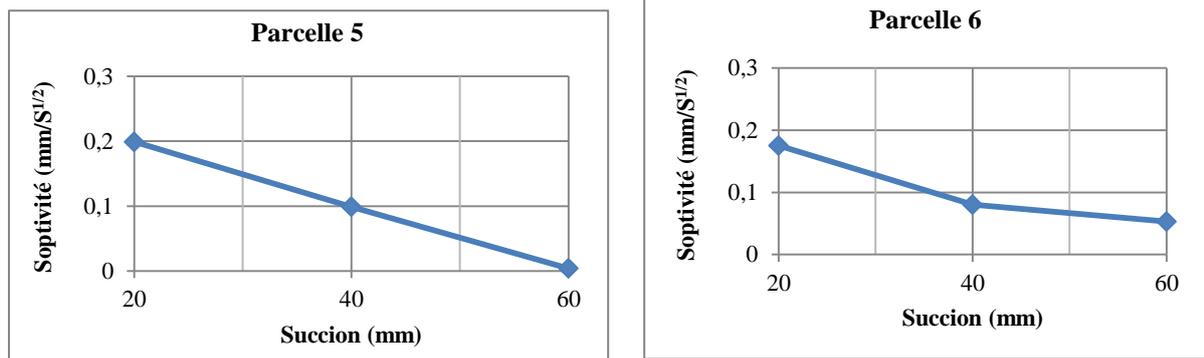


Figure 8: Evolution de la sorptivité en fonction de différentes succions sur quelques parcelles

5.4. Dimension moyenne des pores fonctionnels

L'étude de la dimension des pores fonctionnels nous permet de mettre en évidence le nombre de pores mis en jeu lors de la mesure. En prenant par exemple la pression -40 mm, la taille moyenne des pores fonctionnels pour les six parcelles est reportée dans le Tableau 2.

Tableau 2: Taille moyenne des pores fonctionnels pour les six parcelles à $h = -40$ mm

Parcelles	1	2	3	4	5	6
λ_m (μm)	320	400	140	217	293	312

Le Tableau 2 montre que la dimension des pores fonctionnels varie entre 140 et 400 μm . Ce paramètre évolue dans le même sens que la conductivité hydraulique non saturée pour ce qui concerne les parcelles 2 et 3 où nous avons respectivement les 2 valeurs extrêmes. Cet état de fait témoigne d'une différence très prononcée sur les phénomènes d'infiltration au niveau des parcelles.

5.5. Temps gravitaire

Les valeurs du temps gravitaire pour la pression -40 mm sont reportées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Temps gravitaire (mn) pour la pression $h = -40$ mm sur les six parcelles

Parcelles	1	2	3	4	5	6
t_{grav} (mn)	5	1	14	8	3	2

L'examen du Tableau 3 révèle que le temps gravitaire se situe généralement durant les premiers instants de l'essai d'infiltrométrie (sauf sur les parcelles 3 et 4) où nous avons les valeurs les plus faibles en pores fonctionnels. Nous pouvons ainsi dire que lorsque le milieu est peu filtrant, le temps gravitaire devient très long, engendrant soit des taux de ruissellement importants ou un stockage dans les premiers centimètres avec des possibilités de reprise rapide de l'eau par évaporation.

VI. Conclusion et Recommandation

La présente étude a été effectuée sur le dispositif expérimental Crop-News de Kamboinsé. La démarche utilisée a consisté à déterminer la capacité d'infiltration et la conductivité hydraulique saturée avec un infiltromètre Muntz et la conductivité hydraulique non saturée avec un infiltromètre à disque.

Les résultats ont révélé des comportements différenciés entre les parcelles. En effet, plusieurs d'entre elles (parcelles 11, 15, 16, 23 et 24), présentent des conductivités hydrauliques à saturation très faibles avec une forte prédominance au ruissellement. D'autres par contre sont plus favorables à l'infiltration avec des valeurs de conductivité hydraulique à saturation pouvant atteindre jusqu'à 10 mm/h.

Nous avons également remarqué que la conductivité hydraulique non saturée et la sorptivité diminuent quand la succion augmente. Ainsi, lorsque le sol se dessature, les pores les plus gros se vident et la conduction s'opère dans les pores de plus en plus petits. Après deux années d'expérience, l'association *Piliostigma* et sorgho n'a pas d'effet sur les propriétés hydrauliques. Cependant, nous avons constaté que ces propriétés hydrodynamiques dépendent étroitement des pratiques culturales. En effet, nous avons constaté que la présence du zaï + mulch crée des conditions favorables à l'infiltration.

Il serait intéressant de poursuivre des recherches sur ce travail pour évaluer l'effet du labour sur la distribution hydrique du sol, à travers un suivi diachronique des paramètres hydrodynamique.

Bibliographie

- Ankeny, M. D., Ahmed, M., Kaspar, T. C., & Horton, R. (1991). Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science*, 55: 467-470.
- Boivin, P. (1990). Caractérisation de l'infiltrabilité d'un sol par la méthode MUNTZ: variabilité de la mesure. Orstom Bondy.
- Boivin, P., Touma, J., & Zante, P. (1988). Mesure de l'infiltrabilité du sol par la méthode du double anneau. *cah.ORSTOM, Sér, Pedol*, vol XXIV, 17-25.
- Boucher, C.; Coquet, Y.; Vachier, P.; Roger-Estrade, J.; Labat, C. (2000). Caractérisation hydrodynamique par l'infiltromètre à disques.
- Boulier, J., Parlange, J., Vauclin, M., Lockington, D., & Haverkamp, R. (1987). Ponding time limits for arbitrary flux. *Soil Science Society of America*. Volume 51, 424-428.
- BUNASOL. (2000, Avril 28). Rapport d'investissement- province du KADIOGO. Ouagadougou: Bureau national des sols (BUNASOL).
- Burand, A., & Coquet, Y. (2006). Les sols et le cycle de l'eau.
- Casenave, A., & Valentin, C. (1992). A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. *Journal of Hydrology*, 231-249.
- Clothier, B. E., & White, I. (1981). Measurement of sorptivity and water diffusivity in the field.
- Coquet, Y., Boucher, A., Labat, C., & Roger-Estrade, J. (2000). Caractérisation hydrodynamique des sols à l'aide de l'infiltromètre à disques. *Aspects théoriques et pratiques. Etude et gestion des sols*, 7: 7-24.
- Gardner, W. R. (1958). Some steady solutions of the Unsaturated Moisture Flow Equation with application to evaporation from a water table. *Soil science*, 85: 228-232.
- Guedenon, E. (2010). Détermination des propriétés hydrodynamiques des sols du bassin versant de la singou (analyse sous plusieurs succions). Ouagadougou: Mémoire pour l'obtention du Master 2^{ème} année. pp 71.
- Haverkamp, R., & al. (1994). Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrimeter. 2. Physically based infiltration equation. *Water Resources*, 30: 2931-2935.
- INERA. (1995). Etude des zones d'implantation des stations agricoles. Ouagadougou: INERA.

- Lahmar, R., & Hamma, Y. (2011). Zai et potentiel de l'association cultures annuelles arbustes natifs,. IRD Editions.
- Lamso, N. (2002). Valorisation des eaux de ruissellement en zones arides et semiarides méditerranéennes et sahéliennes par les techniques traditionnelles d'aménagement des sols. Thèse 3e cycle: Université Abdou Moumouni de Niamey et Université de Tuni.
- Mermoud, A. (2006). Cours de physique du sol: Etat de l'eau du sol. Ouagadougou: 30p.
- Mermoud, A. (2010). Physique du sol. Ouagadougou: 2iE.
- Musy, A., & Higy, C. (2004). Hydrologie une science de la nature. lausanne, suisse: Gérer l'environnement, 314p.
- Ndiaye, B. (2001). Etude expérimentale et modélisation du comportement hydrodynamique des sols cultivés: application au bassin de Thyssé Kaymor (Sénégal). Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier-Grenoble 1, 183p.
- Ndiaye, S. S. (2011). <http://sambamara.com>. Consulté le Mars Vendredi, 2014
- Niang, D. (2000). Variation saisonnière des propriétés hydrodynamiques des microdunes de la zonz sahélienne du Burkina Faso, DEA en hydrogéologie et hydrologie à l'EPFL, 70p.
- Niang, D. (2006). Fonctionnement hydrique de différents types de placages sableux dans le Sahel burkinabè. Lausanne: Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.
- Niang, D. (2014). Cours physique du sol. Ouagadougou: 2iE.
- Parlange, J.-Y. (1975). on solving the flow équation in unsaturated soils by optimisation: horizontal infiltration. *Soil Science Society of America Journal*, 39: 415-418.
- Philip, J. R. (1969). Theory of infiltration . *Advances in hydrosci*, 5:215-296.
- Philip, J. R. (1985). Approximate analysis of the boreholepermeameter in unsaturated soil. *Water Resource*, 49:828-830.
- Pullan, A. J. (1990). The quasilinear approximation for unsaturated porous media flow. *Water ressource*, 28: 1219-1234.
- Reynolds, W. D., & Elrick, D. E. (1991). Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. *Soil Science*, 55: 633-639.
- Smetten, K. J., Ross, P. J., Haverkamp, R., & Parlange, J. Y. (1995). Three dimensiona analysis of infiltration from the disc infiltrometer3. Parameter estimation using a double-disk tension infiltrometer. *Water Ressource*, 31: 2491-2495.
- Valentin, C. (1981). Organisation pélliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique. Dynamique de formation et conséquences sur l'économie en eau. *Etudes et thèses. Editions de l'ORSTOM*, 259p.

- Vandervaere, J., Vauclin, M., & Elrick, D. E. (2000(b)). Transient flow from tension infiltrometers: II. Four methods to determine sorptivity and conductivity. *Soil science society of America Journal*, 64.
- Vandervaere, J.-P. (1995). Caractérisation hydrodynamique du sol in situ par infiltromètre à disque. Analyse critique des régimes pseudo-permanent, méthodes transitoires et cas des sols encroûtés, thèse de doctorat à l'université Joseph Fourier. Grenoble I, 329p.
- Vauclin, M., & Chopart, J.-L. (1992). L'infiltrométrie multidisques pour la détermination in situ des caractéristiques hydrodynamiques de la surface d'un sol gravillonaire. *Agronomie tropical*, 11p.
- Warrick, A., & Broadbridge, P. (1992). Approximation for diffusion from a disc source. *Applied mathematical modelling*, p.155-161.
- White, I., & SULLY, M. J. (1987). Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. *Water resources*, 28: 1514-1522.
- Wooding, R. A. (1968). Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water resources*, 4:1259-1273.

ANNEXES

ANNEXES:

Annexe 1: Relevé des mesures et courbes d'évolution temporelle de la capacité d'infiltration.... 36

Annexe 2: Courbe d'évolution de la dérivée de la racine carrée de l'infiltration cumulée I en
fonction de la racine carrée du temps \sqrt{t} 48

Annexe 3:Évolution de la conductivité hydraulique non saturée et de la sorptivité durant les
différentes périodes de mesure pour la succion 40 mm 52

Annexe 1: Relevé des mesures et courbes d'évolution temporelle de la capacité d'infiltration

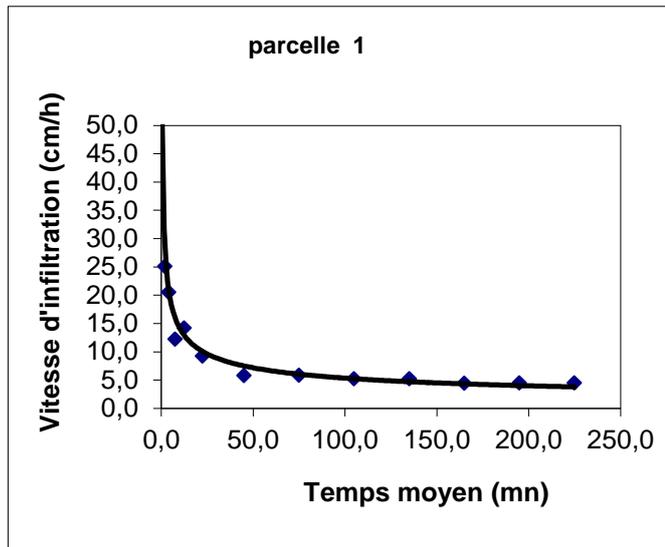
02/03/2015

Début : 8h25

Fin:12h25

Parcelle 1

t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm3)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	275	0,6	0,5	67,2	0,4	0,5
3	410	0,8	2	25,1	4,8	2,0
5	335	0,7	2	20,5	5,9	4,0
10	500	1,0	5	12,2	24,5	7,5
15	580	1,2	5	14,2	21,2	12,5
30	1130	2,3	15	9,2	97,7	22,5
60	1415	2,9	30	5,8	312,2	45,0
90	1435	2,9	30	5,8	307,9	75,0
120	1280	2,6	30	5,2	345,1	105,0
150	1275	2,6	30	5,2	346,5	135,0
180	1090	2,2	30	4,4	405,3	165,0
210	1100	2,2	30	4,5	401,6	195,0
240	1100	2,2	30	4,5	401,6	225,0



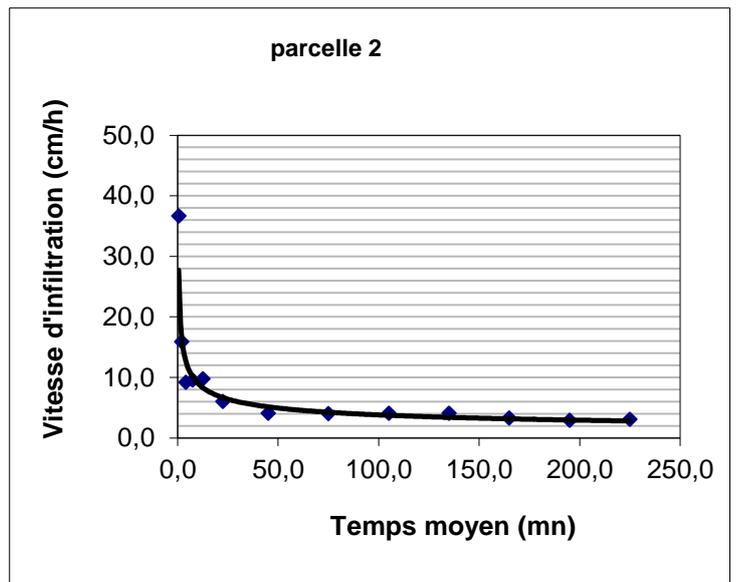
23/02/2015

Début : 8h25

Fin: 12h25

Parcelle 2

t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm3)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	150	0,3	0,5	36,7	0,8	0,5
3	260	0,5	2	15,9	7,6	2,0
5	150	0,3	2	9,2	13,1	4,0
10	390	0,8	5	9,5	31,5	7,5
15	400	0,8	5	9,8	30,7	12,5
30	740	1,5	15	6,0	149,3	22,5
60	1000	2,0	30	4,1	441,8	45,0
90	990	2,0	30	4,0	446,2	75,0
120	1000	2,0	30	4,1	441,8	105,0
150	1000	2,0	30	4,1	441,8	135,0
180	810	1,7	30	3,3	545,4	165,0
210	710	1,4	30	2,9	622,2	195,0
240	750	1,5	30	3,1	589,0	225,0



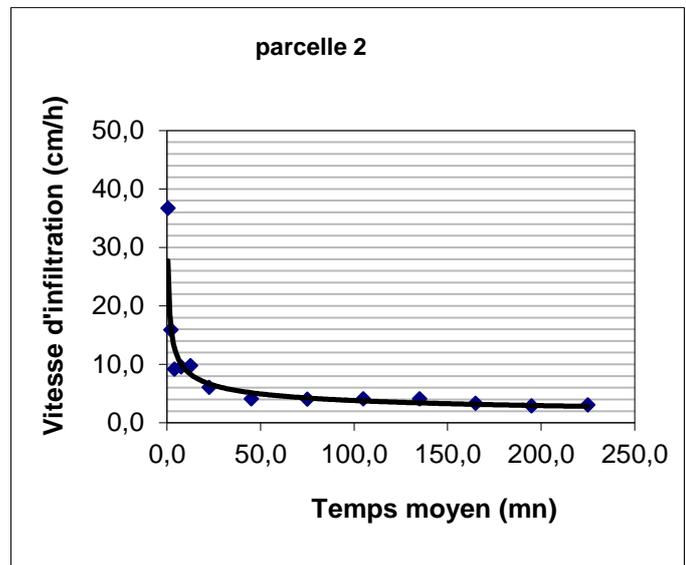
Le 26/05/2014

Début :7h50

Fin: 11h50

Parcelle 3

t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm ³)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	40	0,1	0,5	9,8	3,1	0,5
3	110	0,2	2	6,7	17,8	2,0
5	280	0,6	2	17,1	7,0	4,0
10	630	1,3	5	15,4	19,5	7,5
15	420	0,9	5	10,3	29,2	12,5
30	720	1,5	15	5,9	153,4	22,5
60	1280	2,6	30	5,2	345,1	45,0
90	880	1,8	30	3,6	502,0	75,0
120	909	1,9	30	3,7	486,0	105,0
150	890	1,8	30	3,6	496,4	135,0
180	650	1,3	30	2,6	679,7	165,0
210	630	1,3	30	2,6	701,2	195,0
240	640	1,3	30	2,6	690,3	225,0



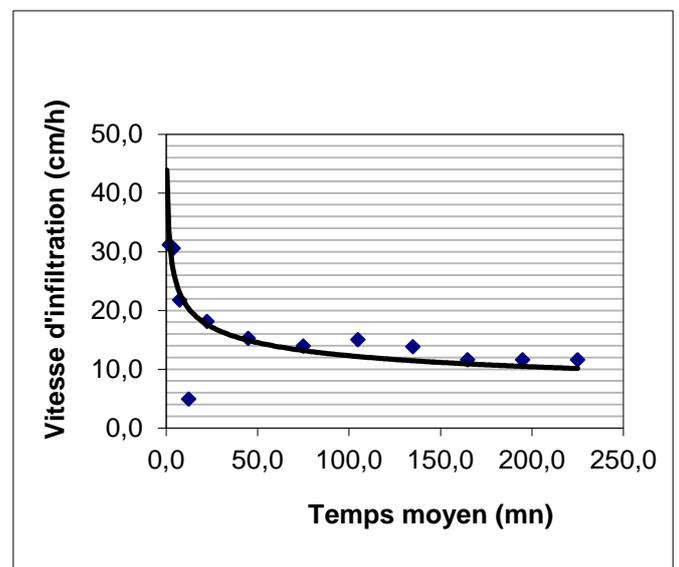
23/05/2014

Début :7h45

Fin: 11h45

Parcelle 4

t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm ³)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	310	0,6	0,5	75,8	0,4	0,5
3	510	1,0	2	31,2	3,8	2,0
5	500	1,0	2	30,6	3,9	4,0
10	890	1,8	5	21,8	13,8	7,5
15	200	0,4	5	4,9	61,4	12,5
30	2220	4,5	15	18,1	49,8	22,5
60	3740	7,6	30	15,2	118,1	45,0
90	3420	7,0	30	13,9	129,2	75,0
120	3690	7,5	30	15,0	119,7	105,0
150	3390	6,9	30	13,8	130,3	135,0
180	2850	5,8	30	11,6	155,0	165,0
210	2850	5,8	30	11,6	155,0	195,0
240	2840	5,8	30	11,6	155,6	225,0



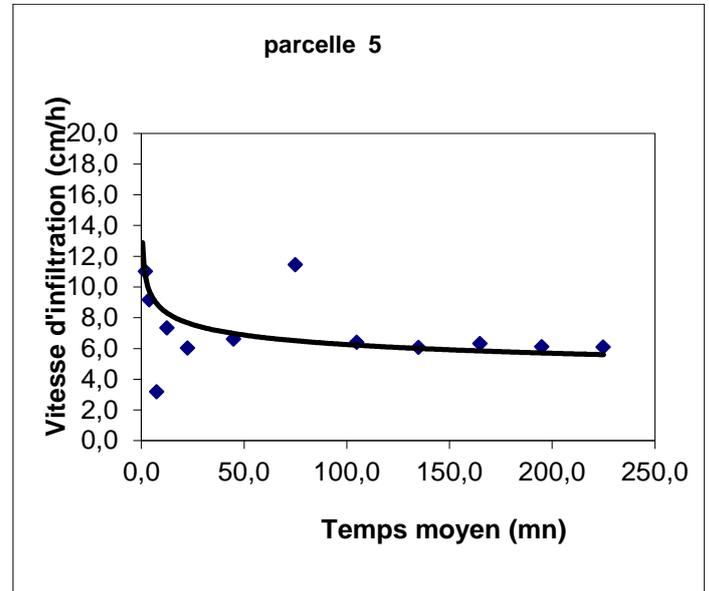
24/02/2015

Début : 8h35

Fin: 12h35

Parcelle 5

t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm ³)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	100	0,2	0,5	24,4	1,2	0,5
3	180	0,4	2	11,0	10,9	2,0
5	150	0,3	2	9,2	13,1	4,0
10	130	0,3	5	3,2	94,4	7,5
15	300	0,6	5	7,3	40,9	12,5
30	740	1,5	15	6,0	149,3	22,5
60	1620	3,3	30	6,6	272,7	45,0
90	2810	5,7	30	11,4	157,2	75,0
120	1570	3,2	30	6,4	281,4	105,0
150	1490	3,0	30	6,1	296,5	135,0
180	1550	3,2	30	6,3	285,0	165,0
210	1500	3,1	30	6,1	294,5	195,0
240	1495	3,0	30	6,1	295,5	225,0



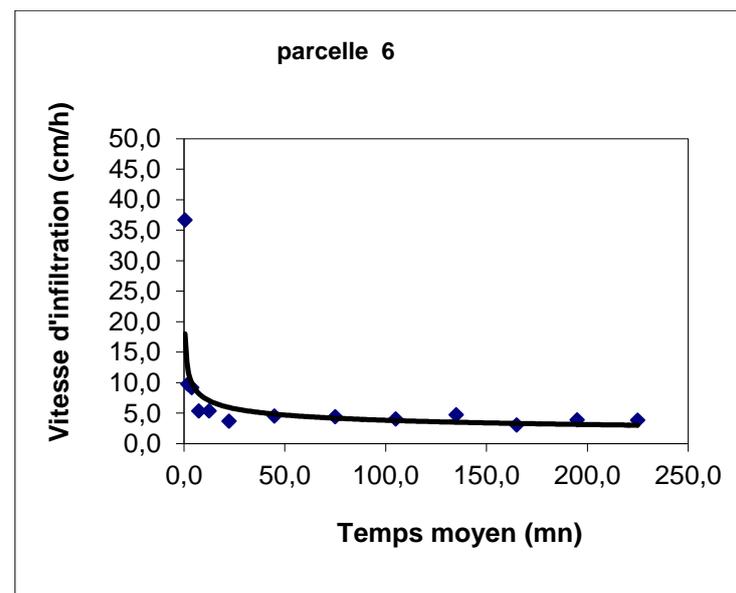
Le 02/03/2015

Début : 7h50

Fin: 11h50

Parcelle 6

t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm ³)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	150	0,3	0,5	36,7	0,8	0,5
3	160	0,3	2	9,8	12,3	2,0
5	150	0,3	2	9,2	13,1	4,0
10	220	0,4	5	5,4	55,8	7,5
15	220	0,4	5	5,4	55,8	12,5
30	455	0,9	15	3,7	242,7	22,5
60	1110	2,3	30	4,5	398,0	45,0
90	1085	2,2	30	4,4	407,2	75,0
120	1000	2,0	30	4,1	441,8	105,0
150	1165	2,4	30	4,7	379,2	135,0
180	745	1,5	30	3,0	593,0	165,0
210	950	1,9	30	3,9	465,0	195,0
240	945	1,9	30	3,9	467,5	225,0



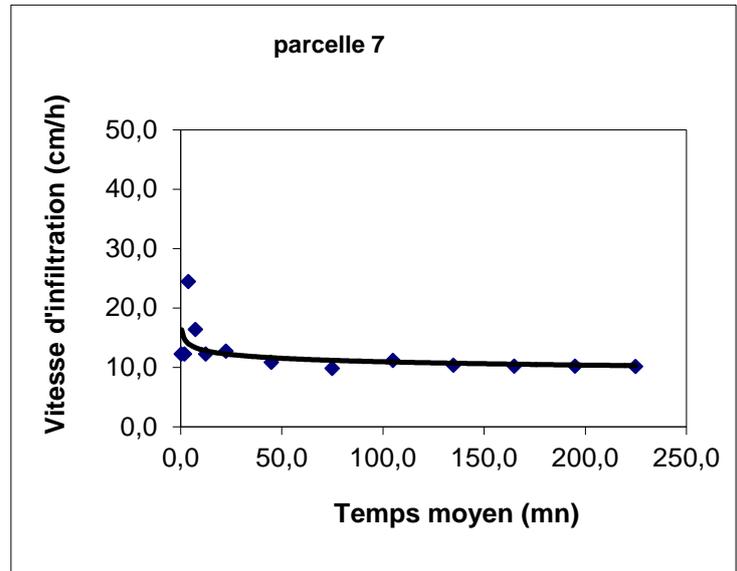
19/02/2015

Début :8H35

Fin: 12H35

Parcelle 7

t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm ³)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	50	0,1	0,5	12,2	2,5	0,5
3	200	0,4	2	12,2	9,8	2,0
5	400	0,8	2	24,4	4,9	4,0
10	670	1,4	5	16,4	18,3	7,5
15	500	1,0	5	12,2	24,5	12,5
30	1560	3,2	15	12,7	70,8	22,5
60	2660	5,4	30	10,8	166,1	45,0
90	2410	4,9	30	9,8	183,3	75,0
120	2730	5,6	30	11,1	161,8	105,0
150	2540	5,2	30	10,3	173,9	135,0
180	2500	5,1	30	10,2	176,7	165,0
210	2500	5,1	30	10,2	176,7	195,0
240	2490	5,1	30	10,1	177,4	225,0



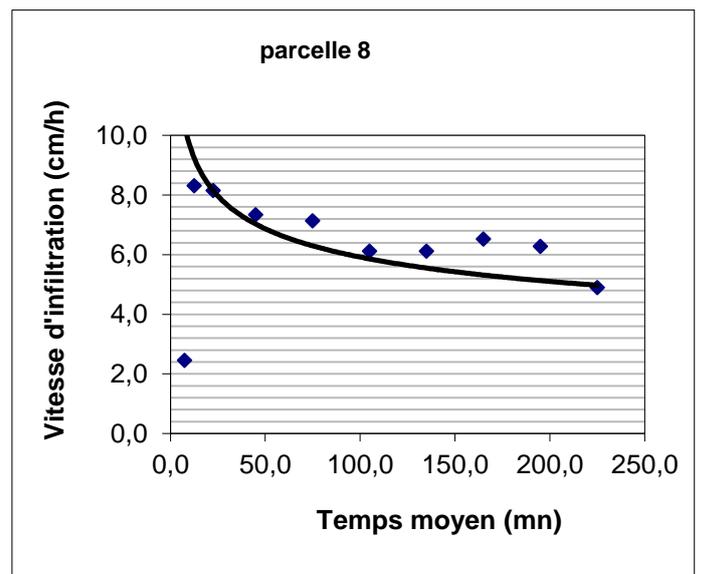
18/02/2015

Début :7h34

Fin: 11h34

Parcelle 8

t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm ³)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	140	0,3	0,5	34,2	0,9	0,5
3	260	0,5	2	15,9	7,6	2,0
5	210	0,4	2	12,8	9,3	4,0
10	100	0,2	5	2,4	122,7	7,5
15	340	0,7	5	8,3	36,1	12,5
30	1000	2,0	15	8,1	110,4	22,5
60	1800	3,7	30	7,3	245,4	45,0
90	1750	3,6	30	7,1	252,4	75,0
120	1500	3,1	30	6,1	294,5	105,0
150	1500	3,1	30	6,1	294,5	135,0
180	1600	3,3	30	6,5	276,1	165,0
210	1540	3,1	30	6,3	286,9	195,0
240	1200	2,4	30	4,9	368,2	225,0



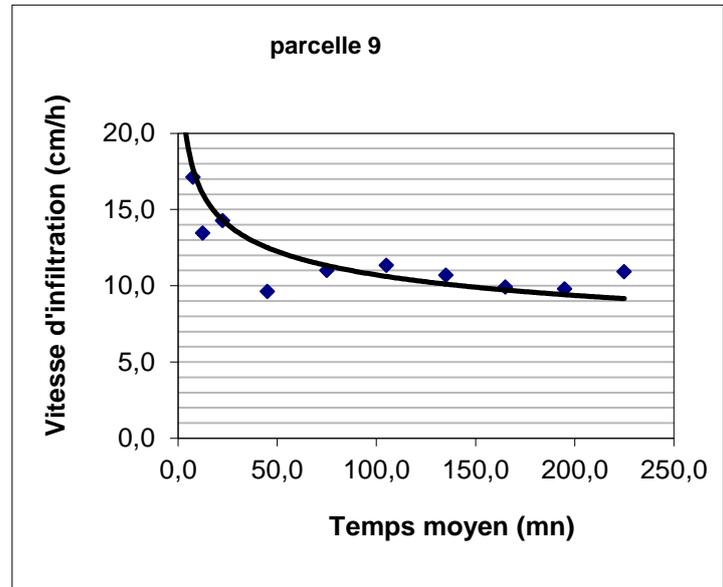
18/02/2015

Début : 7h34

Fin: 11h34

Parcelle 9

t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm ³)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	150	0,3	0,5	36,7	0,8	0,5
3	350	0,7	2	21,4	5,6	2,0
5	330	0,7	2	20,2	5,9	4,0
10	700	1,4	5	17,1	17,5	7,5
15	550	1,1	5	13,4	22,3	12,5
30	1750	3,6	15	14,3	63,1	22,5
60	2360	4,8	30	9,6	187,2	45,0
90	2700	5,5	30	11,0	163,6	75,0
120	2780	5,7	30	11,3	158,9	105,0
150	2620	5,3	30	10,7	168,6	135,0
180	2430	5,0	30	9,9	181,8	165,0
210	2400	4,9	30	9,8	184,1	195,0
240	2680	5,5	30	10,9	164,8	225,0



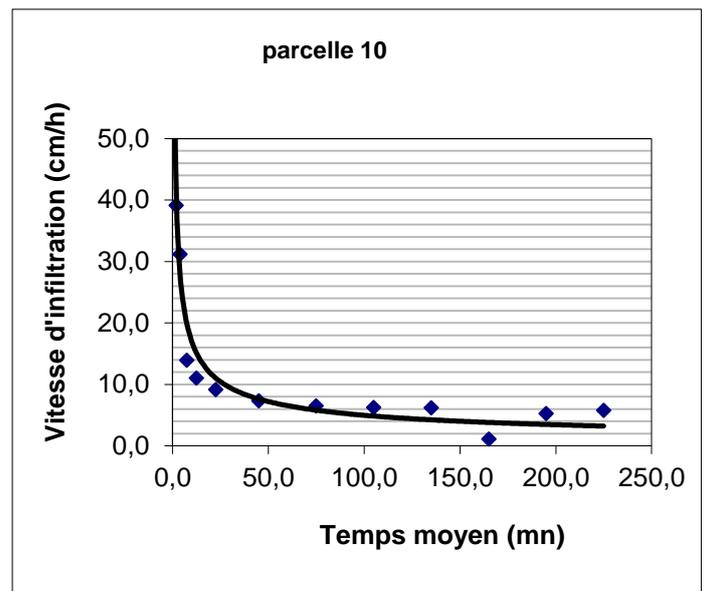
Le 20/02/2015

Début : 7H 50

Fin: 11H 50

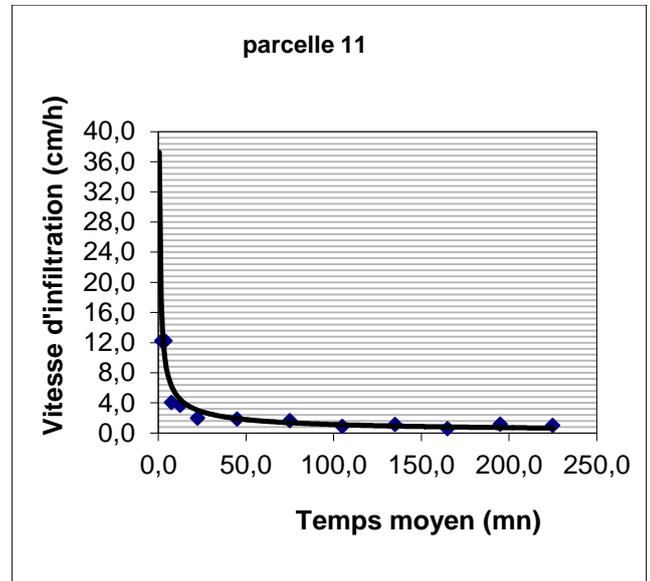
Parcelle 10

t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm ³)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	490	1,0	0,5	119,8	0,3	0,5
3	640	1,3	2	39,1	3,1	2,0
5	510	1,0	2	31,2	3,8	4,0
10	570	1,2	5	13,9	21,5	7,5
15	450	0,9	5	11,0	27,3	12,5
30	1120	2,3	15	9,1	98,6	22,5
60	1790	3,6	30	7,3	246,8	45,0
90	1590	3,2	30	6,5	277,9	75,0
120	1530	3,1	30	6,2	288,7	105,0
150	1520	3,1	30	6,2	290,6	135,0
180	270	0,6	30	1,1	1636,2	165,0
210	1290	2,6	30	5,3	342,5	195,0
240	1410	2,9	30	5,7	313,3	225,0



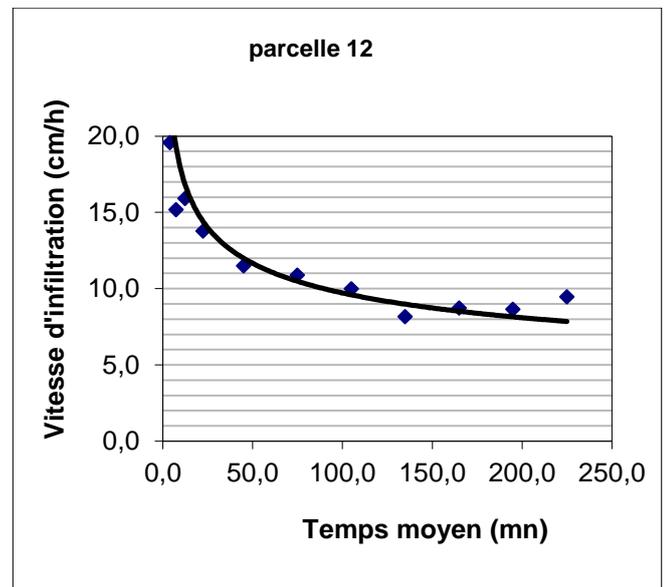
20/02/2015
 Début : 8H05
 Fin: 12H05
 Parcelle 11

t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm ³)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	250	0,5	0,5	61,1	0,5	0,5
3	200	0,4	2	12,2	9,8	2,0
5	200	0,4	2	12,2	9,8	4,0
10	165	0,3	5	4,0	74,4	7,5
15	150	0,3	5	3,7	81,8	12,5
30	240	0,5	15	2,0	460,2	22,5
60	450	0,9	30	1,8	981,7	45,0
90	400	0,8	30	1,6	1104,5	75,0
120	210	0,4	30	0,9	2103,7	105,0
150	270	0,6	30	1,1	1636,2	135,0
180	140	0,3	30	0,6	3155,6	165,0
210	280	0,6	30	1,1	1577,8	195,0
240	240	0,5	30	1,0	1840,8	225,0



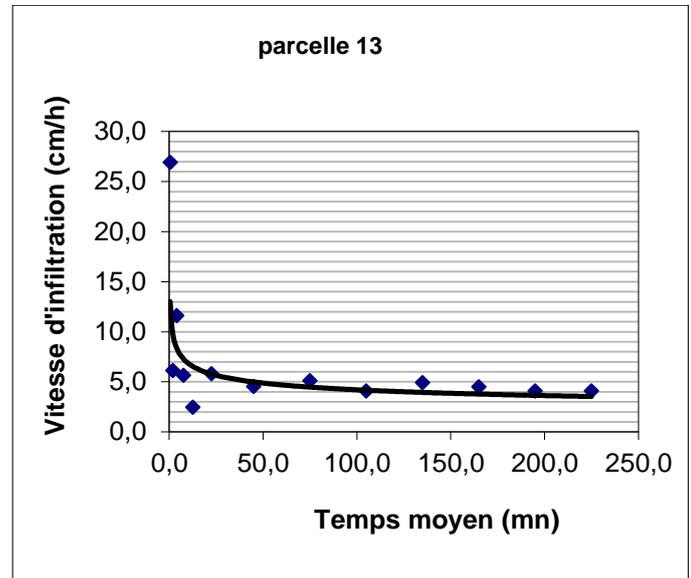
19/02/2015
 Début : 8H00
 Fin: 12H00
 Parcelle 12

00t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm ³)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	210	0,4	0,5	51,3	0,6	0,5
3	450	0,9	2	27,5	4,4	2,0
5	320	0,7	2	19,6	6,1	4,0
10	620	1,3	5	15,2	19,8	7,5
15	650	1,3	5	15,9	18,9	12,5
30	1690	3,4	15	13,8	65,4	22,5
60	2820	5,7	30	11,5	156,7	45,0
90	2670	5,4	30	10,9	165,5	75,0
120	2450	5,0	30	10,0	180,3	105,0
150	2000	4,1	30	8,1	220,9	135,0
180	2140	4,4	30	8,7	206,4	165,0
210	2120	4,3	30	8,6	208,4	195,0
240	2320	4,7	30	9,5	190,4	225,0



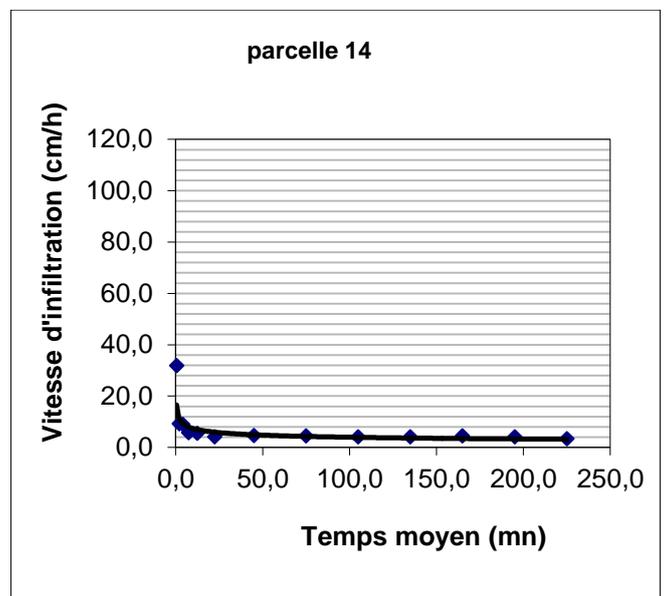
11/03/2015
Début : 8 H 50
Fin: 12H 50
Parcelle 13

t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm ³)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	110	0,2	0,5	26,9	1,1	0,5
3	100	0,2	2	6,1	19,6	2,0
5	190	0,4	2	11,6	10,3	4,0
10	230	0,5	5	5,6	53,4	7,5
15	100	0,2	5	2,4	122,7	12,5
30	710	1,4	15	5,8	155,6	22,5
60	1110	2,3	30	4,5	398,0	45,0
90	1250	2,5	30	5,1	353,4	75,0
120	1000	2,0	30	4,1	441,8	105,0
150	1205	2,5	30	4,9	366,6	135,0
180	1100	2,2	30	4,5	401,6	165,0
210	1000	2,0	30	4,1	441,8	195,0
240	1000	2,0	30	4,1	441,8	225,0



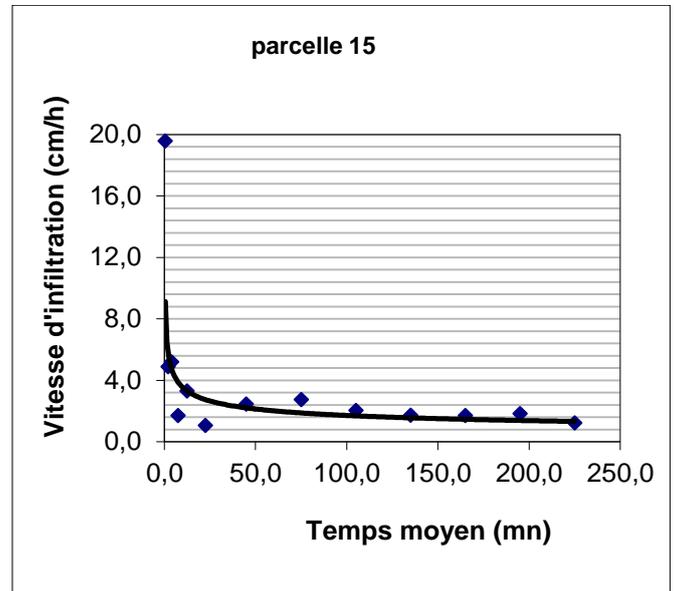
05/03/2015
Début : 8H15
Fin: 12H15
Parcelle 14

t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm ³)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	130	0,3	0,5	31,8	0,9	0,5
3	150	0,3	2	9,2	13,1	2,0
5	145	0,3	2	8,9	13,5	4,0
10	230	0,5	5	5,6	53,4	7,5
15	220	0,4	5	5,4	55,8	12,5
30	500	1,0	15	4,1	220,9	22,5
60	1110	2,3	30	4,5	398,0	45,0
90	1075	2,2	30	4,4	411,0	75,0
120	1000	2,0	30	4,1	441,8	105,0
150	1000	2,0	30	4,1	441,8	135,0
180	1100	2,2	30	4,5	401,6	165,0
210	1000	2,0	30	4,1	441,8	195,0
240	820	1,7	30	3,3	538,8	225,0



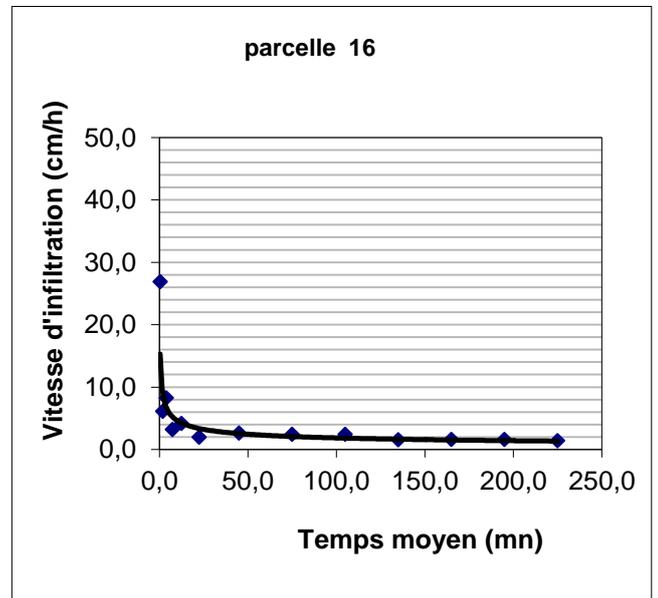
Le 05/03/2015
Début : 7H 55
Fin: 11H 55
Parcelle 15

t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm3)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	80	0,2	0,5	19,6	1,5	0,5
3	80	0,2	2	4,9	24,5	2,0
5	85	0,2	2	5,2	23,1	4,0
10	70	0,1	5	1,7	175,3	7,5
15	135	0,3	5	3,3	90,9	12,5
30	130	0,3	15	1,1	849,6	22,5
60	600	1,2	30	2,4	736,3	45,0
90	670	1,4	30	2,7	659,4	75,0
120	500	1,0	30	2,0	883,6	105,0
150	425	0,9	30	1,7	1039,5	135,0
180	420	0,9	30	1,7	1051,9	165,0
210	450	0,9	30	1,8	981,7	195,0
240	300	0,6	30	1,2	1472,6	225,0



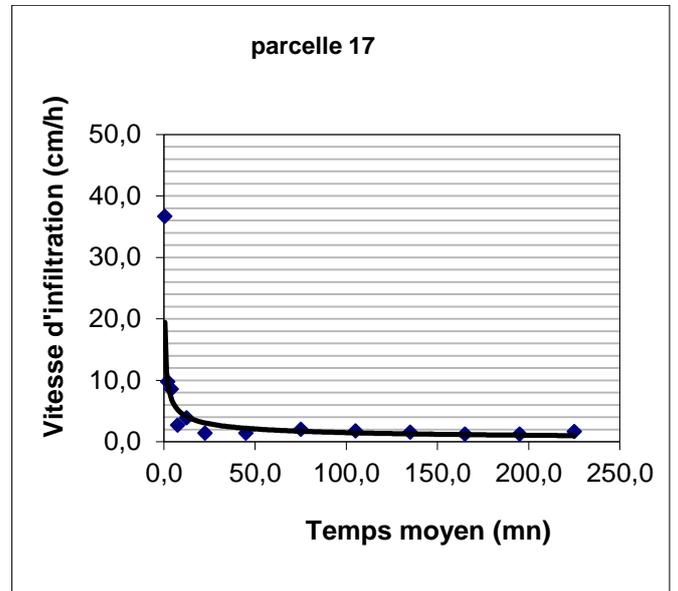
10/03/2015
Début : 7h55
Fin: 11h55
Parcelle 16

t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm3)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	110	0,2	0,5	26,9	1,1	0,5
3	100	0,2	2	6,1	19,6	2,0
5	135	0,3	2	8,3	14,5	4,0
10	130	0,3	5	3,2	94,4	7,5
15	170	0,3	5	4,2	72,2	12,5
30	240	0,5	15	2,0	460,2	22,5
60	650	1,3	30	2,6	679,7	45,0
90	595	1,2	30	2,4	742,5	75,0
120	600	1,2	30	2,4	736,3	105,0
150	380	0,8	30	1,5	1162,6	135,0
180	390	0,8	30	1,6	1132,8	165,0
210	400	0,8	30	1,6	1104,5	195,0
240	350	0,7	30	1,4	1262,2	225,0



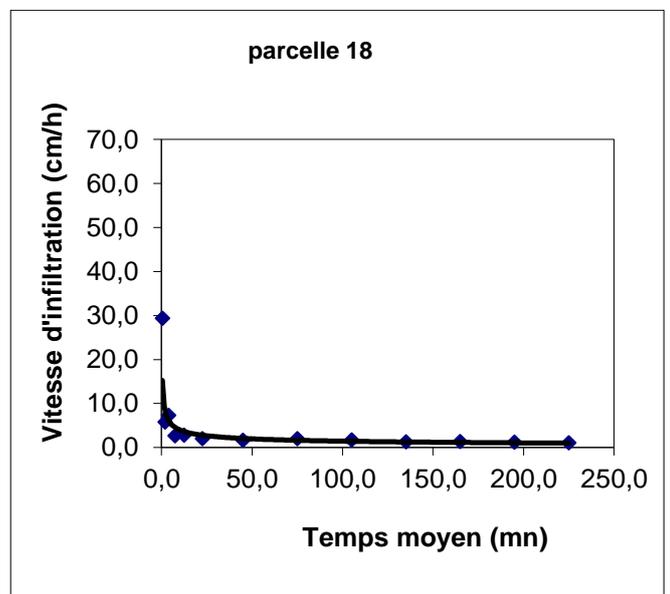
10/03/2015
Début : 7h55
Fin: 11h55
Parcelle 17

t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm ³)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	150	0,3	0,5	36,7	0,8	0,5
3	160	0,3	2	9,8	12,3	2,0
5	140	0,3	2	8,6	14,0	4,0
10	110	0,2	5	2,7	111,6	7,5
15	160	0,3	5	3,9	76,7	12,5
30	170	0,3	15	1,4	649,7	22,5
60	340	0,7	30	1,4	1299,4	45,0
90	500	1,0	30	2,0	883,6	75,0
120	430	0,9	30	1,8	1027,4	105,0
150	380	0,8	30	1,5	1162,6	135,0
180	300	0,6	30	1,2	1472,6	165,0
210	300	0,6	30	1,2	1472,6	195,0
240	405	0,8	30	1,7	1090,8	225,0



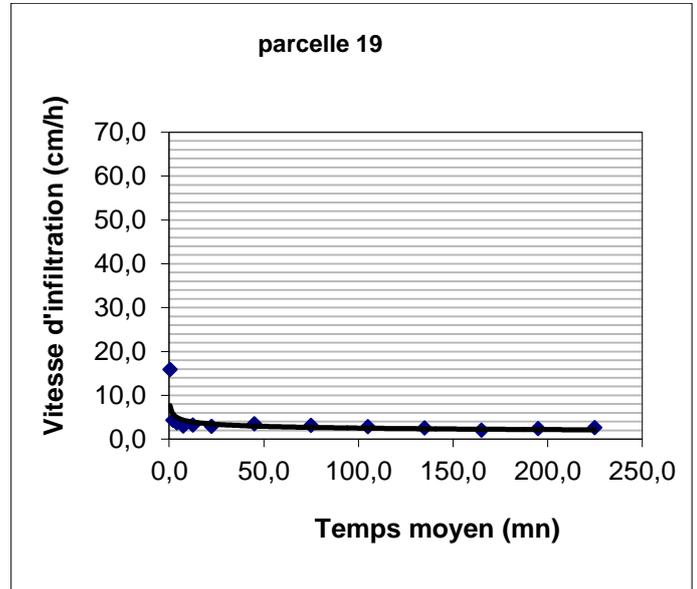
16/03/2015
Début : 8 H 10
Fin: 12H 10
Parcelle 18

t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm ³)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	120	0,2	0,5	29,3	1,0	0,5
3	95	0,2	2	5,8	20,7	2,0
5	120	0,2	2	7,3	16,4	4,0
10	110	0,2	5	2,7	111,6	7,5
15	115	0,2	5	2,8	106,7	12,5
30	250	0,5	15	2,0	441,8	22,5
60	410	0,8	30	1,7	1077,5	45,0
90	500	1,0	30	2,0	883,6	75,0
120	415	0,8	30	1,7	1064,5	105,0
150	320	0,7	30	1,3	1380,6	135,0
180	335	0,7	30	1,4	1318,8	165,0
210	300	0,6	30	1,2	1472,6	195,0
240	265	0,5	30	1,1	1667,1	225,0



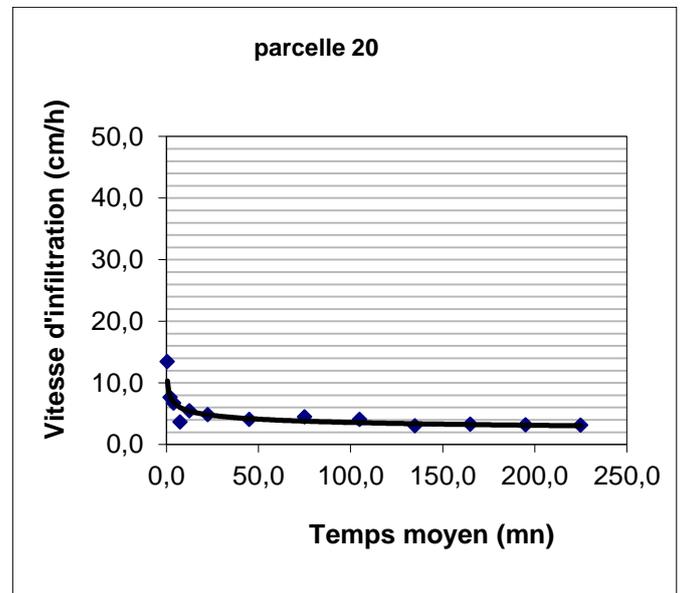
18/03/2015
Début : 7h50
Fin: 11h50
Parcelle 19

t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm3)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	65	0,1	0,5	15,9	1,9	0,5
3	70	0,1	2	4,3	28,0	2,0
5	60	0,1	2	3,7	32,7	4,0
10	120	0,2	5	2,9	102,3	7,5
15	130	0,3	5	3,2	94,4	12,5
30	355	0,7	15	2,9	311,1	22,5
60	845	1,7	30	3,4	522,8	45,0
90	770	1,6	30	3,1	573,7	75,0
120	690	1,4	30	2,8	640,3	105,0
150	615	1,3	30	2,5	718,4	135,0
180	500	1,0	30	2,0	883,6	165,0
210	590	1,2	30	2,4	748,8	195,0
240	630	1,3	30	2,6	701,2	225,0



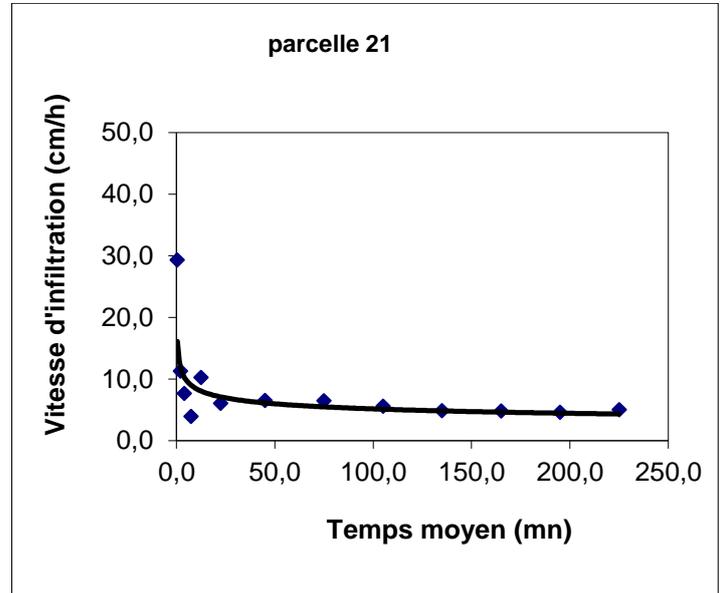
18/03/2015
Début : 8h03
Fin: 12h03
Parcelle 20

t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm3)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	55	0,1	0,5	13,4	2,2	0,5
3	125	0,3	2	7,6	15,7	2,0
5	110	0,2	2	6,7	17,8	4,0
10	150	0,3	5	3,7	81,8	7,5
15	225	0,5	5	5,5	54,5	12,5
30	595	1,2	15	4,8	185,6	22,5
60	1000	2,0	30	4,1	441,8	45,0
90	1105	2,3	30	4,5	399,8	75,0
120	1000	2,0	30	4,1	441,8	105,0
150	750	1,5	30	3,1	589,0	135,0
180	810	1,7	30	3,3	545,4	165,0
210	780	1,6	30	3,2	566,4	195,0
240	775	1,6	30	3,2	570,0	225,0



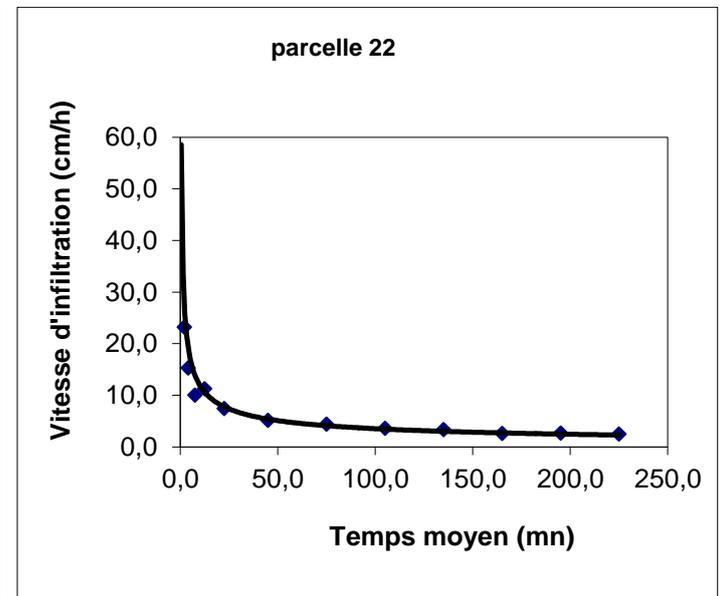
11/03/2015
Début : 9h03
Fin: 13h03
Parcelle 21

t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm ³)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	120	0,2	0,5	29,3	1,0	0,5
3	185	0,4	2	11,3	10,6	2,0
5	125	0,3	2	7,6	15,7	4,0
10	160	0,3	5	3,9	76,7	7,5
15	420	0,9	5	10,3	29,2	12,5
30	745	1,5	15	6,1	148,3	22,5
60	1600	3,3	30	6,5	276,1	45,0
90	1590	3,2	30	6,5	277,9	75,0
120	1370	2,8	30	5,6	322,5	105,0
150	1190	2,4	30	4,8	371,2	135,0
180	1180	2,4	30	4,8	374,4	165,0
210	1130	2,3	30	4,6	391,0	195,0
240	1225	2,5	30	5,0	360,6	225,0



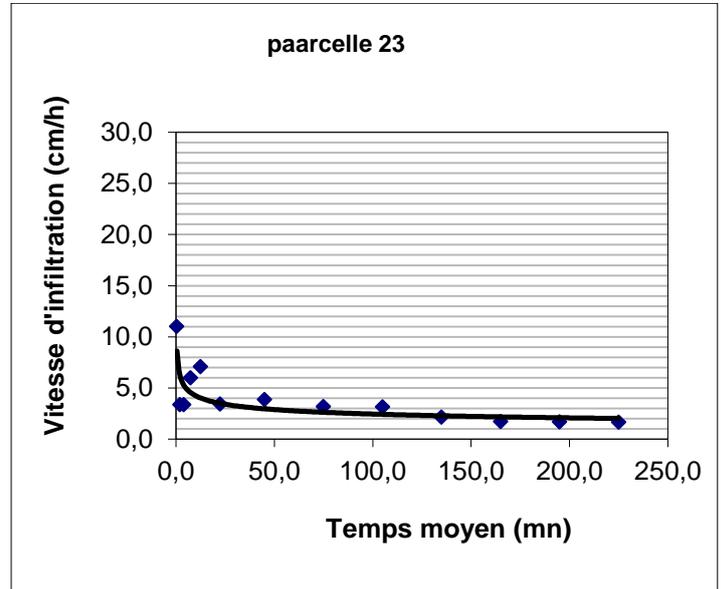
16/03/2015
Début : 7h50
Fin: 11h50
Parcelle 22

t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm ³)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	380	0,8	0,5	92,9	0,3	0,5
3	380	0,8	2	23,2	5,2	2,0
5	250	0,5	2	15,3	7,9	4,0
10	410	0,8	5	10,0	29,9	7,5
15	460	0,9	5	11,2	26,7	12,5
30	915	1,9	15	7,5	120,7	22,5
60	1260	2,6	30	5,1	350,6	45,0
90	1085	2,2	30	4,4	407,2	75,0
120	880	1,8	30	3,6	502,0	105,0
150	820	1,7	30	3,3	538,8	135,0
180	635	1,3	30	2,6	695,7	165,0
210	655	1,3	30	2,7	674,5	195,0
240	605	1,2	30	2,5	730,2	225,0



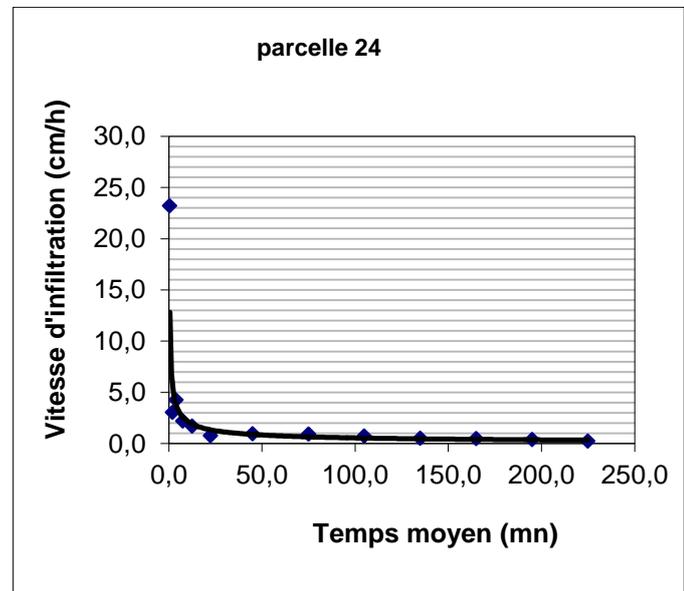
17/03/2015
Début : 8h10
Fin: 12h10
Parcelle 23

t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm ³)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	45	0,1	0,5	11,0	2,7	0,5
3	55	0,1	2	3,4	35,7	2,0
5	55	0,1	2	3,4	35,7	4,0
10	245	0,5	5	6,0	50,1	7,5
15	290	0,6	5	7,1	42,3	12,5
30	420	0,9	15	3,4	263,0	22,5
60	950	1,9	30	3,9	465,0	45,0
90	780	1,6	30	3,2	566,4	75,0
120	770	1,6	30	3,1	573,7	105,0
150	530	1,1	30	2,2	833,6	135,0
180	420	0,9	30	1,7	1051,9	165,0
210	415	0,8	30	1,7	1064,5	195,0
240	405	0,8	30	1,7	1090,8	225,0

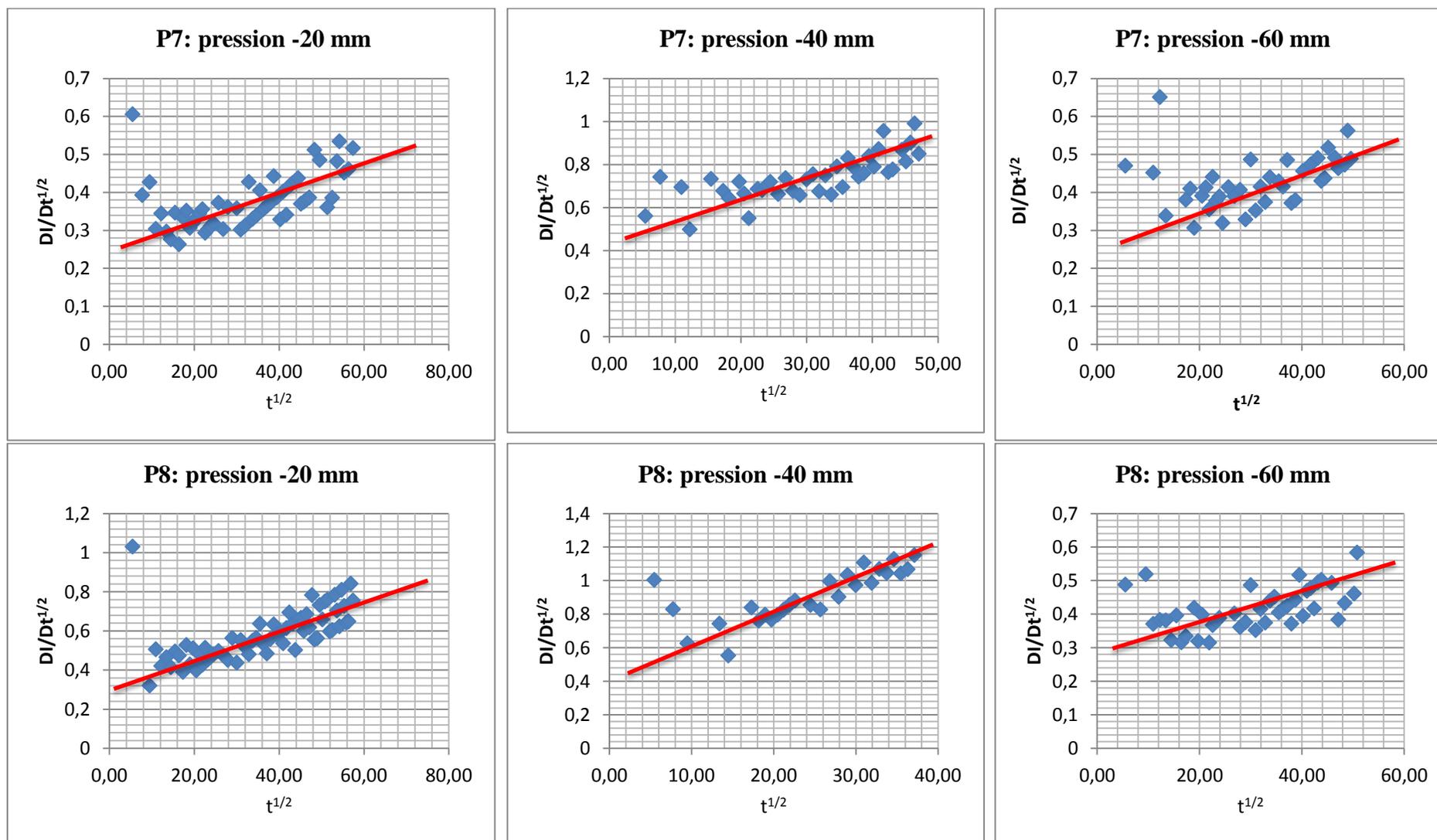


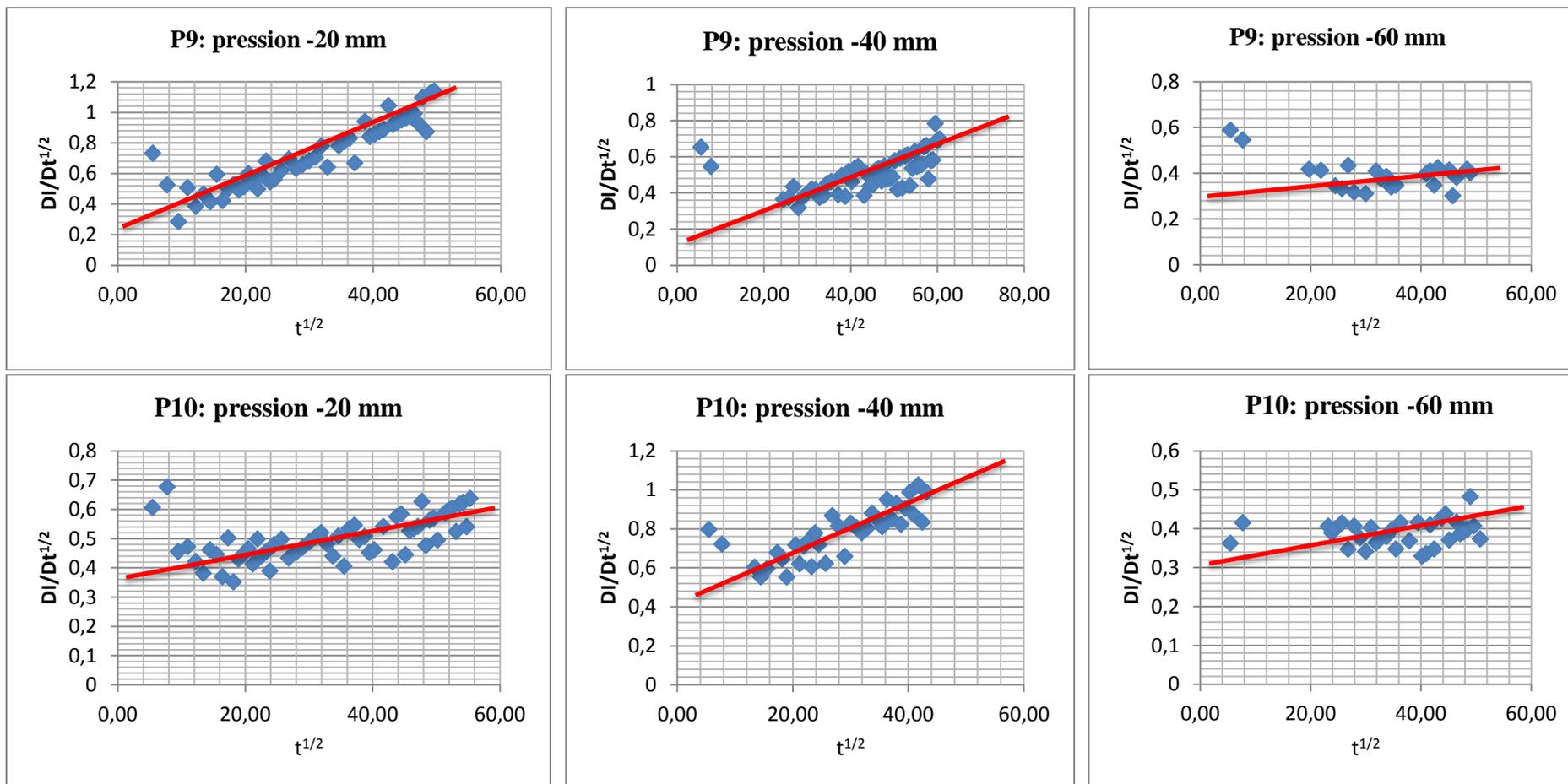
17/03/2015
Début : 7h50
Fin: 11h50
Parcelle 24

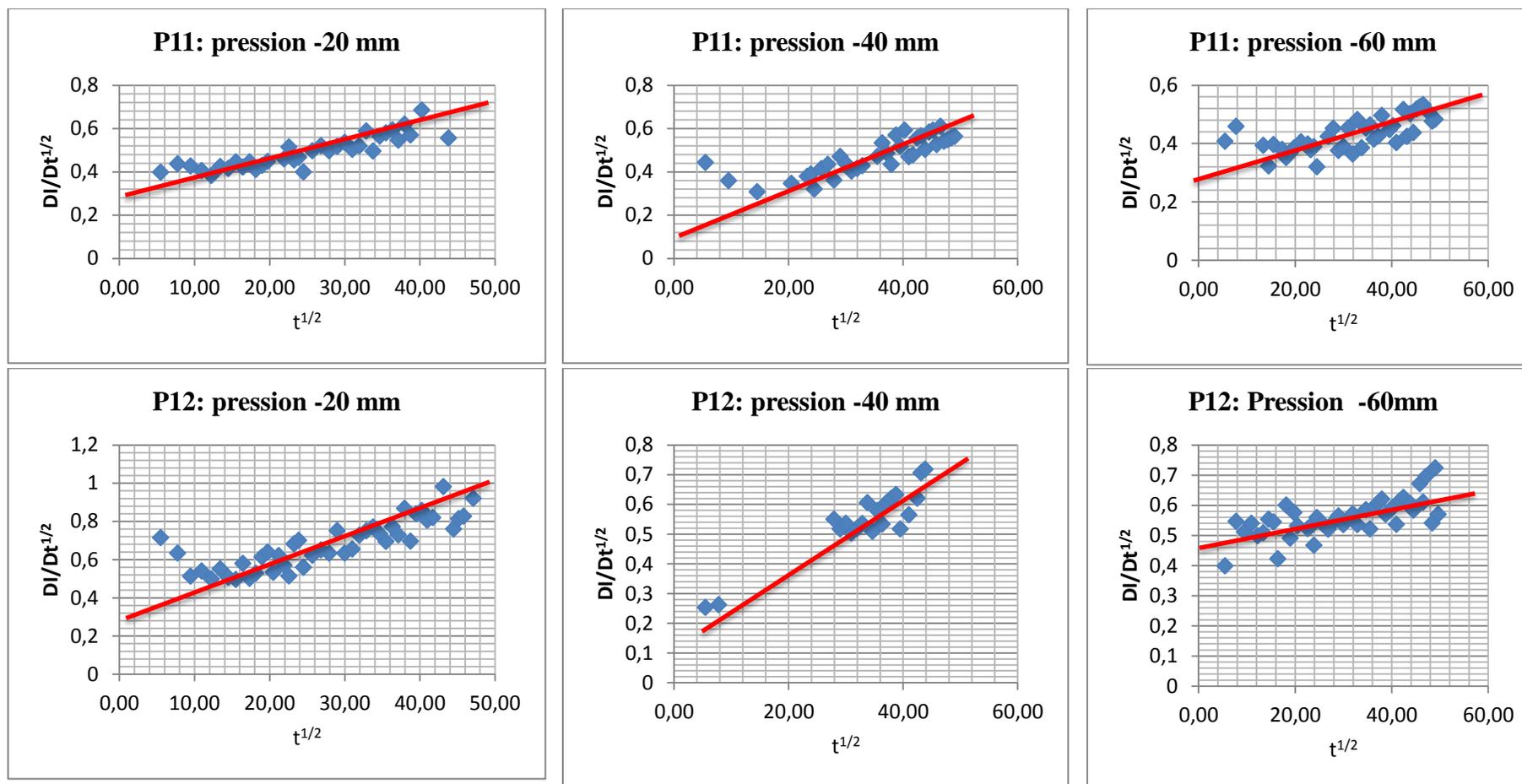
t (mn)	V (ml)	h (cm)	dt(mn)	Vi (cm/h)	Inf.cum (cm ³)	Tmoy (mn)
0	0	0	-	-	-	-
1	95	0,2	0,5	23,2	1,3	0,5
3	50	0,1	2	3,1	39,3	2,0
5	70	0,1	2	4,3	28,0	4,0
10	90	0,2	5	2,2	136,4	7,5
15	70	0,1	5	1,7	175,3	12,5
30	95	0,2	15	0,8	1162,6	22,5
60	235	0,5	30	1,0	1879,9	45,0
90	230	0,5	30	0,9	1920,8	75,0
120	180	0,4	30	0,7	2454,4	105,0
150	130	0,3	30	0,5	3398,4	135,0
180	120	0,2	30	0,5	3681,6	165,0
210	95	0,2	30	0,4	4650,4	195,0
240	60	0,1	30	0,2	7363,1	225,0

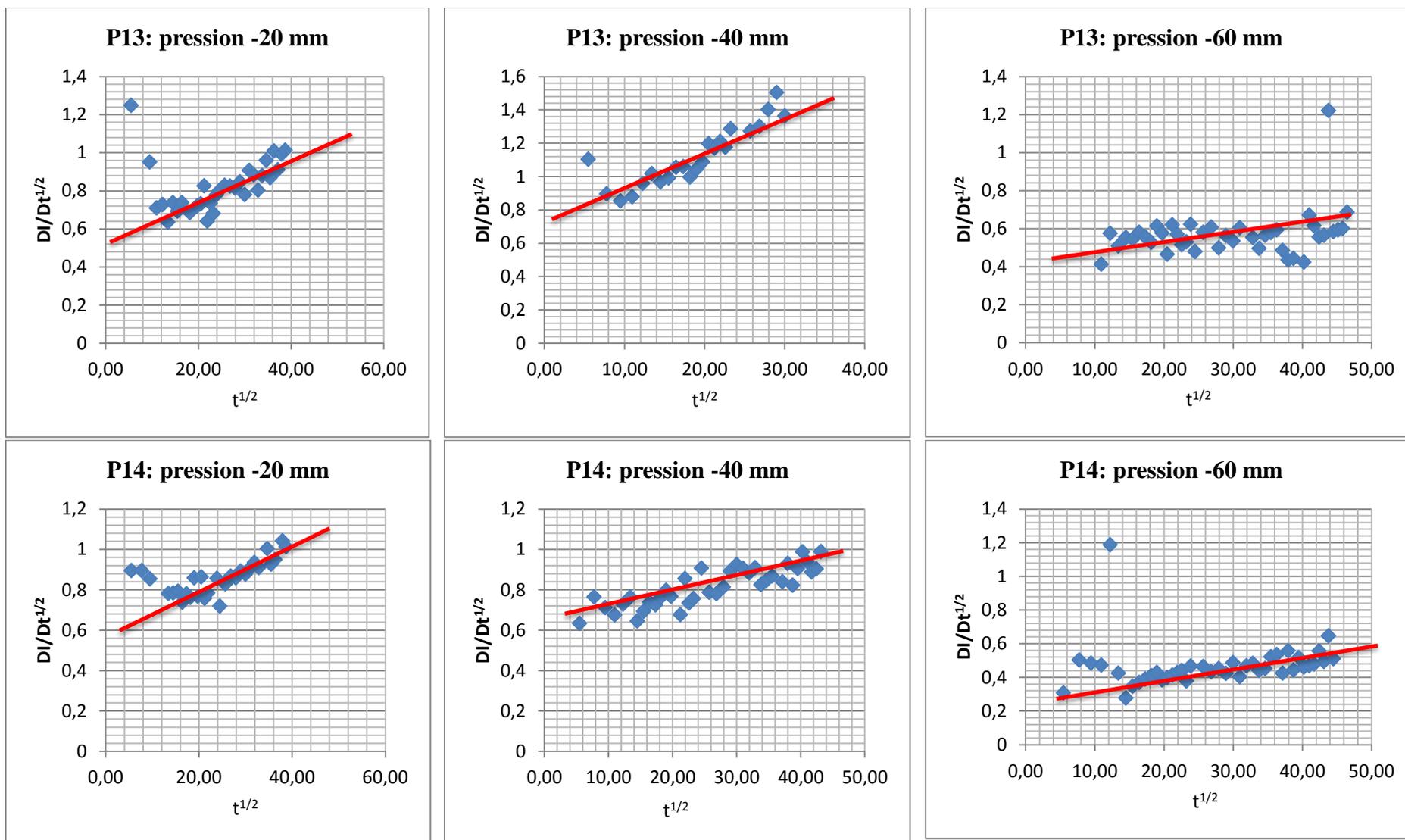


Annexe 2: Courbe d'évolution de la dérivée de la racine carrée de l'infiltration cumulée I en fonction de la racine carrée du temps \sqrt{t}









Annexe 3:Évolution de la conductivité hydraulique non saturée et de la sorptivité durant les différentes périodes de mesure pour la succion 40 mm

Tableau récapitulatif de K

parcelle 1			
h	20	40	60
k	0,0072	0,0054	0,0045
parcelle 2			
h	20	40	60
k	0,0153	0,0126	0,0108
parcelle 3			
h	20	40	60
k	0,00495	0,0045	0,0009
parcelle 4			
h	20	40	60
k	0,0108	0,0054	0,0036
parcelle 5			
h	20	40	60
k	0,0108	0,0072	0,0036
parcelle 6			
h	20	60	80
k	0,0144	0,0135	0,0036
parcelle 7			
h	20	40	60
k	0,0072	0,0063	0,0045
parcelle 8			
h	20	40	60
k	0,0144	0,0126	0,0036
parcelle 9			
h	20	40	60
k	0,018	0,0072	0,0009
parcelle 10			
h	20	40	60
k	0,0099	0,009	0,0018
parcelle 11			
h	20	40	60
k	0,009	0,0072	0,0054
parcelle 12			
h	20	40	60
k	0,0108	0,009	0,0045
parcelle 13			
h	20	40	60
k	0,0126	0,0108	0,0036
parcelle 14			
h	20	40	60
k	0,0108	0,0063	0,0054
parcelle 15			
h	20	40	60
k	0,018	0,0063	0,0036
parcelle 16			
h	20	40	60
k	0,009	0,0054	0,0036
parcelle 17			
h	20	40	60
k	0,0072	0,0054	0,0036
parcelle 18			
h	20	40	60
k	0,0225	0,0108	0,0072
parcelle 19			
h	20	40	60
k	0,009	0,0072	0,0054
parcelle 20			
h	20	40	60
k	0,0072	0,0063	0,0054
parcelle 21			
h	20	40	60
k	0,0144	0,009	0,0054
parcelle 22			
h	20	40	60
k	0,0108	0,0054	0,0036
parcelle 23			
h	20	40	60
k	0,009	0,0072	0,0054
parcelle 24			
h	20	40	60
k	0,0324	0,0072	0,0054

Représentations graphiques de K et S

