

*Master Sciences de l'Eau et de l'Environnement*

## Hydrosystèmes et Bassins versants : diagnostic et risque environnemental

*Rapport de stage de fin d'études pour l'obtention  
de la 2<sup>nd</sup>e année de Master*

# Caractérisation de l'anisotropie du tenseur de la conductivité hydraulique dans un sol agricole drainé



**Gouny Laetitia**

**Mars - Septembre 2014**

*Année universitaire :*  
2013 - 2014

*Encadrement :* **Isabelle Cousin et Guillaume Giot**

*Organisme d'accueil :* INRA Centre Val de Loire  
Unité de Recherche de Science du Sol  
2163, avenue de la pomme de pin  
CS 40001 Ardon - 45075 Orléans cedex 2



## **Remerciements**

Je tiens à remercier Isabelle Cousin et Guillaume Giot pour leurs conseils, le temps qu'ils ont consacré à mon encadrement et leur gentillesse.

Merci à Christian Le Lay, Didier Laloua et Catherine Pasquier qui étaient présents sur le terrain à Illiers, sans eux le prélèvement des échantillons n'aurait pas été aussi efficace.

Mes remerciements vont également à Sylvaine Parot, Lionel Cottenot et Gaëtane Chirié, qui m'ont apporté leur aide, et leur amitié tout au long du stage.

Je remercie aussi mes collègues stagiaires et thésards : Martin, Yann, Eva et Jordan.

Enfin je remercie : Marine, Gaëtan, Eugénie, Philippe, Magalie, Hervé, Marie-Pierre, Catherine, Sébastien, Christine, Charlène, Pierre, Jocelyn et toutes les personnes qui ont participé au bon déroulement de ce stage !

Merci à tous... !!!



## Sommaire

Sommaire .....	1
Glossaire.....	2
Présentation de l'organisme d'accueil.....	3
1. Introduction .....	4
1.1. Contexte et problématique.....	4
1.2. Eléments bibliographiques .....	5
2. Matériels et méthodes.....	10
2.1. Présentation du site d'étude.....	10
2.2. Prélèvement des échantillons.....	11
2.3. Détermination de la conductivité hydraulique à saturation ( $K_{sat}$ ) .....	13
2.4. Mesure de rétention en eau et estimation de la conductivité hydraulique en régime insaturé ( $K$ ).....	14
3. Résultats .....	17
3.1 Estimation de la conductivité hydraulique à saturation ( $K_{sat}$ ).....	17
3.2 Détermination des courbes de conductivité hydraulique $K(h)$ et $K(\theta)$ .....	24
4. Discussion .....	30
4.1. Eléments méthodologiques.....	30
4.2. Evolution de la conductivité hydraulique en fonction de la direction de prélèvement et de la distance au drain .....	32
Conclusion.....	34
Références bibliographiques .....	35
Liste des figures .....	37
Liste des tableaux .....	38
Annexes.....	39
Table des matières .....	44

## Glossaire

CIPAN : Culture Intermédiaire Piège à Nitrates

ESCAPADE : Evaluation des Scénarios sur la Cascade de l'Azote dans les Paysages Agricoles et moDELisation territoriale. Ce projet vise à rechercher des voies innovantes à l'échelle du territoire pour optimiser l'usage de l'azote et en réduire les pertes dans l'environnement, et ainsi préserver durablement les agro-écosystèmes tout en maintenant la productivité des systèmes de production.

Horizon BT : horizon argilluvial caractérisé par une accumulation de matière, essentiellement des particules argileuses, par rapport aux autres horizons du solum (AFES, 2009).

Horizon BTgd : horizon argilluvial dégradé, présentant une « dégradation morphologique » observable sous la forme de parties grises appauvries en certains éléments (interdigitations) et qui est rédoxique.

Horizon E : Horizon d'éluviation, appauvri en fer et/ou minéraux argileux phylliteux (AFES, 2009).

Horizon E&BT : horizon de transition entre un horizon E éluvial et un horizon BT d'argilluviation.

Ksat : conductivité hydraulique à saturation

Outlier : valeur extrême ou aberrante que l'on peut extraire du jeu de données lors du traitement des données

OS<sup>2</sup> : Observatoire spatialisé orléanais des sols ; il s'agit d'un site expérimental suivi par l'UR Sols, support de plusieurs projets nationaux (ex : ESCAPADE, SOLGES, ...).

Répétabilité : Qualité d'une mesure qui donne le même résultat si on la répète dans des conditions identiques et dans un court intervalle de temps.

Reproductibilité : Qualité d'une mesure qui donne les mêmes résultats si on la répète dans des conditions différentes et à des époques différentes.

SOLGES : projet de l'INRA qui concerne l'étude de la capacité des sols à réduire le gaz à effet de serre N<sub>2</sub>O en N<sub>2</sub>.

Solum : volume de sol réel observable et prélevable.

## Présentation de l'organisme d'accueil

### Présentation de l'INRA

L'Institut National de la Recherche Agronomique, (INRA), est un établissement public à caractère scientifique et technologique placé sous la tutelle conjointe des ministères de l'Agriculture et de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Cet institut a été créé en 1946, dans un contexte où l'agriculture en France accusait un retard de développement par rapport à certains pays et ne permettait pas de subvenir aux besoins de la population. La mission de l'INRA était de mettre la science et la technologie au service du développement de l'agriculture en améliorant les techniques de production (culture et élevage) et la sélection génétique végétale et animale. Au fur et à mesure des années, les domaines de compétences de l'INRA ont évolué ; aujourd'hui, les recherches s'orientent autour de trois domaines : l'alimentation, l'agriculture et l'environnement avec l'ambition de développer une agriculture à la fois compétitive, respectueuse de l'environnement, des territoires et des ressources naturelles. L'INRA est composé de centres régionaux répartis sur différents sites.

### Le centre INRA Val de Loire et l'Unité de Recherche de Science du sol

Le centre INRA Val de Loire est réparti sur trois sites : Orléans, Tours et Bourges, et mène des recherches autour de quatre pôles :

- Dynamique des sols et gestion de l'environnement
- Biologie intégrative des arbres et organismes associés
- Biologie intégrative animale et gestion durable des productions animales
- Santé animale et santé publique.

L'Unité de Recherche de Science du Sol (UR SOLS), située sur le site d'Orléans, est l'unité dans laquelle j'effectue ce stage. Cette unité a pour mission principale de développer des travaux de recherche sur les interactions entre les propriétés physiques des sols et leurs fonctionnements hydriques et biogéochimiques en s'appuyant sur des compétences d'observations, de mesures spatiales *in situ*, d'expérimentation et de modélisation.

L'UR SOLS approfondit les connaissances sur l'érosion hydrique des sols, la réserve en eau des sols et les mécanismes de production et de libération de gaz à effet de serre par les sols. Les projets de l'unité sont orientés selon deux axes principaux :

- l'évolution et le fonctionnement spatialisé des sols
- la vulnérabilité et la valorisation des sols.

Ces travaux contribuent à une meilleure préservation des sols, à une meilleure gestion de la ressource en eau, à la protection de la qualité de l'air, en particulier dans le contexte actuel des changements globaux. L'unité est composée de chercheurs, ingénieurs et techniciens dont les travaux sont intégrés dans différents projets (ESCAPADE, SOLGES, ...) qui s'appuient sur des analyses de terrain, de laboratoire et de modélisation du fonctionnement des sols.

# 1. Introduction

## 1.1. Contexte et problématique

Le sol est un objet naturel dont l'existence et l'état résultent de l'évolution au cours du temps d'un matériau parental minéral, sous l'action combinée de facteurs climatiques et de processus liés à l'activité biologique (Baize et Jabiol, 2011). Le sol est parfois désigné par le terme de couverture pédologique.

Les couvertures pédologiques sont des continuums qui varient dans les trois dimensions de l'espace. Leurs aspects et leurs propriétés dépendent des facteurs extérieurs qui ont permis leur genèse et leur évolution pédologique en chaque point de l'espace (Baize et Jabiol, 2011 ; AFES, 2009). Ainsi, les sols sont des matériaux souvent très hétérogènes et anisotropes.

Les sols sont aussi le lieu de transferts de matière, d'eau, d'éléments chimiques et d'énergie. Le mouvement de l'eau dans le sol peut être défini en terme de flux, c'est-à-dire comme un volume d'eau qui passe par une section en un temps donné (Chamayou et Legros, 1989). C'est la conductivité hydraulique qui décrit alors la capacité du sol à laisser passer l'eau.

Ce paramètre est fondamental pour la compréhension des mouvements de l'eau ou de fluides dans le sol, car il est utilisé dans de nombreux modèles de transfert basés sur l'équation de Richards. Les modèles de transferts ont de nombreux contextes applicatifs comme l'étude des transferts de polluants ou l'émission de gaz à effet de serre.

L'objectif de ce travail est de caractériser l'anisotropie et la variabilité spatiale du tenseur de la conductivité hydraulique dans un sol agricole drainé.

Il s'agit d'étudier :

- la conductivité hydraulique dans trois directions de l'espace (verticale, horizontale parallèle au drain et horizontale perpendiculaire au drain)
- la variation de conductivité selon la distance au drain dans cette parcelle drainée.

D'un point de vue méthodologique, il s'agit d'évaluer l'intérêt de deux dispositifs expérimentaux permettant l'analyse des propriétés hydriques des sols sur des échantillons de petite taille :

- d'une part, un perméamètre à chute de charge permettant de mesurer la conductivité hydraulique à saturation ( $K_{sat}$ ) sur des cylindres de sol de  $250 \text{ cm}^3$  ;
- d'autre part, un dispositif HYPROP permettant de mesurer la rétention en eau des échantillons et la conductivité hydraulique en régime insaturé sur des cylindres de sol de  $250 \text{ cm}^3$ .

## 1.2. Eléments bibliographiques

### 1.2.1. Généralités

La conductivité hydraulique correspond au coefficient de proportionnalité entre le flux et le gradient hydraulique (Chamayou et Legros, 1989).

Le flux est obtenu décrit par la relation suivante, dite Loi de Darcy :

$$\mathbf{q} = - \mathbf{K} \cdot \text{grad } H \quad [1]$$

avec  $q$  : flux d'eau (m/s) ;  $K$  : conductivité hydraulique (m/s) ; grad  $H$  : gradient hydraulique

La conductivité hydraulique représente donc la capacité d'un sol à laisser circuler l'eau dans des pores non fermés (Calvet, 2003 ; Mallants et al, 1997), ce qui correspond à la vitesse de circulation de l'eau dans le sol (Chossat et Sagnac, 1985).

Elle dépend des caractéristiques physiques du sol. Elle est notamment influencée par la texture, la structure du sol, la dimension et la continuité des pores (Bagarello et al, 2009). Elle est plus élevée si le sol est très poreux, fracturé ou formé d'agrégats que s'il est dense et compact (Hillel, 1988).

Dans un sol saturé en eau, l'eau occupe la totalité de l'espace poral. L'eau se déplace dans tous les pores interconnectés. Dans ce cas, la conductivité hydraulique est maximale, c'est une valeur particulière appelée conductivité hydraulique à saturation (notée  $K_{sat}$ ), dans la suite du document.

Dans un sol non saturé, l'eau ne s'écoule que dans une sous-partie des pores interconnectés (Calvet, 2003). La conductivité hydraulique dépend alors de la teneur en eau du sol ( $\theta$ ) ou de son potentiel matriciel ( $h$ ), ces deux grandeurs étant reliés par la caractéristique de rétention en eau du sol.

La courbe de rétention hydrique traduit ainsi la capacité d'un sol à retenir l'eau. Lors du dessèchement d'un sol, l'eau restante est de plus en plus fortement liée aux particules de sol. L'énergie de liaison entre le sol et l'eau se traduit par le potentiel matriciel ( $h$ ). Ce potentiel correspond à l'énergie qu'il faut fournir pour extraire l'eau du sol ; il est donc exprimé comme une valeur négative. Fréquemment, le potentiel matriciel est remplacé par la succion ( $\psi$ ), qui est égale à la valeur absolue du potentiel matriciel. Cette succion est généralement exprimée en Pascal (Pa) ou en point d'humidité équivalente  $pF^1$ . Sachant que plus  $pF$  augmente, plus la force de succion augmente.

La conductivité hydraulique est donc une fonction de la teneur en eau notée  $K(\theta)$  et une fonction du potentiel matriciel notée  $K(h)$  (figure 1).

---

<sup>1</sup>  $pF = \log(\psi)$

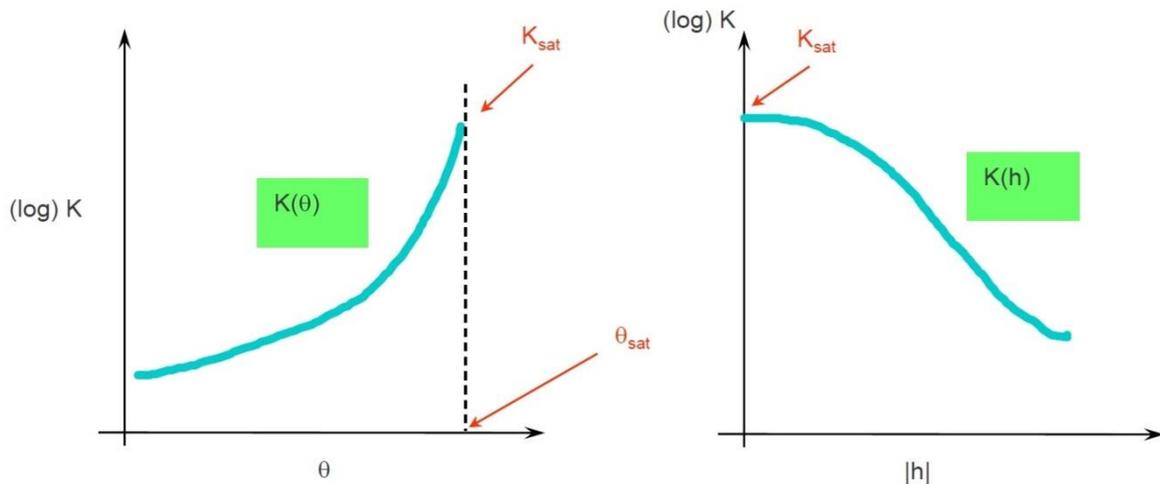


Figure 1 : Courbes de conductivité hydraulique (Cousin, 2014)

### 1.2.2. Méthodes de détermination de la conductivité hydraulique

Différentes méthodes de détermination de la conductivité hydraulique sont utilisées selon l'état de saturation du milieu, car le comportement du sol est différent suivant sa teneur en eau.

Ce paragraphe a pour objectif de présenter, de manière non exhaustive, différentes méthodes de mesure de la conductivité hydraulique en régime saturé et insaturé.

La valeur de  $K_{sat}$  est soit évaluée par des dispositifs expérimentaux au laboratoire (a), soit déterminée sur le terrain (b).

(a) Les méthodes de mesures de  $K_{sat}$  couramment utilisées au laboratoire sont :

- Le perméamètre à charge constante : il s'agit d'un dispositif qui permet de faire passer un flux d'eau ascendant dans un cylindre de sol, à une charge hydraulique constante. Le résultat obtenu est une valeur de coefficient de perméabilité à saturation ;
- Le perméamètre à chute de charge : le principe de la mesure consiste à faire passer un flux d'eau ascendant dans un cylindre de sol, en faisant diminuer la charge hydraulique ;
- La méthode de Vergière : elle utilise également un perméamètre à niveau constant, mais dans ce cas, la mesure est effectuée sur un cube de sol (taillé à la main) et non sur un cylindre comme les techniques citées ci-dessus (Chossat, 2005). Ce type de prélèvement permet de prendre en compte la macrostructuration du sol, ce qui n'est pas le cas des mesures sur petits cylindres.

(b) Méthodes de mesures de  $K_{sat}$  sur le terrain

- Le forage ou trou à la tarière : c'est une méthode qui permet principalement de mesurer la conductivité à saturation selon l'axe horizontal. Après avoir fait une étude pédologique afin d'identifier la présence de niveaux caillouteux qui limitent l'utilisation de cette méthode, il faut creuser un trou à la tarière jusqu'à la profondeur de mesure souhaitée (entre 30 cm et 70 cm), en faisant attention de bien « nettoyer » le trou. Six trous doivent être réalisés par zone homogène pour avoir une valeur

statistique de  $K_{sat}$ . Puis, il faut verser de l'eau dans le trou pour le saturer, et maintenir le niveau d'eau par des apports successifs. Ensuite, on ajuste le niveau d'eau à 15 cm, au-dessus du fond du trou, on observe l'abaissement du niveau d'eau toutes les 30 minutes en réajustant à chaque fois le niveau à sa valeur initiale, le test est arrêté dès qu'il y a une stabilisation du niveau. On retient le rabattement obtenu à la dernière demi-heure. Enfin,  $K_{sat}$  est calculée en utilisant la loi de Darcy (Chossat, 2005) ;

- L'infiltromètre en pression (méthode du simple anneau) : cette méthode consiste à déterminer sur le terrain la vitesse d'infiltration de l'eau sous une charge constante. La distance sur laquelle s'exerce la différence de charge hydraulique augmente au fur et à mesure que le front d'humectation progresse dans le sol. Le flux infiltré diminue progressivement au cours de la mesure jusqu'à un équilibre qui correspond à une valeur de  $K_{sat}$  proche de la couche dans laquelle est réalisée la mesure (Chossat, 2005).

Les courbes  $K(h)$  et  $K(\theta)$  sont généralement déterminées au laboratoire (c) mais il existe aussi quelques méthodes de mesure sur le terrain (d).

(c) Méthodes de mesure de  $K$  en régime insaturé au laboratoire

- La méthode d'évaporation de Wind : au laboratoire, l'échantillon de sol est humidifié jusqu'à saturation, puis il est desséché par évaporation à partir de sa partie supérieure. Durant l'évaporation, à des instants déterminés, les charges de pression sont mesurées à différents niveaux de l'échantillon de sol au moyen de tensiomètres et la masse de l'échantillon est mesurée (ISO 11275, 2004) ;
- La méthode des deux plaques : on émet l'hypothèse que la conductivité hydraulique est fonction de la teneur en eau de l'échantillon. On mesure le flux extrait d'un échantillon maintenu entre deux plaques poreuses entre lesquelles on établit une différence de pression constante, qui détermine un gradient de charge, ce qui permet de calculer la conductivité hydraulique en appliquant l'équation de Darcy ;
- Le dispositif HYPROP : un échantillon de sol qui a été humidifié jusqu'à saturation, est évaporé à partir de sa partie supérieure. La différence avec la méthode Wind provient de la différence d'orientation des tensiomètres (la technique HYPROP est détaillée dans le paragraphe 2.4.1).

(d) Méthodes de mesure de  $K$  sur le terrain

- La méthode de la croute : cette méthode permet de mesurer la conductivité en fonction de la charge de pression. Des croutes plus ou moins étanches sont réalisées avec un mélange de ciment rapide et de sable. Un flux hydrique est maintenu constant à une valeur inférieure à celle de la conductivité en régime saturée, la conductivité est égale au flux imposé. Dans le même temps la pression matricielle du sol est mesurée, ce qui permet d'obtenir une valeur de la courbe  $K(h)$ . Des mesures successives avec des croutes différentes permettent de décrire la courbe  $K(h)$  dans la gamme des pressions utilisées (Chossat, 2005) ;

- La méthode du temps de réponse du tensiomètre : le tensiomètre est surtout utilisé pour mesurer le potentiel de l'eau du sol, mais il peut aussi être utilisé comme un outil actif pour déterminer la conductivité hydraulique dans un sol non saturé à partir de la mesure de gradients de potentiel. Lors de la réalisation de la mesure tensiométrique, la pression de l'air au sommet du tensiomètre varie instantanément lorsque, par exemple, on introduit avec une seringue une petite quantité d'air. L'excès de pression se dissipe en provoquant un départ d'eau de la céramique poreuse vers le sol en place. Le niveau de réponse du tensiomètre dépend de la capacité du capteur à transmettre la pression et de la conductivité hydraulique du sol lorsque la résistance de la céramique poreuse est suffisamment faible. Par ce moyen, il est possible de déterminer la courbe de dissipation de pression, et ensuite à partir de différents calculs, il est possible d'estimer une valeur de conductivité hydraulique du sol dans la zone au contact de la bougie poreuse (Chossat, 2005).

### 1.2.3. Variation de la conductivité hydraulique

Dans les sols, la conductivité hydraulique est un paramètre qui varie d'un point à l'autre mais également selon la direction de l'écoulement (Musy et Soutter, 1991).

Ainsi, la conductivité hydraulique peut se décomposer en trois composantes (x,y,z) qui correspondent à trois directions de l'espace (figure 2).  $K$  est considérée comme un élément multi-vecteurs :  $K(x,y,z)$  aussi appelé tenseur.

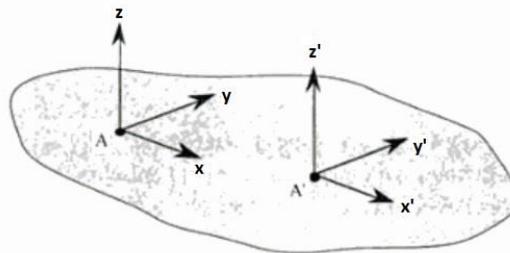


Figure 2 : conductivité hydraulique dans un sol hétérogène et/ou anisotrope (Musy et Soutter, 1991)

Dans la plupart des modèles de transfert, une seule valeur de  $K_{sat}$  est renseignée, selon la direction verticale. En effet, les échantillons sont souvent prélevés dans des cylindres dont l'axe principal est vertical, de façon à capter les transferts préférentiels liés aux macropores verticaux, dûs soit à la fissuration verticale, soit à l'action de certaines catégories de lombriciens.

Les composantes horizontales de la conductivité sont alors estimées en appliquant un coefficient empirique à la valeur de conductivité mesurée selon l'axe vertical. Des valeurs de référence de ce coefficient sont éparées dans la littérature : on constate souvent que la conductivité selon l'axe horizontal est supérieure à la conductivité à saturation selon l'axe vertical (Bathke et al., 1991 ; Petersen et al., 2008 ; Bagarello et al, 2009), parfois de deux ordres de grandeur, ce qui remet en cause a priori la légitimité d'un prélèvement selon l'axe vertical, même si quelques contrexemples ont été décrits (Kruse et al., 2008 ; Petersen et al., 2008). De plus, l'anisotropie de  $K_{sat}$  varie dans le temps, et en fonction du travail du sol (labour ou techniques simplifiées) effectué sur les parcelles (Coutadeur et al, 2002 ; Dörner et Horn, 2009).

Le rapport entre conductivité hydraulique verticale et conductivité hydraulique horizontale en régime insaturé est plus complexe, et semble dépendre du potentiel matriciel du sol (Friedman & Jones, 2001 ; Reszkowska et al., 2011 ; Zhu & Sun, 2010).

Enfin, en milieu drainé, les propriétés hydriques du sol varient spatialement depuis la position du drain jusqu'à l'interdrain (Frison, 2005), et il est probable que l'anisotropie du tenseur de conductivité varie également. L'étude de  $K$  et  $K_{sat}$  suivant les directions a une grande importance pour comprendre le fonctionnement hydrodynamique des parcelles (Guireesse et al, 1989). L'anisotropie de  $K_{sat}$  a un intérêt particulier pour l'analyse et la modélisation des flux d'eau et d'éléments chimiques (par exemple : les nitrates) dans le sol (Petersen et al, 2008).

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Présentation du site d'étude

La zone d'étude se situe à St-Denis-des-Puits, au lieu-dit « la Massoterie », au sud-ouest de Chartres, en Eure-et-Loir (annexe 1). Il s'agit d'une parcelle agricole drainée de 11,3 ha (figure 3), étudiée dans le cadre de différents projets, conduits sur le site OS<sup>2</sup> (Observatoire Spatialisé Orléanais des Sols). La distance entre les drains est de 10 m. Les drains sont situés à environ 80 cm de profondeur. Le drainage a été mis en place en 1973.



Figure 3 : Localisation du site et position des drains

D'après la carte des sols au 1/10 000, les fosses ont été creusées dans des Luvisols dégradés à engorgement temporaire désignés comme des sols limoneux à hydromorphie temporaire.

Les horizons du profil de sol sont typiquement :

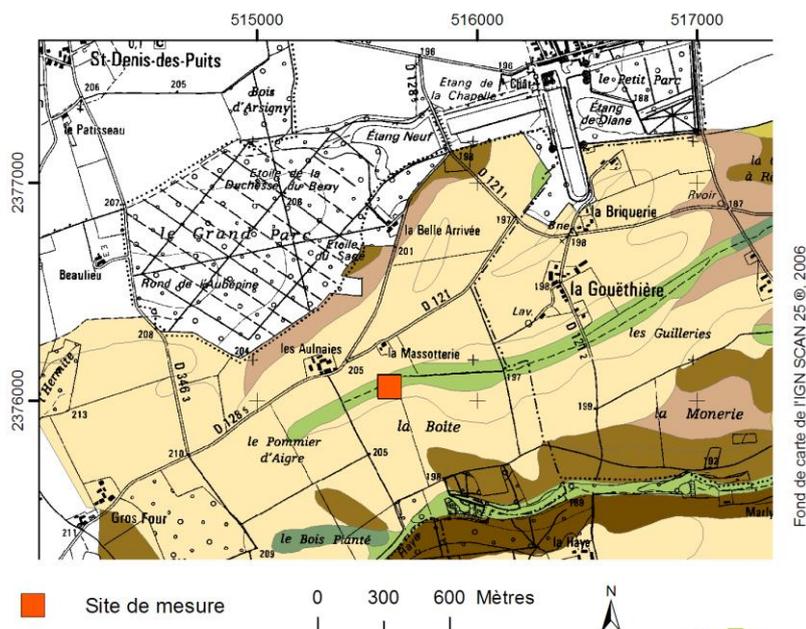
- de 0 à 30 (35) cm, un horizon LA (Argile : 14% ; Limon : 81% ; Sable : 5% ; ce qui correspond à une texture « Limon Moyen ».
- de 30 à 45 (50) cm, un horizon E&BT<sup>2</sup> parfois absent,
- de 45 à 80 (90) cm, un horizon BTgd,
- en dessous de 80 (90) cm un horizon B3 (annexe 2 et figure 4).

Sur la parcelle, on trouve également des sols développés dans des colluvions limoneuses épaisses à hydromorphie temporaire peu profonde (figure 5), et localement, des sols limoneux à fragipan érodés à hydromorphie temporaire peu profonde. (Les fragipans sont des horizons généralement moins argileux tassés, où la densité apparente du sol est plus importante).



Figure 4 : profil de sol observé sur la parcelle

<sup>2</sup> La détermination de la composition granulométrique des échantillons prélevés dans les horizons E&BT et BTgd est toujours en cours au moment de la rédaction de ce mémoire.



Carte réalisée par l'UR Science du Sol  
 Levés réalisés par par B.Nicoullaud, C.LeLay, P.Courtemanche et C.Pasquier  
 Carte dressée par B.Nicoullaud au 1/10 000  
 Traitements informatiques : C.Pasquier  
 Version du 27/11/2013



**Figure 5 : Extrait de la carte des sols au 1/10 000 Observatoire Spécialisé Orléanais des Sols (OS<sup>2</sup>) (INRA Orléans, UR Sols, 2013)**

La rotation des cultures sur cette parcelle est Maïs / Blé tendre d'hiver/ Blé tendre d'hiver avec moutarde dans l'interculture longue (entre Blé et Maïs). La parcelle était en blé en 2013. Au moment du prélèvement des échantillons la parcelle était semée en culture intermédiaire piège à nitrates (CIPAN), moutarde et radis.

## 2.2. Prélèvement des échantillons

Quatre fosses ont été creusées. Chaque fosse est située à une distance plus ou moins importante du drain « repère ». La fosse A est située juste au-dessus du drain, la fosse B à environ 60 cm du drain, la fosse C à 3.60 m. La fosse D est située à environ 5.80 m du drain pris comme repère, soit à 4,20 m du drain suivant (figure 6), de l'autre côté de l'interdrain localisé à 5 m.

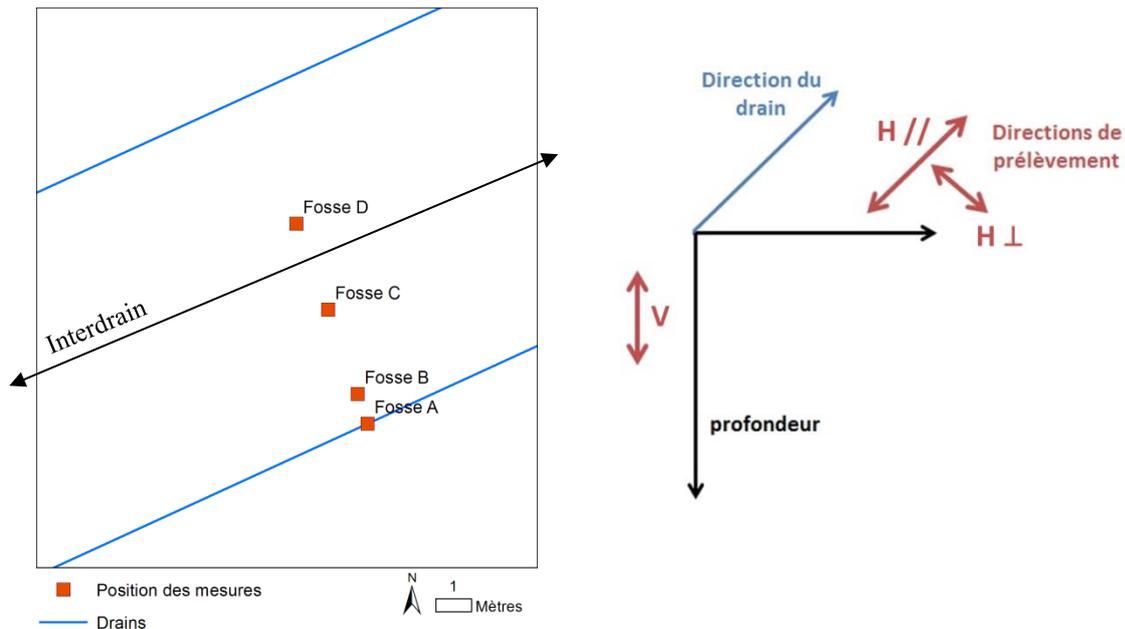


Figure 6 : Position des fosses par rapport aux drains et schéma des directions de prélèvement

Dans chaque fosse les échantillons ont été prélevés à 45 cm de profondeur, dans l'horizon E & BT et 65 cm de profondeur, dans l'horizon BTgd. Les cylindres ont été placés de façon à prélever les échantillons selon 3 directions par rapport au drain : selon une orientation verticale, selon une orientation horizontale parallèle au drain et une orientation horizontale perpendiculaire au drain (figure 6 et tableau 1). Dans les fosses B et D, l'échantillonnage a été doublé ; deux cylindres ont été prélevés par direction et par horizon au lieu d'un seul (sauf dans la direction verticale) (tableau 1). Nous avons également prélevé des échantillons dans l'horizon LA, selon les directions horizontales dans la fosse B et selon la direction verticale à proximité des fosses (8 échantillons).

Tableau 1 : nombre d'échantillons prélevés selon la direction de prélèvement et dans chaque fosse

	directions de prélèvement	horizons		
		LA	E&BT	BTgd
Fosse A (0 m du drain)	Vertical	-	1	1
	Horizontal parallèle	-	1	1
	Horizontal perpendiculaire	-	1	1
Fosse B (0,60 m du drain)	Vertical	-	2	2
	Horizontal parallèle	2	2	2
	Horizontal perpendiculaire	2	2	2
fosse C (3,60 m du drain)	Vertical	-	1	1
	Horizontal parallèle	-	1	1
	Horizontal perpendiculaire	-	1	1
fosse D (5,80 m du drain)	Vertical	-	1	2
	Horizontal parallèle	-	2	2
	Horizontal perpendiculaire	-	2	2
Toutes distances au drain	Vertical	8	-	-



Les cylindres utilisés ont un diamètre intérieur de 8 cm, une hauteur de 5 cm et sont en acier inoxydable. Ils peuvent contenir un volume de sol de 250 ml. Cette méthode de prélèvement au cylindre permet d'obtenir des échantillons de sol non perturbés, dont la structure est préservée (figure 7).

**Figure 7 : Prélèvement des échantillons ; ici, des échantillons prélevés selon une direction horizontale**

La nomenclature des échantillons est précisée dans le tableau 2, ci-dessous.

**Tableau 2 : Nomenclature des échantillons**

Directions de prélèvement	Vertical	Horizontal parallèle	Horizontal perpendiculaire
Nom des échantillons	V	Hpar	Hprp

Cette nomenclature va surtout être utilisée pour présenter les résultats de l'étude dans la 3<sup>ème</sup> partie de ce rapport.

### **2.3. Détermination de la conductivité hydraulique à saturation (Ksat)**

#### **2.3.1. Mesure de la conductivité hydraulique à saturation (Ksat)**

Les mesures de conductivité hydraulique à saturation (Ksat) ont été réalisées au laboratoire, à l'aide d'un perméamètre à chute de charge, de la société UMS. Le principe de la mesure consiste à faire passer de l'eau (osmosée) dans un cylindre de sol qui a été préalablement saturé d'eau, dans une pièce à température ambiante. Cette méthode est basée sur l'équation de Darcy. Le dispositif permet de calculer la conductivité hydraulique à partir du flux d'eau passant dans l'échantillon et du gradient hydraulique (figure 8).

Les expérimentations sont réalisées sur les cylindres de sol prélevés au champ, arasés puis saturés par capillarité pendant 72 heures.

Le dispositif est constitué d'une burette graduée et d'un support permettant de diriger le flux hydrique à travers l'échantillon. Un capteur de pression à membrane et une thermistance sont connectés à un ordinateur via une interface USB. Ceci permettant de visualiser l'évolution de la charge hydraulique et de la température en fonction du temps (figure 8). La température ayant une influence sur la conductivité, celle-ci est normalisée à une température de référence, de 20°C, pour que toutes les valeurs de Ksat puissent être comparées.

Le logiciel détermine la conductivité hydraulique à saturation (Ksat) de l'échantillon à partir de l'évolution de la charge hydraulique, au cours de la mesure.

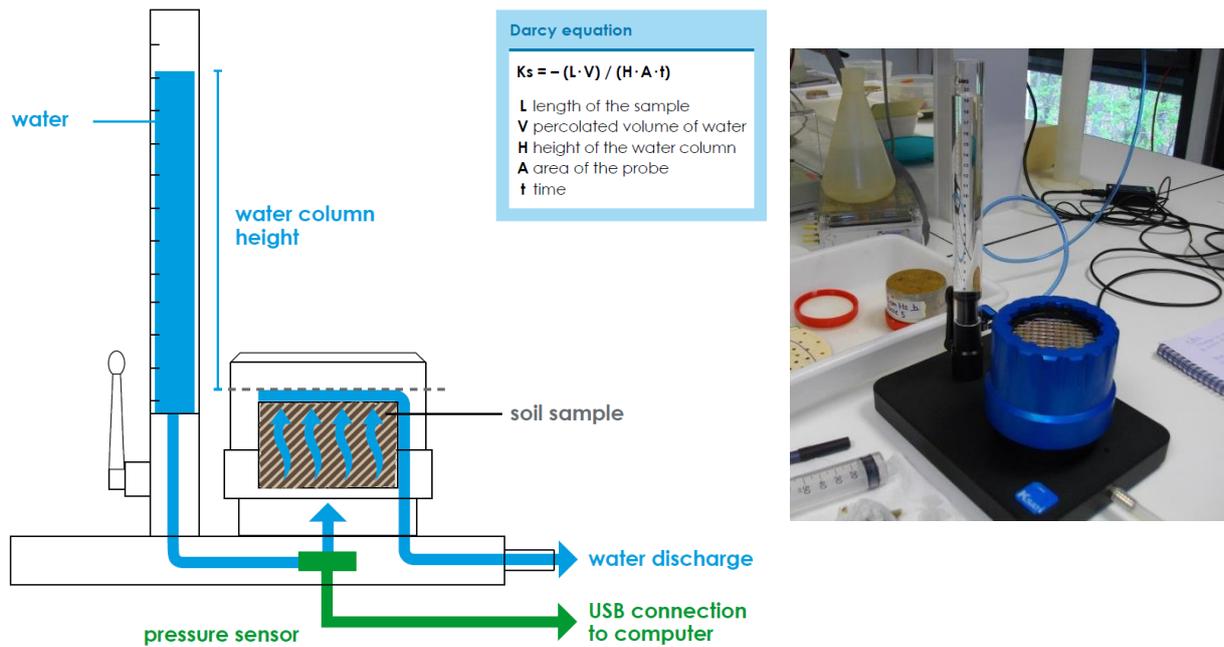


Figure 8 : Schéma du perméamètre (UMS, 2013) (à gauche) et photo du perméamètre (à droite)

La mesure est terminée lorsque la valeur de  $K_{sat}$  est stable ou que le niveau d'eau dans la burette est trop faible pour continuer la mesure.

Après la mesure de  $K_{sat}$ , les échantillons sont conservés dans une chambre froide, afin de pouvoir les réutiliser pour déterminer la conductivité hydraulique en régime insaturé.

### 2.3.2. Analyse des valeurs de conductivité hydraulique à saturation

Etant donné la gamme de variation de la conductivité hydraulique à saturation, qui peut varier de plusieurs ordres de grandeur, les valeurs sont moyennées – lorsque cela est nécessaire – par une moyenne géométrique.

Afin d'obtenir une valeur moyenne de la conductivité hydraulique à saturation dans la direction verticale sur l'ensemble du profil de sol, on fait une moyenne harmonique des valeurs de  $K_{sat}$  de chaque horizon (du profil étudié) (Samouëlian et al, 2011).

## 2.4. Mesure de rétention en eau et estimation de la conductivité hydraulique en régime insaturé (K)

### 2.4.1. Partie expérimentale au laboratoire.

La conductivité hydraulique (K) est estimée grâce au dispositif commercial HYPROP. Il s'agit d'une méthode d'évaporation inspirée de la méthode Wind, qui permet de déterminer la rétention en eau et les courbes de conductivité hydraulique sur un cylindre de sol initialement saturé et soumis à évaporation.

Les expérimentations sont réalisées sur les cylindres de sol ayant déjà subi une mesure de conductivité à saturation par le dispositif UMS  $K_{sat}$  (voir paragraphe 2.3.1). Ils sont resaturés par capillarité pendant 24 à 72h.

Le cylindre de sol est placé sur une base équipée de 2 tensiomètres, qui mesurent l'évolution du potentiel matriciel au cours de l'assèchement de l'échantillon. La base est posée sur une balance qui permet de suivre l'évolution de la masse au cours de l'assèchement (figure 9).

L'échantillon est à saturation au début de la mesure, puis il s'assèche progressivement au cours de l'expérimentation. Au cours de la mesure, cette désaturation provoque une augmentation du potentiel matriciel et une diminution de la masse de l'échantillon due à la perte d'eau par évaporation (figure 10).

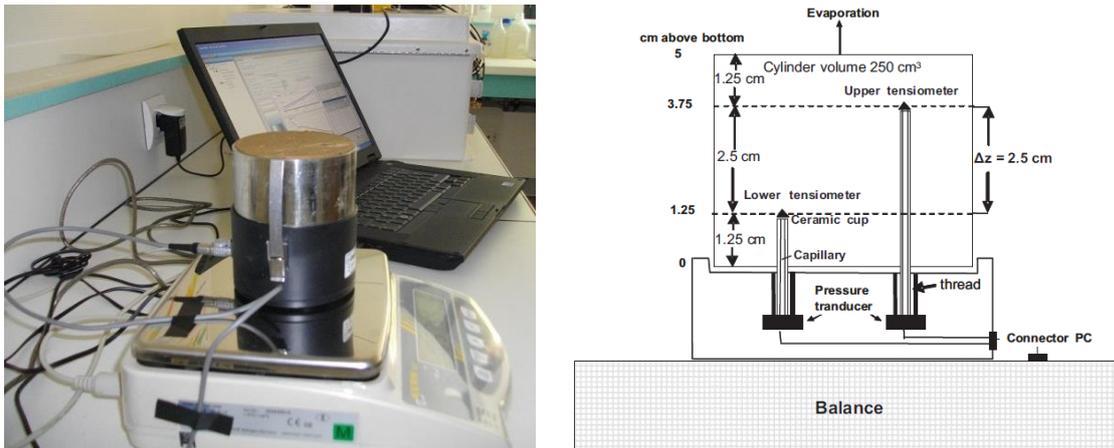


Figure 9 : dispositif Hyprop (à gauche) et schéma du dispositif (Schindler et al, 2010) (à droite)

La plage de mesure des tensiomètres va de  $-850$  hPa à  $+1000$  hPa. Ils sont positionnés à deux hauteurs dans l'échantillon. Un tensiomètre mesure le potentiel à 1,25 cm de la base de l'échantillon et le second mesure le potentiel à 3,75 cm de la base (figure 9).

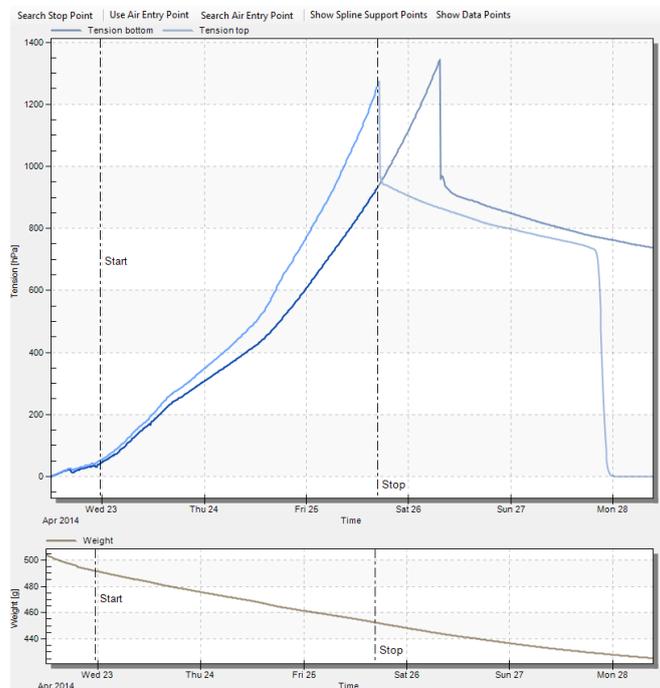


Figure 10 : Exemple de courbes de mesures

La mesure est stoppée lorsqu'un des tensiomètres « décroche », c'est-à-dire qu'il n'y a plus de continuité hydraulique entre le tensiomètre et le sol (figure 10). C'est logiquement le tensiomètre proche de la surface (3,75 cm de la base) qui se désature en premier.

#### 2.4.2. Ajustement des courbes de conductivité hydraulique

Le résultat de la mesure du dispositif HYPROP fournit des données sur la masse et le potentiel matriciel de l'échantillon. Le logiciel associé au dispositif estime la porosité et la densité de l'échantillon. L'ensemble de ces données permet de modéliser les courbes de rétention en eau et de conductivité hydraulique (annexe 5).

Différents modèles sont disponibles pour ajuster les courbes obtenues. Toutes les fonctions de rétention sont exprimées à travers le paramètre  $Se$  (saturation effective) :

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

avec  $\theta$ , la teneur en eau ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),  $\theta_r$ , la teneur en eau résiduelle, et  $\theta_s$ , la teneur en eau à saturation.

Dans ce travail, nous avons modélisé les courbes de rétention avec :

- Le modèle unimodal de Van Genuchten (1980), « contraint » :

$$Se(h) = \left[ \frac{1}{(1 + \alpha|h|)^n} \right]^{1-1/n}$$

avec  $\alpha$  ( $\text{cm}^{-1}$ ), un paramètre du modèle qui est relié à l'inverse de la pression d'entrée d'air ;  $h$ , le potentiel matriciel ;  $n$ , un paramètre qui contrôle à la fois le fléchissement de la courbe de rétention dans la région du point d'entrée d'air et la courbe asymptotique qui tend vers la teneur en eau résiduelle.

- Le modèle unimodal de Van Genuchten (1980), « non contraint » :

$$Se(h) = \left[ \frac{1}{(1 + \alpha|h|)^n} \right]^m$$

avec  $\alpha$  ( $\text{cm}^{-1}$ ), un paramètre du modèle qui est relié à l'inverse de la pression d'entrée d'air ;  $n$ , un paramètre qui contrôle à la fois le fléchissement de la courbe de rétention dans la région du point d'entrée d'air et la courbe asymptotique qui tend vers la teneur en eau résiduelle ;  $m$ , un paramètre de modèle additionnel qui est ajustable par le modèle.

- Le modèle bimodal de Durner (1994) :

$$Se(h) = \sum_{i=1}^2 \omega_i \left[ \frac{1}{(1 + (\alpha_i|h|)^{n_i})} \right]^{1-1/n}$$

Ce modèle est une combinaison de deux fonctions de Van Genuchten (1980), où sont utilisés des pondérateurs  $\omega_1$  et  $\omega_2$  avec  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ . Chacune des sous-fonctions a son propre paramètre  $\alpha$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) et  $n$ .

Les courbes de conductivité ont été modélisées avec les formalismes de :

- Mualem (1976)

$$K_r(S_e(h)) = S_e^\tau \left[ \frac{\int_0^{S_e} h^{-1} dS_e(h)}{\int_0^1 h^{-1} dS_e(h)} \right]^2$$

avec  $\tau$ , paramètre de tortuosité qui est fixé à  $\tau = 0,5$ .

- Peters – Durner (2008)

$$K_r(S_e(h)) = (1 - \omega) S_e^\tau \left[ \frac{\int_0^{S_e} h^{-1} dS_e(h)}{\int_0^1 h^{-1} dS_e(h)} \right]^2 + \omega S_e^\tau$$

avec  $\omega$ , un paramètre additionnel du modèle, et comparé au modèle de Mualem,  $\omega$  est exprimé en tant que facteur de pondération de la contribution de la composante à l'écoulement.

Les courbes de rétention et de conductivité hydraulique modélisées sont valables uniquement dans la gamme des potentiels de l'expérimentation, soit jusque vers  $-800$  hPa.

### 3. Résultats

#### 3.1 Estimation de la conductivité hydraulique à saturation (Ksat)

La conductivité hydraulique à saturation a été mesurée sur 35 échantillons prélevés dans les fosses et sur 8 échantillons prélevés dans l'horizon de surface. Pour certains échantillons, Ksat a été mesuré deux fois afin d'évaluer la répétabilité de la mesure. La totalité des résultats des mesures de Ksat réalisée est disponible en annexe 3. Dans la suite du document, chaque échantillon est identifié par un numéro unique (noté en italique, entre parenthèses).

##### 3.1.1. Répétabilité et répétitivité des mesures

###### 3.1.1.1. *Répétabilité de la mesure de Ksat*

Un des objectifs secondaires de cette étude était d'évaluer le perméamètre. Ainsi, nous avons réalisé sur certains échantillons peu fragiles des répétitions de mesure. Le résultat de ces 2 mesures de Ksat successives est présenté tableau 3.

Pour évaluer la répétabilité de la mesure, nous avons calculé l'indice suivant (I) :

$$I = \log (\text{Ksat} \ll 1^{\text{er}} \text{ passage} \gg / \text{Ksat} \ll 2^{\text{ème}} \text{ passage} \gg) \quad [2]$$

Nous avons fixé un seuil de tolérance à  $| I | = 0,1$ . En deçà de ce seuil, la mesure est considérée comme répétable.

La différence de Ksat entre 2 répétitions de mesure est toujours inférieure à un ordre de grandeur. La différence entre 2 mesures varie de 0.5% à 30%. Quatre échantillons présentent

une différence de Ksat supérieure ou égale à 10% entre les 2 mesures. Pour la moitié des échantillons, il y a moins de 5% de différence de valeur de Ksat entre les deux mesures.

Lors du second passage Ksat est soit plus élevée (dans 60% des cas), soit plus faible (dans 40% des cas). Des valeurs plus élevées sont probablement dues au « débouchage » de la porosité ou à l'entraînement de particules au 1<sup>er</sup> passage. Des valeurs plus faibles au 2<sup>ème</sup> passage peuvent s'expliquer par le gonflement des argiles.

Tableau 3 : comparaison des valeurs de Ksat mesurées sur un même échantillon

Distance du drain (m)	Nom échantillon	N° échantillon	K sat (m/s)		indice I log Ksat1/Ksat2	Test de similarité
			1er passage	2ème passage		
0,6	E&BT / V	(7)	2,5E-05	2,0E-05	0,099	=
0,6	E&BT / Hprp	(11)	3,2E-06	3,1E-06	0,005	=
0,6	BTgd / V	(13)	8,2E-08	8,1E-08	0,003	=
0,6	BTgd / Hpar	(15)	3,1E-07	2,3E-07	<u>0,136</u>	différent
0,6	BTgd / Hpar (2)	(16)	1,4E-05	1,5E-05	-0,023	=
0,6	BTgd / Hprp	(17)	4,5E-07	3,8E-07	0,070	=
3,6	BTgd / Hprp	(24)	9,0E-08	1,5E-07	<u>-0,217</u>	différent
5,8	E&BT / V	(25)	1,0E-05	1,1E-05	-0,021	=
5,8	E&BT / Hpar	(26)	5,8E-08	1,2E-07	<u>-0,304</u>	différent
5,8	BTgd / V	(30)	5,3E-09	5,7E-09	-0,034	=
5,8	BTgd / V (2)	(31)	1,1E-06	8,0E-07	<u>0,138</u>	différent
5,8	BTgd / Hprp	(34)	2,4E-08	2,8E-08	-0,076	=
x	LA / V (2)	(37)	1,9E-04	2,3E-04	-0,086	=
x	LA / V (3)	(38)	1,6E-04	1,6E-04	0,006	=
x	LA / V (5)	(40)	1,3E-05	1,6E-05	-0,091	=
x	LA / V (6)	(41)	9,5E-06	1,1E-05	-0,048	=
x	LA / Hprp	(45)	1,7E-04	4,1E-04	<u>-0,369</u>	différent

On constate que ce dispositif abime très peu les échantillons lors de la mesure, et permet donc une bonne répétabilité de mesure. Par la suite, les valeurs de Ksat présentées pour chaque échantillon correspondent à la moyenne géométrique des deux répétitions de mesure (lorsque deux mesures ont été effectuées).

### 3.1.1.2. Variabilité au point de mesure

Lors de la campagne de terrain, nous avons prélevé deux cylindres dans le même horizon et la même direction, uniquement pour deux fosses. Le tableau 4 permet de comparer les valeurs de Ksat entre répliques.

Tableau 4 : comparaison des valeurs de Ksat entre répliques

Nom échantillon	K sat (m/s)			
	Distance au drain : 0,6 m		Distance au drain : 5,8 m	
E&BT / V	2,5E-05 (7)	6,5E-06 (8)	1,0E-05 (25)	x
E&BT / H par	1,3E-06 (9)	6,3E-08 (10)	5,8E-08 (26)	4,8E-07 (27)
E&BT / H prp	3,2E-06 (11)	6,8E-07 (12)	6,8E-07 (28)	1,4E-07 (29)
BTgd / V	8,2E-08 (13)	2,3E-07 (14)	5,7E-09 (30)	8,0E-07 (31)
BTgd / H par	3,1E-07 (15)	1,4E-05 (16)	7,1E-08 (32)	6,6E-06 (33)
BTgd / H prp	4,5E-07 (17)	2,4E-04 (18)	2,4E-08 (34)	2,5E-08 (35)

Nous avons calculé un indice J (similaire à I), en effectuant le rapport entre 2 répliques pour une même direction :

$$J = |\log(K_{\text{sat}} \text{ échantillon 1} / K_{\text{sat}} \text{ échantillon 2})| \quad [3]$$

La figure 11 met évidence la différence d'ordre de grandeur entre valeurs de Ksat pour une direction donnée, et en fonction de la profondeur de prélèvement.

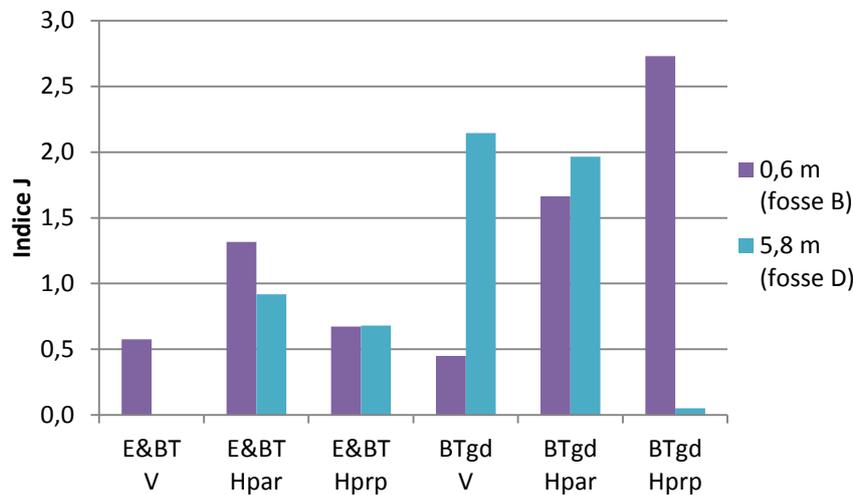


Figure 11 : Différence de valeur de Ksat entre répliques pour la fosse B et la fosse D

La variabilité de Ksat semble plus importante dans l'horizon BTgd, à 65 cm de profondeur, que dans l'horizon E&BT, à 45 cm de profondeur. A 45 cm de profondeur, la différence de Ksat entre deux répliques est inférieure à un ordre de grandeur, dans 4 cas sur 5 ; au contraire à 65 cm, pour la direction verticale et pour la direction horizontale parallèle au drain, la différence de valeur de Ksat entre les répliques est de l'ordre de deux ordres de grandeurs dans 4 cas sur 6.

Ce résultat est à nuancer pour la direction horizontale perpendiculaire au drain car une des mesures a été effectuée sur un échantillon qui comportait une galerie de lombric ce qui a influencé très fortement la valeur de Ksat.

### 3.1.2. Valeurs moyennes de la conductivité hydraulique à saturation pour les 3 horizons étudiés

#### 3.1.2.1. *Horizon LA (horizon de surface labouré)*

Pour l'horizon de surface labouré (LA), Ksat varie entre 1,0E-05 m/s et 2,1E-4 m/s selon la direction verticale. La valeur moyenne de Ksat selon l'axe vertical est de 5,4E-5 m/s.

La valeur de Ksat semble peu varier spatialement. Ces faibles variations de Ksat sont probablement dues au travail du sol. Dans l'horizon de surface, il y a moins d'impact du drainage et une homogénéisation de cet horizon par le travail du sol (Montagne, 2006).

La valeur de Ksat Hprp est de 2,7E-04 m/s ce qui est proche de la valeur moyenne selon l'axe vertical, mais la valeur de Ksat Hpar mesurée est de 8,2E-09 m/s, ce qui est très faible (tableau 5 et figure 12).

Tableau 5 : valeurs de Ksat mesurées dans l'horizon LA

nom de l'échantillon	K sat (20°C) (m/s)
LA V (36)	1,8E-04
LA V (37)	2,1E-04
LA V (38)	1,6E-04
LA V (39)	5,7E-05
LA V (40)	1,4E-05
LA V (41)	1,0E-05
LA Hpar (44)	8,2E-09
LA Hprp (45)	2,7E-04

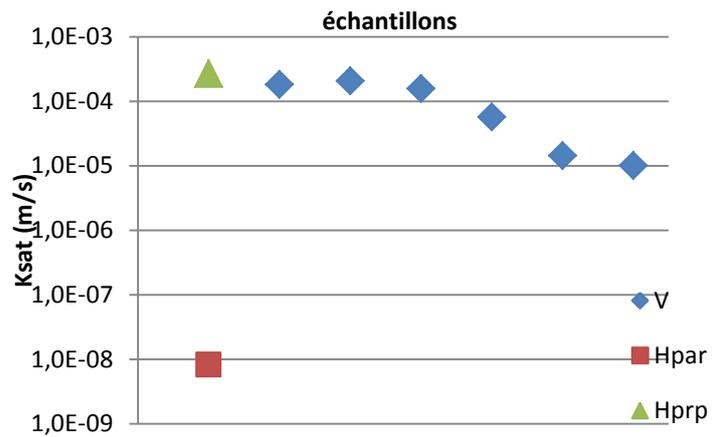


Figure 12 : représentation des valeurs de Ksat mesurées dans l'horizon LA

Etant donné la forte masse volumique de l'échantillon prélevé selon la direction horizontale parallèle, cet échantillon a été prélevé dans une zone dense (motte delta, zone compactée...). La densité apparente de cet échantillon est de 1,56 g/cm<sup>3</sup> (annexe 4). Sa conductivité hydraulique à saturation est très faible et il représente donc un outlier dont il convient de ne pas tenir compte.

### 3.1.2.2. Horizon E&BT et horizon BTgd

Le tableau 6 montre les valeurs de Ksat mesurées suivant les directions de prélèvement dans les horizons E&BT (à 45cm de profondeur) et BTgd (à 65 cm de profondeur). Les valeurs de Ksat observées varient selon l'horizon et selon la direction de prélèvement.

A 45 cm de profondeur, les valeurs de Ksat sont comprises entre 4.7E-05 m/s et 4.1E-08 m/s (entre 400 cm/j et 0.4 cm/j). A 65 cm de profondeur, Ksat varie de 2.4E-04 m/s à 5.5E-09 m/s. (La valeur de 2.4E-04 m/s a été mesurée dans un échantillon qui comportait deux galeries).

Tableau 6 : Valeurs de Ksat mesurées dans les deux horizons et suivant la direction de prélèvement

Distance du drain (m)	Ksat (m/s)					
	E&BT V	E&BT Hpar	E&BT Hprp	BTgd V	BTgd Hpar	BTgd Hprp
0	1,7E-05	<u>4,7E-05</u>	1,4E-07	3,4E-05	7,1E-06	2,2E-08
0,6	2,1E-05	1,3E-06	3,2E-06	8,1E-08	2,7E-07	4,1E-07
0,6	6,5E-06	6,3E-08	6,8E-07	2,3E-07	1,5E-05	<u>2,4E-04</u>
3,6	1,3E-05	4,6E-06	<u>4,1E-08</u>	1,9E-07	1,7E-08	1,2E-07
5,8	1,0E-05	8,2E-08	6,8E-07	<u>5,5E-09</u>	7,1E-08	2,6E-08
5,8	x	4,8E-07	1,4E-07	8,0E-07	6,6E-06	2,5E-08
horizon E&BT : Ksat = 1,4 E-06 m/s				horizon BTgd : Ksat = 3,2 E-07 m/s		

Ainsi, en négligeant les valeurs extrêmes ou aberrantes (soulignées dans le tableau 6), la valeur moyenne de Ksat est de 1.4<sup>E</sup>-06 m/s à 45 cm de profondeur, alors que la valeur moyenne de Ksat est de 3.2<sup>E</sup>-07 m/s à 65 cm de profondeur. Sans tenir compte des directions de prélèvement, il y a quasiment un ordre de grandeur de différence entre la valeur moyenne de Ksat mesurée à 45 cm et celle mesurée à 65 cm de profondeur.

### 3.1.3. Comparaison des valeurs de Ksat

#### 3.1.3.1. Comparaison des valeurs pour les échantillons prélevés de façon verticale et horizontale

Le tableau 7 présente les principaux indicateurs utilisés en statistiques descriptives (moyenne géométrique, minimum, maximum, etc) afin d'étudier la distribution des valeurs de Ksat mesurées en fonction des directions de prélèvement et de l'horizon.

**Tableau 7 : Statistiques descriptives des valeurs de Ksat suivant la direction et l'horizon**

Ksat (m/s)	E&BT V	E&BT Hpar	E&BT Hprp	BTgd V	BTgd Hpar	BTgd Hprp
<b>Maximum</b>	2,1E-05	4,7E-05	3,2E-06	3,4E-05	1,5E-05	2,4E-04
<b>Minimum</b>	6,5E-06	6,3E-08	4,1E-08	5,5E-09	1,7E-08	2,2E-08
<b>Moyenne Géométrique</b>	1,2E-05	9,4E-07	3,3E-07	2,8E-07	7,8E-07	2,3E-07
<b>Moy. Géométrique sans extrême</b>	<b>1,3E-05</b>	<b>7,0E-07</b>	<b>3,1E-07</b>	<b>2,3E-07</b>	<b>9,7E-07</b>	<b>7,4E-08</b>

Pour visualiser les différences entre les valeurs de Ksat horizontales et verticale, nous avons calculé l'indice L (figure 13).

$$L = \log (Ksat V / Ksat H) \quad [4]$$

avec Ksat V, Ksat Hpar et Ksat Hprp, les valeurs extraites du tableau 5. Pour la fosse B (0,6 m du drain) et la fosse D (5,8 m du drain) nous avons fait la moyenne géométrique afin d'obtenir une seule valeur de Ksat par direction.

Les valeurs de Ksat vertical (Ksat V) sont supérieures aux valeurs de Ksat dans les deux directions horizontales (Ksat H) quelle que soit la distance au drain (sauf à 65 cm pour la fosse B) (tableaux 6, 7 et annexe 3).

Dans l'horizon E&BT, Ksat V est supérieure à Ksat Hpar et Ksat Hprp de deux ordres de grandeur en moyenne (tableau 7).

Dans l'horizon BTgd, les valeurs de Ksat dans les trois directions sont plus proches. On notera que Ksat Hpar est supérieure à Ksat V.

Dans l'horizon E&BT, Ksat V est supérieure à Ksat Hpar et Ksat Hprp avec au minimum un ordre de grandeur de différence sauf pour la fosse C située à 3,60 m du drain, où la différence entre Ksat V et Ksat H est faible. Au-dessus du drain, Ksat V est supérieure de 2 ordres de grandeur à Ksat H (tableau 7).

Dans l'horizon BTgd, les différences entre Ksat V et Ksat H sont faibles, on n'observe pas de tendance visible suivant la distance du drain (figure 13). La valeur de Ksat V est supérieure à Ksat H au-dessus du drain, ainsi qu'à 3,6 m et 5,8 m. A 0,6 m du drain, Ksat V est inférieure à Ksat H mais la différence entre les deux valeurs est faible (figure 13).

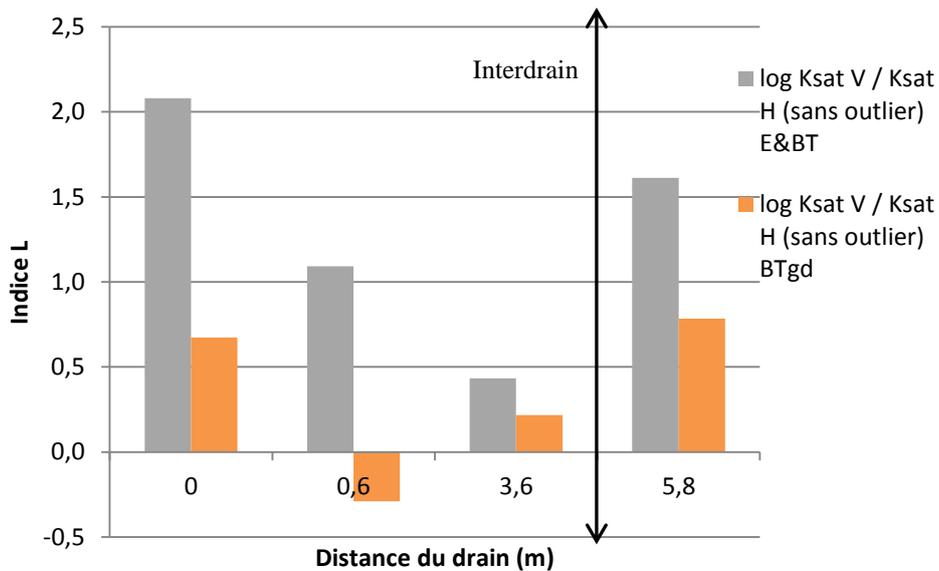


Figure 13 : évolution du rapport Ksat vertical / horizontal suivant la distance du drain

### 3.1.3.2. Comparaison des valeurs de Ksat dans les deux directions horizontales

Pour les deux horizons étudiés, la valeur de Ksat Hpar est supérieure à celle de Ksat Hprp au dessus du drain, alors que les deux valeurs sont proches à 0,6 m du drain (figure 14).

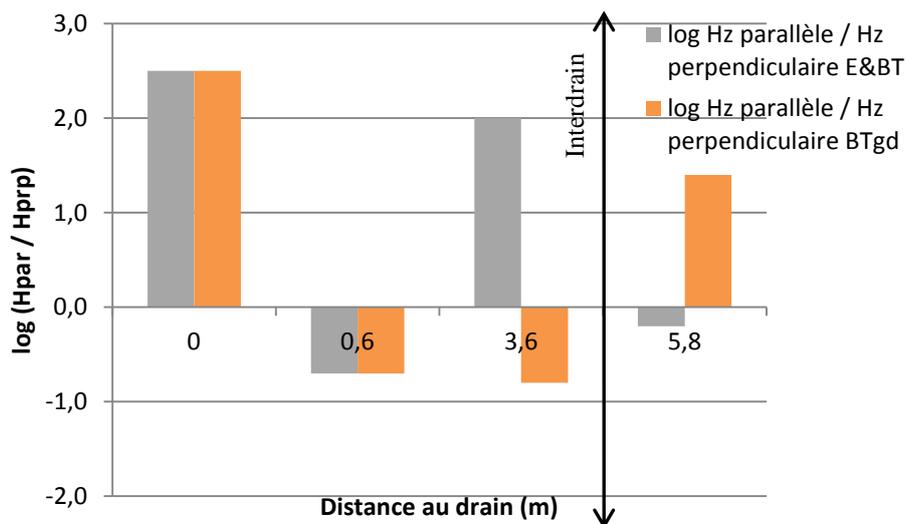


Figure 14 : Comparaison Ksat Horizontale parallèle / Horizontale perpendiculaire

A 3,6 m et 5,8 m, de chaque côté de l'interdrain, l'anisotropie ne suit pas de tendance visible. Par exemple, dans l'horizon E&BT (à 45 cm de profondeur), Ksat Hpar est supérieure à celle de Ksat Hprp à 3,6 m mais elle est inférieure à 5,8 m.

### 3.1.4. Variabilité spatiale de la conductivité hydraulique à saturation

#### 3.1.4.1. Evolution spatiale de Ksat verticale

La figure 15 présente l'évolution spatiale de la valeur de Ksat par rapport au drain. On note que la valeur de Ksat est constante dans l'horizon LA, celui-ci étant homogénéisé par le travail du sol.

Pour les horizons E&BT et BTgd, les valeurs de  $K_{sat}$  ont tendance à diminuer lorsqu'on s'éloigne du drain. Dans l'horizon BTgd, la valeur de  $K_{sat}$  V à 60 cm du drain est beaucoup plus faible qu'au-dessus du drain (figure 15).

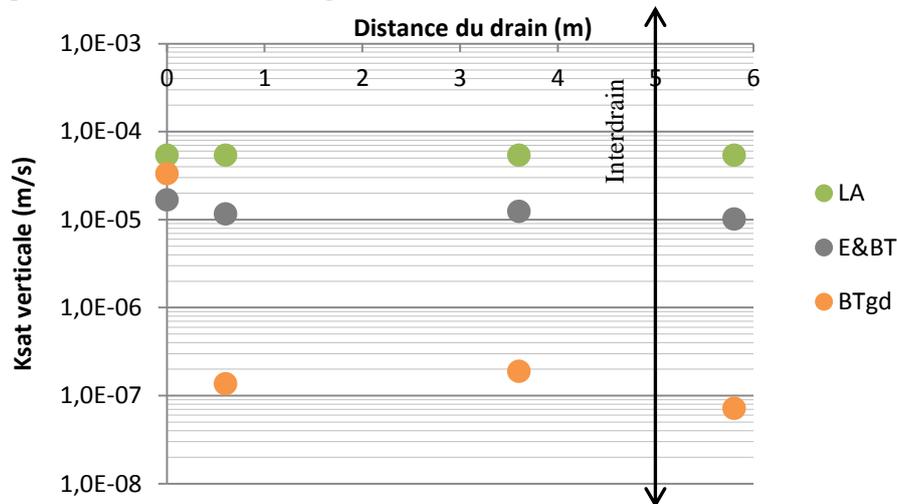


Figure 15 : évolution spatiale de  $K_{sat}$  V

### 3.1.4.2. Evolution spatiale de $K_{sat}$ horizontale

De façon générale, la valeur de  $K_{sat}$  H diminue lorsqu'on s'éloigne du drain, même si cette tendance est modérée.

Dans l'horizon E&BT,  $K_{sat}$  Hpar a tendance à diminuer lorsqu'on s'éloigne du drain même si la valeur de  $K_{sat}$  Hpar de la fosse C contredit cette tendance (figure 16).  $K_{sat}$  Hprp semble peu varier quelle que soit la distance au drain. Dans l'horizon BTgd,  $K_{sat}$  Hpar et  $K_{sat}$  Hprp diminuent lorsqu'on s'éloigne du drain.

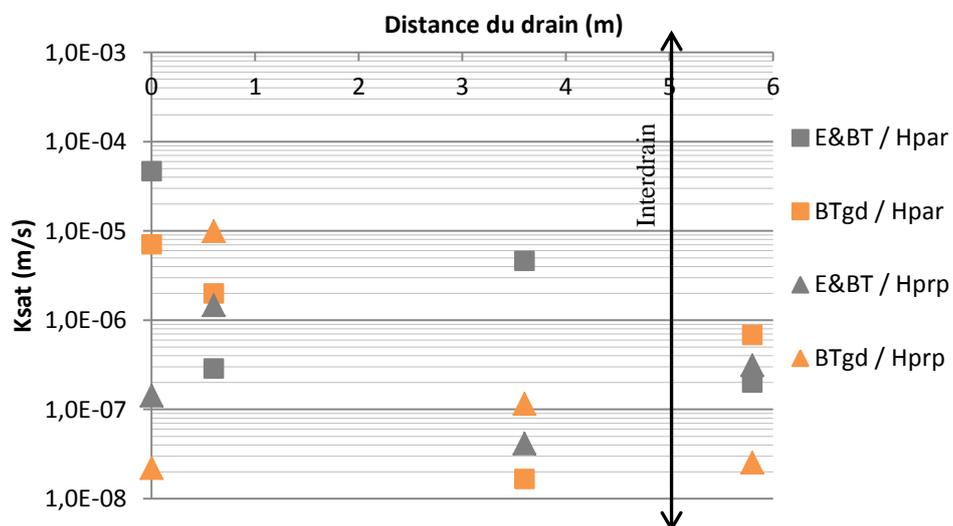


Figure 16 : évolution spatiale de  $K_{sat}$  Hpar et  $K_{sat}$  Hprp

### 3.1.4.3. Synthèse

La figure 17 représente la moyenne harmonique de  $K_{sat}$  pour les horizons E&BT et BTgd. Nous que  $K_{sat}$  V et  $K_{sat}$  Hpar diminuent lorsqu'on s'éloigne du drain.

Si l'on excepte la valeur de  $K_{sat}$  Hprp à 0,6 m du drain, on observe une diminution significative de  $K_{sat}$  dans les 3 directions de prélèvement lorsqu'on s'éloigne du drain.

(Les échantillons prélevés à 0,6 m du drain, selon la direction Hprp, ont des densités apparentes respectivement de  $1,63 \text{ g/cm}^3$  et  $1,67 \text{ g/cm}^3$  (annexe 4). Ces valeurs sont élevées et laissent supposer que les cylindres ont été prélevés à un endroit où le sol a été compacté lors de la mise en place du drain en 1973. On peut légitimement penser que la valeur de  $K_{\text{sat}}$  de ces échantillons a été sous-estimée et l'on s'autorise donc à les négliger ici).

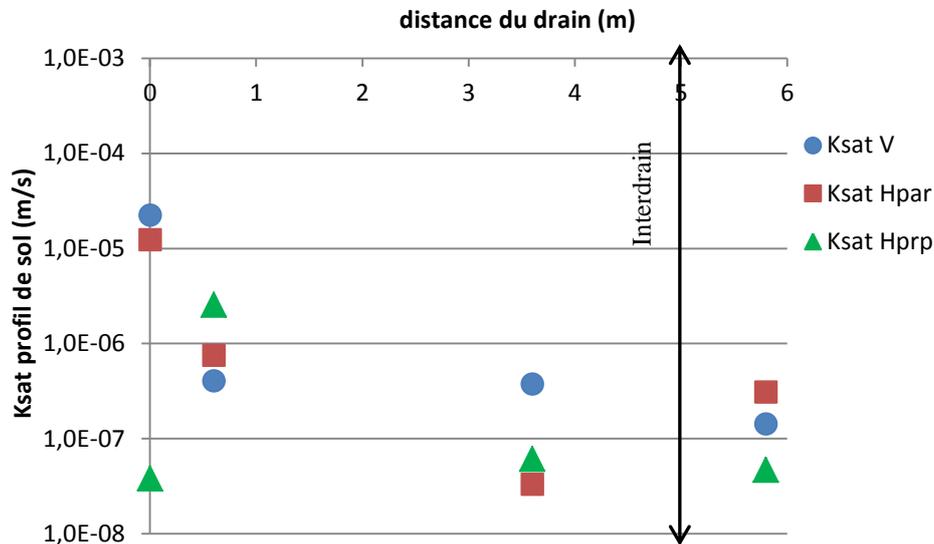


Figure 17 : évolution spatiale de  $K_{\text{sat}}$  par profil de sol (moyenne harmonique de  $K_{\text{sat}}$ )

## 3.2 Détermination des courbes de conductivité hydraulique $K(h)$ et $K(\theta)$

### 3.2.1. Données expérimentales

Les mesures de rétention en eau et de conductivité hydraulique en régime insaturé ont uniquement été effectuées sur les échantillons prélevés dans l'horizon E&BT, à 45 cm de profondeur (voir annexe 3). En effet, la durée d'une expérimentation avec le dispositif HYPROP dure entre 4 et 6 jours, et il n'était pas possible de faire cette mesure sur tous les cylindres de sol pendant la durée du stage.

Les mesures ont été réalisées par le dispositif HYPROP, et les données expérimentales ont été modélisées par le logiciel HYPROP-Fit, dans la gamme des potentiels de ces données expérimentales, soit entre pF 1 (- 10 hPa) et pF 3 (-1000 hPa ou - 1 bar). Les portions de courbes modélisées pour des potentiels supérieurs à pF 3 sont incertaines puisqu'il n'y a pas de mesures au-delà de ce potentiel, et ne seront donc pas analysées ici.

Pour chaque série expérimentale, plusieurs types d'ajustement par modélisation ont été tentés. La figure 18 présente un exemple d'ajustement de modèle sur des données expérimentales. Le tableau 8 présente les ajustements optimaux pour chaque échantillon, avec les valeurs des paramètres du modèle et l'estimation de la qualité de modélisation par l'erreur quadratique moyenne (RMSE).

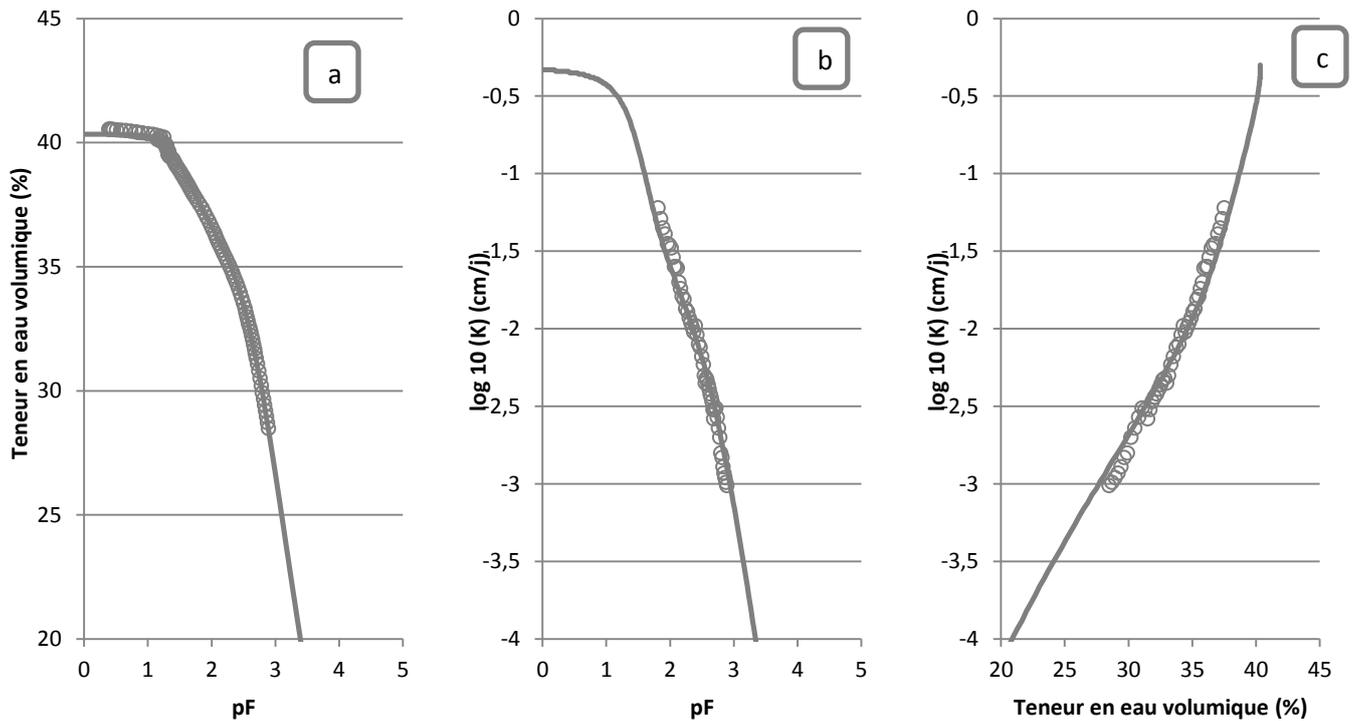


Figure 18 : Exemples d'ajustement (trait plein) des courbes de rétention en eau et de conductivité hydraulique sur des données expérimentales (figurés). -a- Courbe de rétention en eau ; -b- et -c- Courbe de conductivité hydraulique.

Tableau 8 : Paramètres d'ajustement des modèles de courbes de rétention en eau et de conductivité hydraulique à partir de données expérimentales obtenues avec le dispositif HYPROP.

Position (m)	Orientation (n° échantillon)	méthodes d'ajustement	Porosité	$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	$n_1$	$\alpha_2$	$n_2$	$\omega_2$	Ks modélisé (cm/j)	Ksat mesuré (cm/j)	RMSE Rétention	RMSE log k
0	V (20)	Durner / Mualem	0,42	0,42	0	0,079	1,55	0,001	1,76	0,806	3,5	147,0	0,0009	0,0449
0	Hpar (2)	Durner / Mualem	0,44	0,43	0	0,007	1,58	0,001	2,13	0,764	2,8	406,0	0,0022	0,0907
0	Hprp (3)	Durner /Peters-Durner	0,38	0,40	0	0,077	4,47	0,006	1,10	0,973	1,2	1,2	0,0007	0,0421
0,6	V (8)	Durner /Peters-Durner	0,39	0,40	0	0,085	1,09	0,0014	1,40	0,404	56,0	56,0	0,0014	0,0706
0,6	Hpar (10)	Durner / Mualem	0,41	0,40	0	0,027	2,78	0,002	1,40	0,914	0,5	0,5	0,0016	0,0741
0,6	Hprp (12)	Durner / Mualem	0,42	0,44	0	0,001	1,74	0,051	1,23	0,311	5,9	5,9	0,0025	0,1614
3,6	V (19)	Durner /Peters-Durner	0,40	0,42	0	0,002	2,46	0,056	1,11	0,835	108,0	112,0	0,0018	0,0979
3,6	Hpar (20)	Durner / Mualem	0,40	0,42	0,24	0,039	1,32	0,002	3,53	0,329	39,9	39,7	0,0015	0,132
3,6	Hprp (21)	Durner / Mualem	0,40	0,43	0	0,042	1,18	0,001	1,54	0,693	6,038	0,3	0,0027	0,1111
5,8	V (28)	Durner /Peters-Durner	0,40	0,43	0	0,021	1,11	0,002	1,35	0,464	8,2	86,4	0,0019	0,1111
5,8	Hpar (27)	Durner / Mualem	0,42	0,42	0	0,511	1,43	0,0007	1,67	0,787	2,0	4,2	0,0016	0,0998
5,8	Hprp (29)	Durner / Mualem	0,39	0,39	0,27	0,022	1,86	0,004	2,24	0,578	1,2	1,2	0,0023	0,1387

### 3.2.2. Courbes de rétention

#### 3.2.2.1. Ajustement des données expérimentales par modélisation

Quel que soit l'échantillon analysé, le meilleur ajustement de la courbe de rétention est réalisé avec un modèle de Durner à double porosité (Tableau 8). Dans quelques cas, on constate que le paramètre  $\theta_s$  peut être supérieur à la porosité totale de l'échantillon : cette anomalie est liée au fait que l'on n'utilise pas toujours toutes les données expérimentales pour réaliser

l'ajustement ; les toutes premières données de l'expérience, lorsque l'échantillon est le plus proche de la saturation, sont parfois écartées car légèrement bruitées.

Excepté dans deux situations (échantillon Hpar à 3.6 m et échantillon Hprp à 5.8m), les meilleurs ajustements sont réalisés lorsque le paramètre  $\theta_r$  est égal à 0. Ces deux situations particulières ne sont pas expliquées simplement, et nécessiteraient une analyse granulométrique de ces échantillons.

### 3.2.2.2. Comparaison des courbes de rétention en fonction de la direction de prélèvement

La courbe de rétention en eau, qui représente la quantité d'eau que le sol peut retenir à un potentiel hydrique donné, est fonction de la distribution de la taille des pores dans l'échantillon. Elle n'est théoriquement pas liée à la direction de prélèvement et l'on s'attend ainsi à ce que les courbes de rétention pour les trois directions soient identiques.

On observe effectivement que, pour les trois positions à 0.6m, 3.6m et 5.8m, les courbes sont quasi parallèles entre la saturation et pF 3 (figure 19).

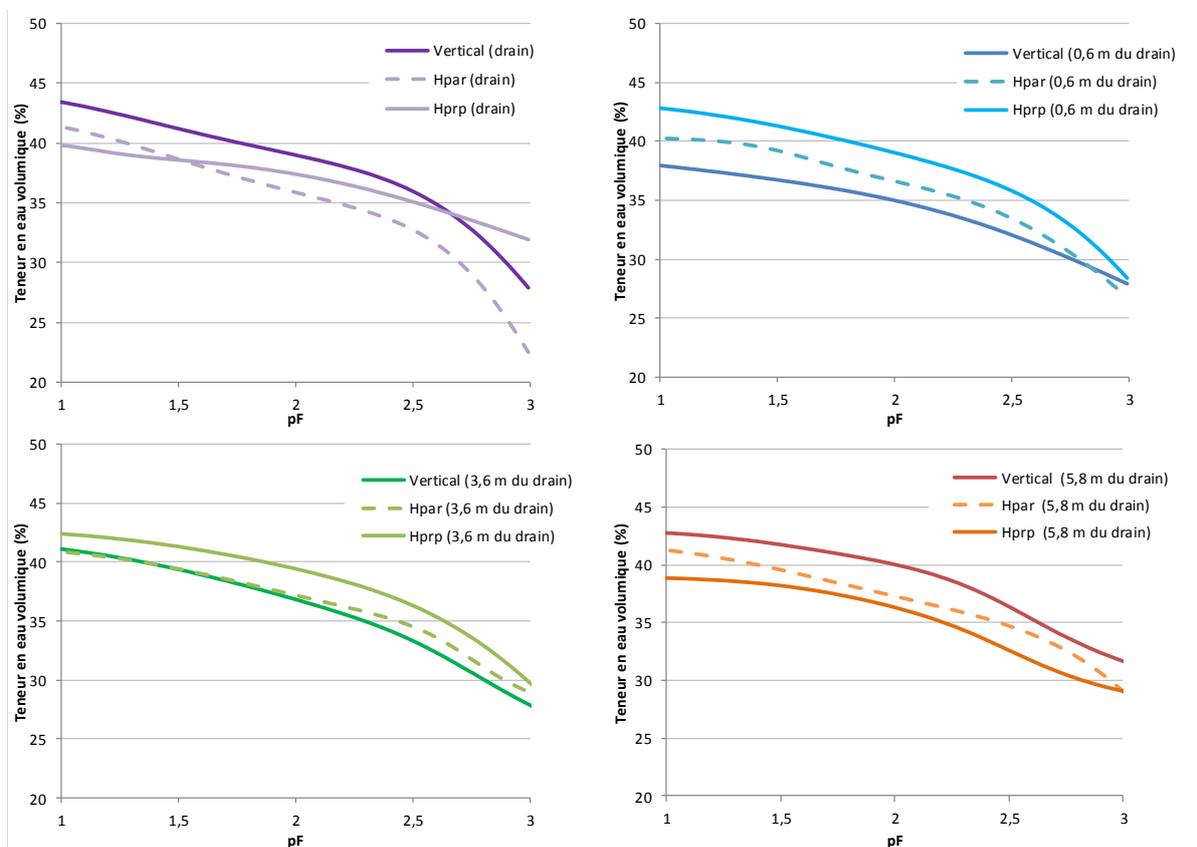


Figure 19 : Comparaison des courbes de rétention en eau (modèles) en fonction de la direction de prélèvement

Les écarts entre les courbes sont liés à une différence entre les paramètres  $\theta_r$ . Pour la position au droit du drain, la courbe de rétention pour la direction Hprp se distingue des deux autres, mais nous ne disposons pas d'élément explicatif pour commenter ce comportement atypique.

### 3.2.2.3. Evolution spatiale des courbes de rétention en fonction de la distance au drain

On observe que, pour la direction horizontale parallèle au drain, les courbes de rétention sont très proches les unes des autres, et ne présentent pas de différence en fonction de la distance au drain (figure 20). Pour les directions verticale et horizontale perpendiculaire au drain, les courbes de rétention varient d'un échantillon à l'autre. Cependant, aucune tendance en fonction de la distance au drain n'est observée ; on constate en effet que les positions au droit du drain et à 5,8 m du drain présentent des courbes proches, qui se démarquent des courbes pour les positions à 0,6 m et 3,6 m.

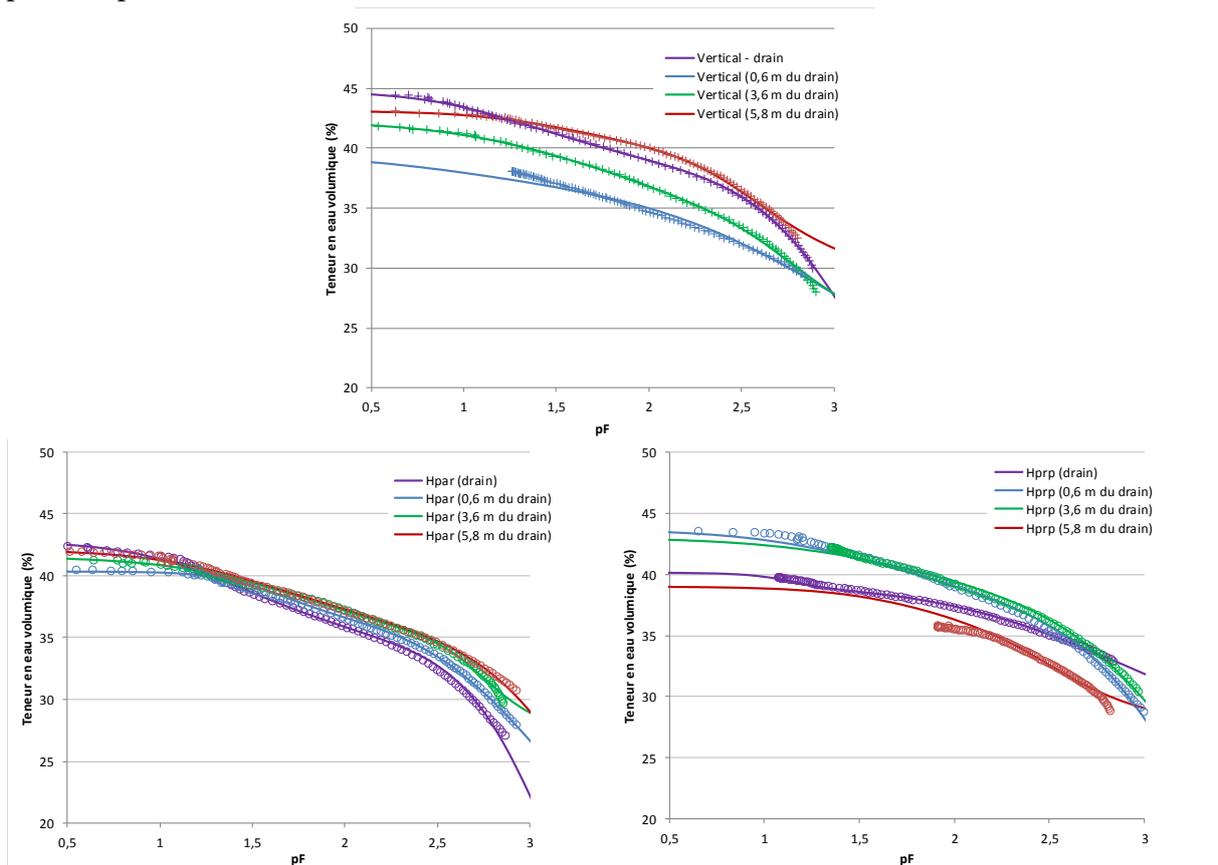


Figure 20 : Courbes de rétention en eau des échantillons prélevés à 45 cm de profondeur. (Les points correspondent aux données mesurées par le dispositif Hyprop et les courbes correspondent aux ajustements modélisés.)

### 3.2.3. Courbes de conductivité hydraulique

#### 3.2.3.1. Ajustement des données expérimentales par modélisation

Les modèles d'ajustement optimaux ne sont pas les mêmes en fonction de la distance au drain (Tableau 8) : pour la position au droit du drain, les données de conductivité pour l'échantillon prélevé selon la direction verticale et la direction horizontale parallèle sont ajustées au mieux par un modèle de Mualem, tandis que les données de conductivité mesurées pour les échantillons prélevés selon la direction horizontale perpendiculaire sont ajustées au mieux par un modèle de Peters-Durner. Pour les trois autres positions, le meilleur ajustement est un modèle de Peters-Durner pour les échantillons prélevés selon l'axe vertical, un ajustement par un modèle de Mualem pour les échantillons prélevés selon l'axe horizontal.

Pour réaliser l'ajustement, on peut choisir, ou pas, de fixer la valeur du paramètre  $K_s$  à la valeur de  $K_{sat}$  mesurée. Nous avons testé les deux options, en essayant, dans la mesure du possible, d'obtenir des valeurs du paramètre  $K_s$  proche de la valeur de  $K_{sat}$  mesurée. On constate que, pour les valeurs élevées de  $K_{sat}$  (supérieures à 80 cm/j, c'est-à-dire supérieures à  $1E-05$  m/s), les meilleurs ajustements sont réalisés pour des valeurs de  $K_s$  très éloignées de cette valeur de  $K_{sat}$  mesurée (valeurs en bleu dans le tableau 8). La raison de cet écart entre  $K_{sat}$  mesurée et  $K_s$  estimée n'est pas élucidée pour le moment et nécessitera une analyse fine du protocole d'ajustement. Enfin, on notera que les ajustements sont corrects (figure 22), sauf pour l'échantillon prélevé à 5,8 m du drain dans la direction horizontale perpendiculaire (voir la valeur RMSE log K dans le tableau 8 et la figure 22), où les données sont peu nombreuses proches de la saturation.

### 3.2.3.2. Comparaison des courbes de conductivité en fonction de la direction de prélèvement

On analyse ici l'évolution de la conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau (figure 21).

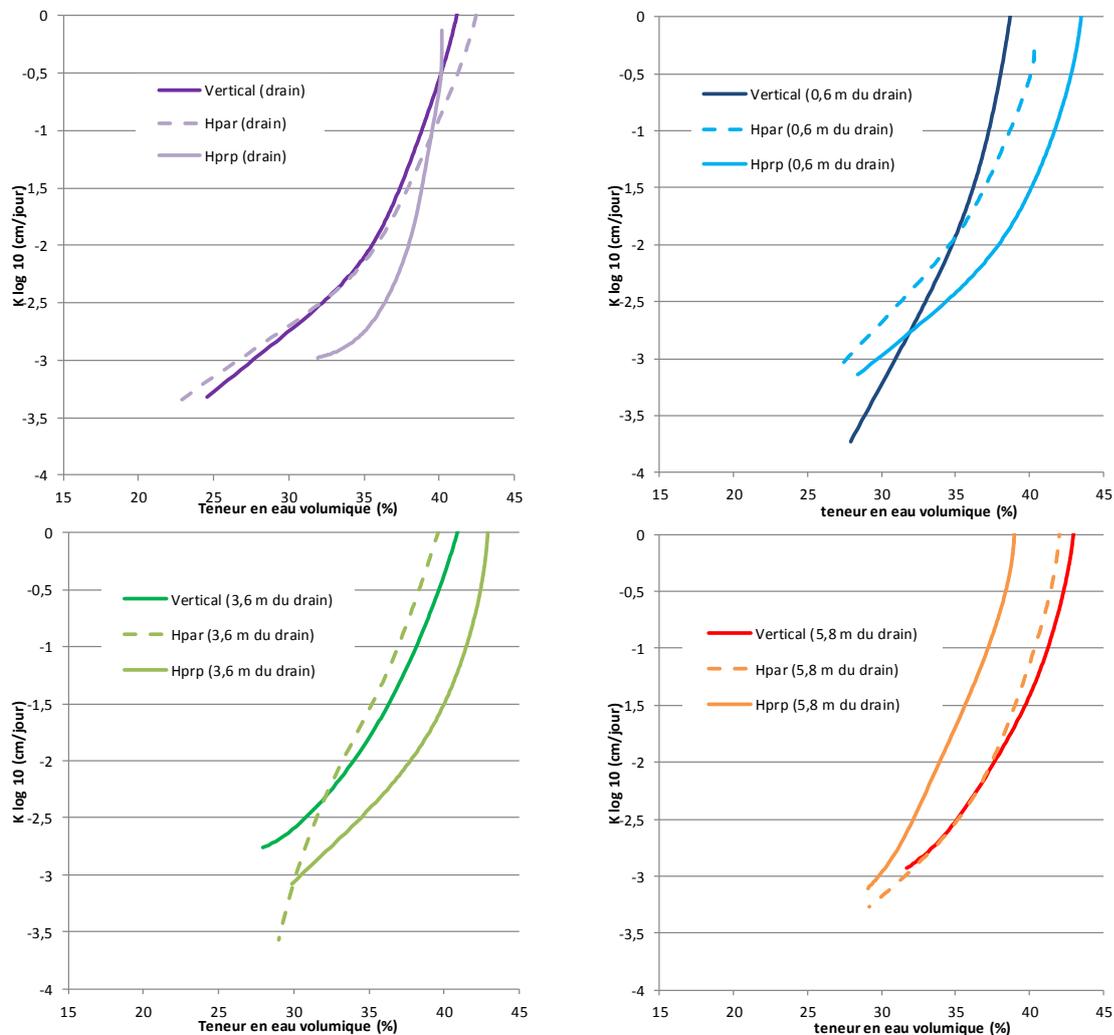


Figure 21 : comparaison des courbes  $K(\theta)$  en fonction de la direction de prélèvement

Excepté pour la distance à 0,6 m du drain, on observe que la courbe de conductivité pour les échantillons prélevés dans la direction verticale et dans la direction horizontale parallèle sont

proches, et se distinguent de la courbe pour les échantillons prélevés dans la direction horizontale perpendiculaire. A une teneur en eau donnée, la conductivité est significativement plus faible dans la direction horizontale perpendiculaire (sauf pour la distance à 5,8 m du drain).

### 3.2.3.3. Evolution spatiale des courbes de rétention en fonction de la distance au drain

Suivant l'axe vertical, nous observons que les courbes de conductivité hydraulique des échantillons prélevés sur le drain ou à proximité (0.6 m) sont proches d'une part, et que les courbes des échantillons prélevés à une distance plus éloignées du drain (3.6 m et 5.8 m) sont proches d'autre part.

Pour la direction horizontale parallèle, la conductivité est d'autant plus élevée, à un potentiel donné, que l'on s'éloigne du drain (sauf pour la courbe de l'échantillon prélevé à 5.8 m, qui est proche de celle de l'échantillon prélevé au dessus du drain).

Pour la direction horizontale perpendiculaire, les courbes de conductivité sont différentes mais on n'identifie pas d'organisation en fonction de la distance au drain.

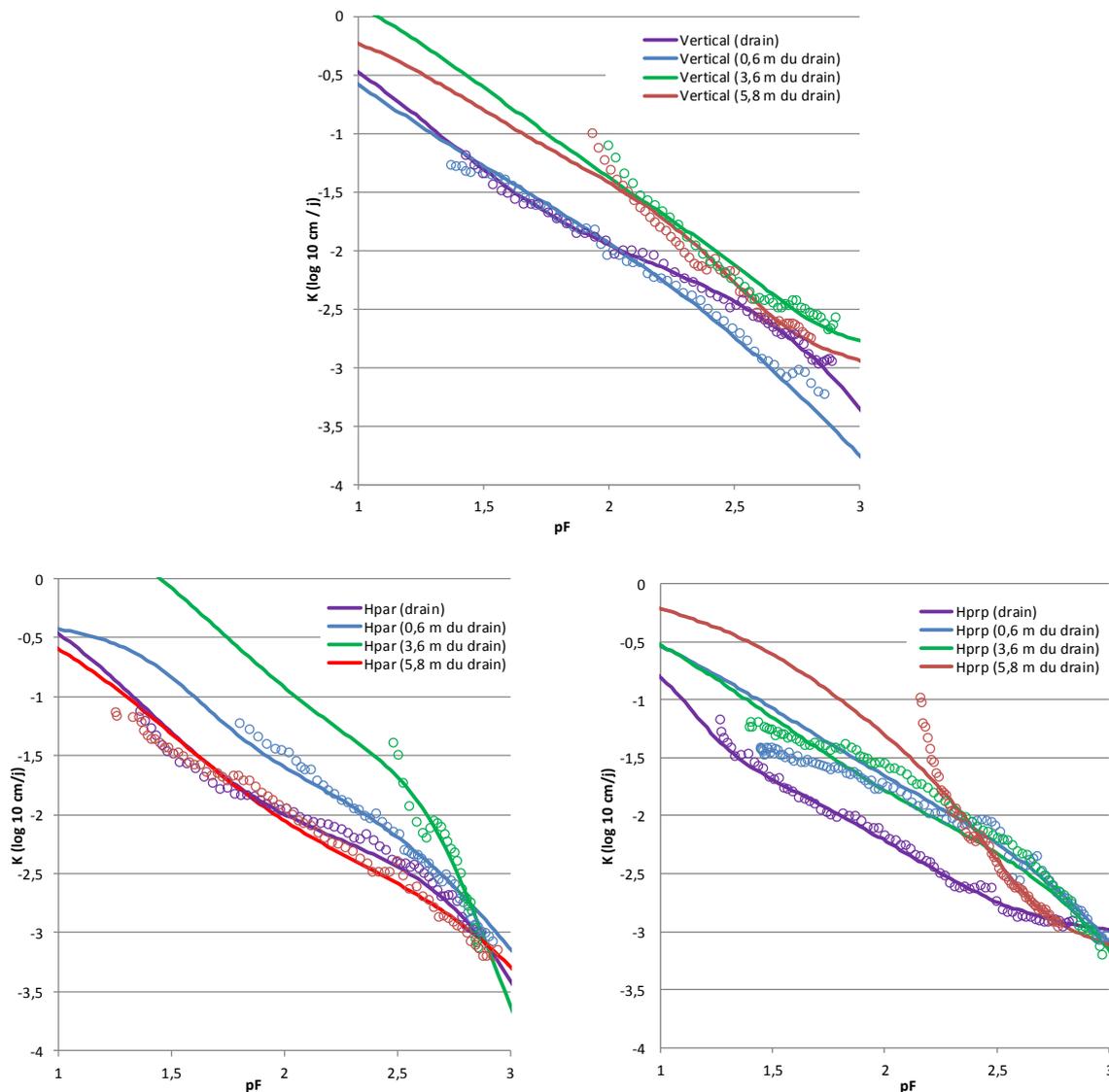


Figure 22 : courbes  $K(pF)$  – comparaison entre données mesurées et courbes modélisés

## 4. Discussion

### 4.1. **Eléments méthodologiques**

#### 4.1.1. Ergonomie des dispositifs mis en œuvre

Dans ce travail, nous avons testé deux nouveaux dispositifs acquis récemment par l'UR SOLS : le dispositif UMS de mesure de la conductivité hydraulique en régime saturé, et le dispositif HYPROP de mesure de la courbe de rétention et de la conductivité hydraulique en régime insaturé. Ils se distinguent des dispositifs utilisés auparavant au laboratoire (perméamètre à charge constante pour la mesure de  $K_{sat}$  et méthode évaporatoire de Wind pour la mesure de la courbe de rétention en eau et de la conductivité hydraulique en régime insaturé) par les deux points suivants :

- le niveau d'automatisation des dispositifs
- les logiciels de traitement des données

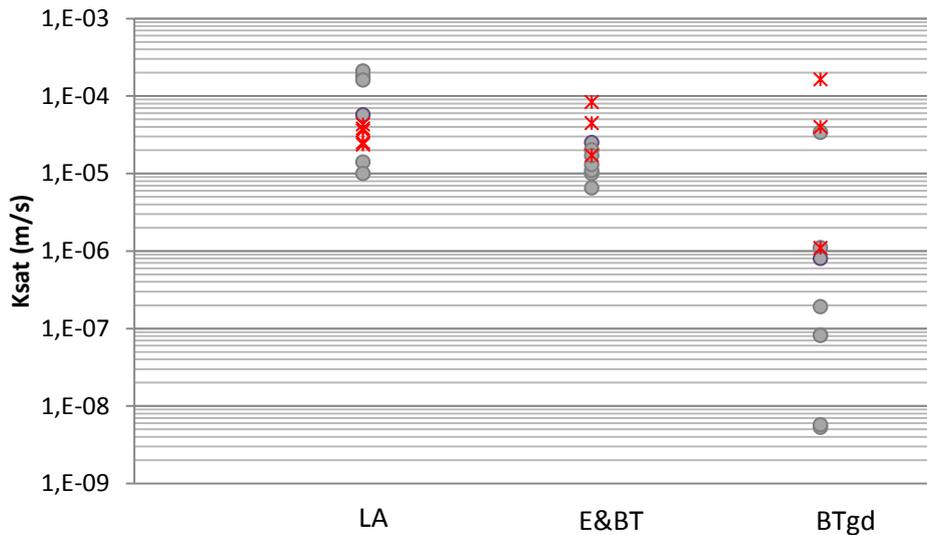
A l'usage, il s'avère que ces deux dispositifs sont plus simples à mettre en œuvre expérimentalement que les dispositifs déjà présents. De même, la prise en main des logiciels associés pour le traitement des données est aisée et rapide ; une bonne connaissance, de la part de l'utilisateur, des conditions dans lesquelles un modèle de conductivité peut être ou non appliqué sur des données expérimentales, permet un ajustement efficace et rapide des données. Enfin, la durée des expérimentations est plus courte qu'avec les dispositifs classiques, ce qui permet de traiter un plus grand nombre d'échantillons.

#### 4.1.2. Taille des échantillons analysés

Les échantillons analysés par les dispositifs présentés dans ce mémoire ont été prélevés dans des cylindres de 8 cm de diamètre et 5 cm de hauteur, alors que les mesures réalisées par le perméamètre à charge constante et le dispositif évaporatoire de Wind s'appuient sur des cylindres de 15 cm de diamètre et 7,5 cm de hauteur. Il était à craindre que ces volumes de prélèvement soient trop petits pour constituer des volumes élémentaires représentatifs des horizons étudiés. Cependant, la confrontation des données de conductivité hydraulique à saturation mesurées ici avec des données anciennes mesurées sur une parcelle proche, montre que les ordres de grandeur et la variabilité des mesures sont identiques dans les horizons LA et E&BT pour les deux dispositifs (figure 23). En revanche, la variabilité est plus importante pour les mesures réalisées dans l'horizon BTgd, avec, en particulier, des valeurs de conductivité plus faibles, en lien avec des masses volumiques apparentes élevées. Ces valeurs plus basses de conductivité sont probablement à mettre en relation avec le protocole d'échantillonnage, qui n'est pas réellement aléatoire sur le terrain : en effet, l'opérateur-préleveur écarte systématiquement les zones présentant des conduits de grande taille lorsqu'il les voit, et la probabilité que des conduits de grande taille soient présents dans des cylindres de petite taille est donc plus faible.

Pour les horizons LA et E&BT, on peut donc envisager d'évaluer la conductivité hydraulique à saturation de ces horizons en réalisant des mesures sur un grand nombre d'échantillons avec

le dispositif UMS, et en calculant ensuite la moyenne arithmétique de ces mesures, conformément aux préconisations de Samouëlian et al. (2011).



**Figure 23 : Comparaison des données mesurées dans ce mémoire par le dispositif UMS (ronds gris), avec des mesures réalisées au perméamètre à charge constante sur des cylindres de 15 cm de diamètre et 7 cm de hauteur (Giot, 2014, communication personnelle). (on a représenté ici uniquement des mesures sur des cylindres prélevés dans la direction verticale).**

Une comparaison équivalente entre le dispositif HYPROP et le dispositif évaporatoire de Wind n'a pas été possible ici car nous ne disposons pas de données expérimentales comparables.

#### 4.1.3. Evaluation du dispositif HYPROP pour la rétention en eau

Nous avons précisé, dans la partie résultats, que la courbe de rétention en eau ne devrait théoriquement pas dépendre de l'orientation du prélèvement, et cette affirmation a été contredite par nos données expérimentales (figure 19). Pour discuter ce point, nous avons comparé nos données avec des points de rétention en eau déterminés sur des échantillons prélevés dans une parcelle proche sur le même type de sol, par la méthode de la presse à membrane de Richards. La figure 24 présente cette comparaison pour les échantillons prélevés à 5,8 m du drain, mais les résultats sont comparables pour les autres distances au drain.

On constate que les valeurs de teneurs en eau mesurées à la presse à membrane sont systématiquement inférieures aux valeurs mesurées par le dispositif HYPROP (pour tous les potentiels, sauf pF 2,25 et pF 2,5, pour lesquels les valeurs sont égales aux valeurs minimales mesurées par HYPROP). Ce résultat s'explique, d'une part, par la taille des échantillons : les mottes employées lors des mesures à la presse à membrane font quelques cm<sup>3</sup>, et l'on suréchantillonne artificiellement les zones les plus denses. D'autre part, les mesures de teneur en eau à la presse à membrane sont réalisées à l'équilibre hydrodynamique, soit lorsque toute l'eau qui doit s'échapper de l'échantillon à un potentiel donné est effectivement partie. Au contraire, la mesure par HYPROP s'effectue en période de dessiccation, soit hors de l'équilibre hydrodynamique : la teneur en eau à un potentiel donné est donc plus élevée. Ces observations sont cohérentes avec celles obtenues par Naasz (2005) sur des supports de cultures (tourbe et écorce).

Les courbes obtenues par les deux dispositifs sont donc différentes mais complémentaires. Leur utilisation dans le cadre d'une modélisation des transferts eau-sol-plante-atmosphère, permettrait d'évaluer les contextes dans lesquels un protocole expérimental est plus approprié qu'un autre.

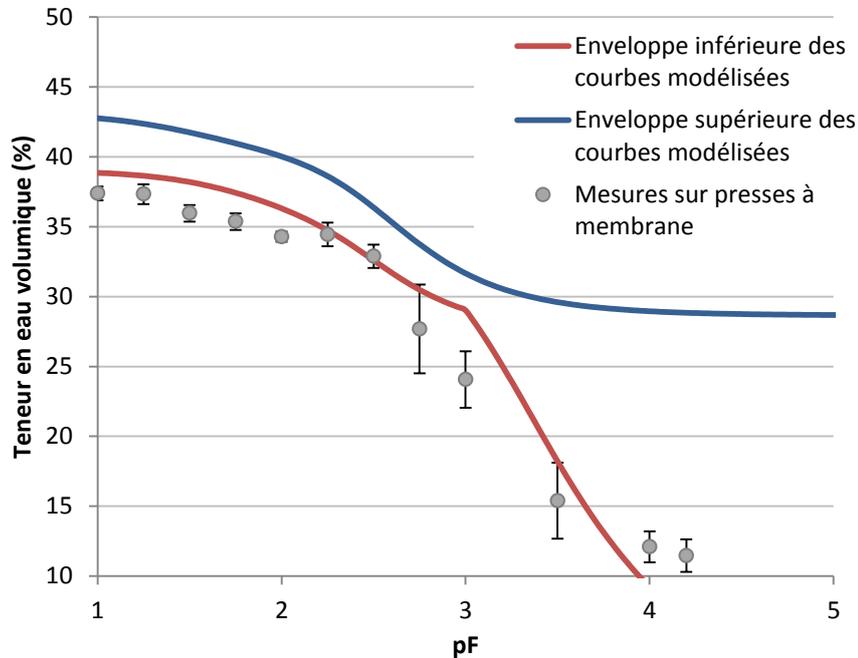


Figure 24 : Comparaison des données mesurées par la presse à membrane de Richards (points gris, avec écart-type des mesures), et des données mesurées par le dispositif HYPROP. On représente ici les deux courbes enveloppes des valeurs maximales et minimale de la teneur en eau pour un potentiel donné.

#### 4.2. Evolution de la conductivité hydraulique en fonction de la direction de prélèvement et de la distance au drain

Dans l'horizon E&BT, le paramètre  $K_{sat}$  mesuré sur des échantillons prélevés selon une direction verticale est supérieur de deux ordres de grandeur à ceux mesurés sur des échantillons prélevés dans une direction horizontale (Tableau 7). Dans l'horizon BTgd, la valeur verticale est également plus élevée, mais de moins d'un ordre de grandeur. Ces résultats sont en accord avec ceux observés par Kruse et al. (2008) et Petersen et al. (2008), mais en contradiction avec ceux de Bathke et al. (1991). Nous avons démontré également que, pour les deux horizons, la conductivité horizontale dans la direction parallèle au drain était supérieure à celle dans la direction perpendiculaire au drain.

Nous avons également montré que, dans l'horizon E&BT, le rapport  $K_{satV}/K_{satH}$  diminuait avec la distance au drain (figure 13), alors qu'aucune tendance n'était observée sur l'horizon BTgd. Enfin, de façon générale, sur l'ensemble des deux horizons, la conductivité hydraulique à saturation diminue lorsque l'on s'éloigne du drain, en lien probable avec la structure du sol (figure 17). Celle-ci est très modifiée par la présence du drain (figure 25). Même si la mise en place des drains date de 1973, le drainage modifie toujours les flux d'eau et donc la conductivité hydraulique dans le sol. De plus, lors de la mise en place du drain, le sol a été très remanié sur une largeur de 10 à 20 cm, et ce remaniement est encore visible.

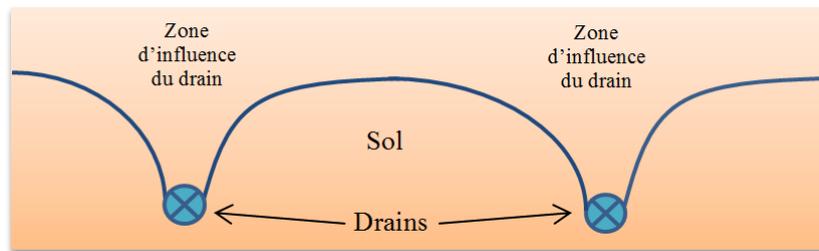


Figure 25 : schéma du fonctionnement des drains

Les données obtenues dans ce mémoire sur la conductivité hydraulique en régime insaturé s'avèrent au final moins concluantes, et des investigations complémentaires sont nécessaires. Il semble toutefois que la conductivité hydraulique en régime insaturé déterminée sur des échantillons prélevés dans une direction horizontale perpendiculaire au drain soit différente de celle mesurée sur des échantillons prélevés dans les deux autres directions. Il reste cependant à évaluer par l'utilisation d'un modèle de transfert 3D – et cette remarque est valable également pour la conductivité en régime saturé – , si les différences de conductivité dans les directions verticale et horizontales ont un impact significatif sur la description du fonctionnement d'un sol drainé.

## Conclusion

L'étude de l'anisotropie du tenseur de la conductivité hydraulique a été réalisée sur une parcelle agricole drainée dans la région de Chartres (28). Après avoir effectué des prélèvements sur le terrain, ceci a permis dans un premier temps d'étudier la conductivité hydraulique à saturation, selon trois directions par rapport au drain, et d'observer la variabilité spatiale de la conductivité hydraulique à saturation en fonction de la distance au drain. Dans un second temps, l'étude de la conductivité hydraulique en régime insaturé a été conduite en regardant la variabilité de la conductivité suivant les directions de prélèvement et la distance du drain.

Les résultats ont montré que la conductivité hydraulique à saturation est généralement plus élevée selon l'axe vertical par rapport à l'axe horizontal parallèle et perpendiculaire au drain. Il y a donc une anisotropie de la conductivité hydraulique à saturation dans cette parcelle, qui est plus moins prononcée selon l'horizon et le profil de sol étudié. La conductivité hydraulique lorsque le sol est saturée d'eau a tendance à diminuer avec l'éloignement du drain. Cette anisotropie semble toujours favorisée par le système de drainage en place sur la parcelle, qui a pour objectif d'assainir les terres agricoles hydromorphes.

Concernant la conductivité hydraulique en régime insaturé, il est difficile de conclure à une tendance d'après nos résultats. Le nombre de mesures est sans doute insuffisant et il est probable que la variabilité locale de conductivité sur la parcelle soit importante, ce qui peut nuire à l'analyse des résultats concernant l'anisotropie de la conductivité en régime insaturé.

Ce stage a également permis d'évaluer le perméamètre à chute de charge pour la mesure de  $K_{sat}$ . Ce dispositif ne dégrade que très peu les échantillons, ce qui permet de pouvoir réutiliser les échantillons pour d'autres mesures plus destructrices. Il est facile d'utilisation et la mesure de  $K_{sat}$  est assez rapide (entre 30 secondes et 24h de mesure selon la nature de l'échantillon), ce qui permet d'envisager de faire des grandes séries de mesures de  $K_{sat}$ .

En ce qui concerne l'évaluation du dispositif HYPROP, celui-ci présente quelques inconvénients notamment lorsque les échantillons ont gonflé pendant la saturation, l'installation sur la base du dispositif est alors plus « délicate ». Cependant, le logiciel associé à ce dispositif facilite l'ajustement des courbes de conductivité et de rétention en eau car avec le dispositif Wind, l'ajustement de la courbe de rétention puis des courbes de conductivité est plus laborieux.

Une étude sur le fonctionnement de cette parcelle drainée à une autre saison de l'année serait à envisager, ceci permettrait de confirmer ou non les résultats obtenus grâce au travail réalisé durant ce stage. Une étude sur la circulation des flux hydriques sur la parcelle via l'analyse d'autres résultats de  $K_{sat}$  et de  $K$  ainsi qu'une modélisation pourrait être envisagée.

## Références bibliographiques

- AFES, 2009. Référentiel pédologique 2008. Editions QUAE, Versailles 435 p.
- Bagarello, V., Sferlazza, S., Sgroi, A., 2009. Testing laboratory methods to determine the anisotropy of saturated hydraulic conductivity in a sandy-loam soil. *Geoderma* 154, 52 – 58.
- Baize, D., Jabiol, B., 2011. Guide pour la description des sols. QUAE, 430 p.
- Bathke, G.R. and Cassel, D.K., 1991. Anisotropic variation of profile characteristics and saturated hydraulic conductivity in a ultisol landscape. *Soil Science Society Am. J.*, 55, 333-339.
- Calvet, R., 2003. Le sol : propriétés et fonctions. Tome 2, phénomènes physiques et chimiques, applications agronomiques et environnementales.
- Chamayou, H., Legros, J.-P., 1989. Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la Science du Sol ; Presses Universitaires de France 593 p.
- Chossat J-C., Saugnac, A., M., 1985. Relation entre conductivité hydraulique et porosité de drainage mesurées par la méthode du puits et des piézomètres. *Science du sol* 1985/3, 151 – 167.
- Chossat J-C., 2005. La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols. Choix des méthodes. Lavoisier, 720 p.
- Coutadeur, C., Coquet, Y., Roger-Estrade, J., 2002. Variation of hydraulic conductivity in a tilled soil. *European Journal of Soil Science* 53, 619 – 628
- Cousin, I., 2014. Support de cours sur les propriétés hydrodynamiques des sols.
- Dörner, J., Horn, R., 2009. Direction-dependent behaviour of hydraulic and mechanical properties in structured soils under conventional and conservation tillage. *Soil and Tillage Research* 102, 225 – 232.
- Friedman S.P., Jones S.B., 2001. Measurement and approximate critical path analysis of the pore-scale-induced anisotropy factor of an unsaturated porous medium. *Water Resources Research* 37, 12, 2929 – 2942.
- Frison, A. 2005. Caractérisation des propriétés hydrodynamiques d'horizons hétérogènes de sol. rapport de stage pour l'obtention de la deuxième année de Master. Université d'Orléans.
- Guireesse, M., Collas, P., Bourgeat, F., Chossat, J. C., 1989. Relation entre la conductivité hydraulique de sols drainés et leurs caractéristiques pédologique. *Science du sol* 27, 3, 257 – 279.
- Hillel, D., 1988. L'eau et le sol, principes et processus physiques. Academia, Louvain-la-Neuve 288 p.
- INRA Orléans, UR Sols, 2013. Carte des sols au 1/10 000 Observatoire Spatialisé Orléanais des Sols (OS<sup>2</sup>).
- INRA Orléans, UR Sols, 2008. Mode opératoire. Expérimentation Wind. MO-MET-10. 8p

ISO, 2004. Norme internationale. Qualité du sol – détermination de la conductivité hydraulique en milieu non saturé et de la caractéristique de rétention en eau – méthode par évaporation de Wind.

Kruse, J., Lennartz B., Leinweber, P., 2008. A modified method for measuring saturated hydraulic conductivity and anisotropy of fen peat samples. 28, 2, 527 – 531.

Mallants, D., Mohanty, B. P., Vervoort A., Feyen, J., 1997. Spatial analysis of saturated hydraulic conductivity in a soil with macropores. *Soil technology*, 10, 115 – 131.

Montagne, D., 2006. Impact de la mise en culture et du drainage sur l'évolution récente des sols : cas des LUVISOLS Dégradés de l'Yonne. Thèse, Université d'Orléans.

Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12 (3), 513 – 521.

Musy, A., Soutter, M., 1991. Physique du sol. Presses Polytechniques et universitaires Romandes. 335p

Naasz R., 2005. Flux couplés d'eau et d'oxygène dans les supports de culture organiques : analyse et modélisation. Thèse de l'Université d'Angers. 367 p

Peters, A., Durner W., 2008. A simple model for describing hydraulic conductivity in unsaturated porous media accounting for film and capillary flow. *Water Resources Research* 44 (11).

Petersen, C. T., Trautner, A., Hansen, S., 2008. Spatio temporal variation of anisotropy of saturated hydraulic conductivity in a tilled sandy loam soil. *Soil and Tillage Research* 100, 108 – 113.

Reszkowska, A., Krümmelbein, J., Gan, L., Peth, S., Horn, R., 2011. Influence of grazing on soil water and gas fluxes of two Inner Mongolian steppe ecosystems. *Soil and Tillage Research*, 111 (2), 180-189.

Samouëlian, A., Cousin, I., Dagès, C., Frison, A., Richard, G., 2011. Determining the effective hydraulic properties of a highly heterogeneous soil horizon. *Vadose Zone Journal*, 10, 450 – 458.

UMS, 2013. Operation manual Ksat. UMS GmbH, Munich, Germany

Van Genuchten, M. T., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society Am. J.* 44, 892 - 898.

Zhu, J., and Sun, D., 2010. Capillary pressure-dependent anisotropy of unsaturated soils, *Canadian Journal of Soil Science*, 90(2), 319 - 329.

## Liste des figures

Figure 1 : Courbes de conductivité hydraulique (Cousin, 2014) .....	6
Figure 2 : conductivité hydraulique dans un sol hétérogène et/ou anisotrope (Musy et Soutter, 1991).....	8
Figure 3 : Localisation du site et position des drains .....	10
Figure 4 : profil de sol observé sur la parcelle .....	10
Figure 5 : Extrait de la carte des sols au 1/10 000 Observatoire Spatialisé Orléanais des Sols (OS <sup>2</sup> ).....	11
Figure 6 : Position des fosses par rapport aux drains et schéma des directions de prélèvement .....	12
Figure 7 : Prélèvement des échantillons ; ici, des échantillons prélevés selon une direction horizontale.....	13
Figure 8 : Schéma du perméamètre (UMS, 2013) (à gauche) et photo du perméamètre (à droite) .....	14
Figure 9 : dispositif Hyprop (à gauche) et schéma du dispositif (Schindler et al, 2010) (à droite).....	15
Figure 10 : Exemple de courbes de mesures .....	15
Figure 11 : Différence de valeur de Ksat entre répliques pour la fosse B et la fosse D.....	19
Figure 12 : représentation des valeurs de Ksat mesurées dans l'horizon LA.....	20
Figure 13 : évolution du rapport Ksat vertical / horizontal suivant la distance du drain .....	22
Figure 14 : Comparaison Ksat Horizontale parallèle / Horizontale perpendiculaire .....	22
Figure 15 : évolution spatiale de Ksat V .....	23
Figure 16 : évolution spatiale de Ksat Hpar et Ksat Hprp.....	23
Figure 17 : évolution spatiale de Ksat par profil de sol (moyenne harmonique de Ksat) .....	24
Figure 18 : Exemples d'ajustement (trait plein) des courbes de rétention en eau et de conductivité hydraulique sur des données expérimentales (figurés). -a- Courbe de rétention en eau ; -b- et -c- Courbe de conductivité hydraulique. ....	25
Figure 19 : Comparaison des courbes de rétention en eau (modèles) en fonction de la direction de prélèvement .....	26
Figure 20 : Courbes de rétention en eau des échantillons prélevés à 45 cm de profondeur. (Les points correspondent aux données mesurées par le dispositif Hyprop et les courbes correspondent aux ajustements modélisés.) .....	27
Figure 21 : comparaison des courbes $K(\theta)$ en fonction de la direction de prélèvement.....	28
Figure 22 : courbes $K(pF)$ – comparaison entre données mesurées et courbes modélisés .....	29
Figure 23 : Comparaison des données mesurées dans ce mémoire par le dispositif UMS (ronds gris), avec des mesures réalisées au perméamètre à charge constante sur des cylindres de 15 cm de diamètre et 7 cm de hauteur (Giot, 2014, communication personnelle).....	31
Figure 24 : Comparaison des données mesurées par la presse à membrane de Richards (points gris, avec écart-type des mesures), et des données mesurées par le dispositif HYPROP.....	32
Figure 25 : schéma du fonctionnement des drains .....	33

## **Liste des tableaux**

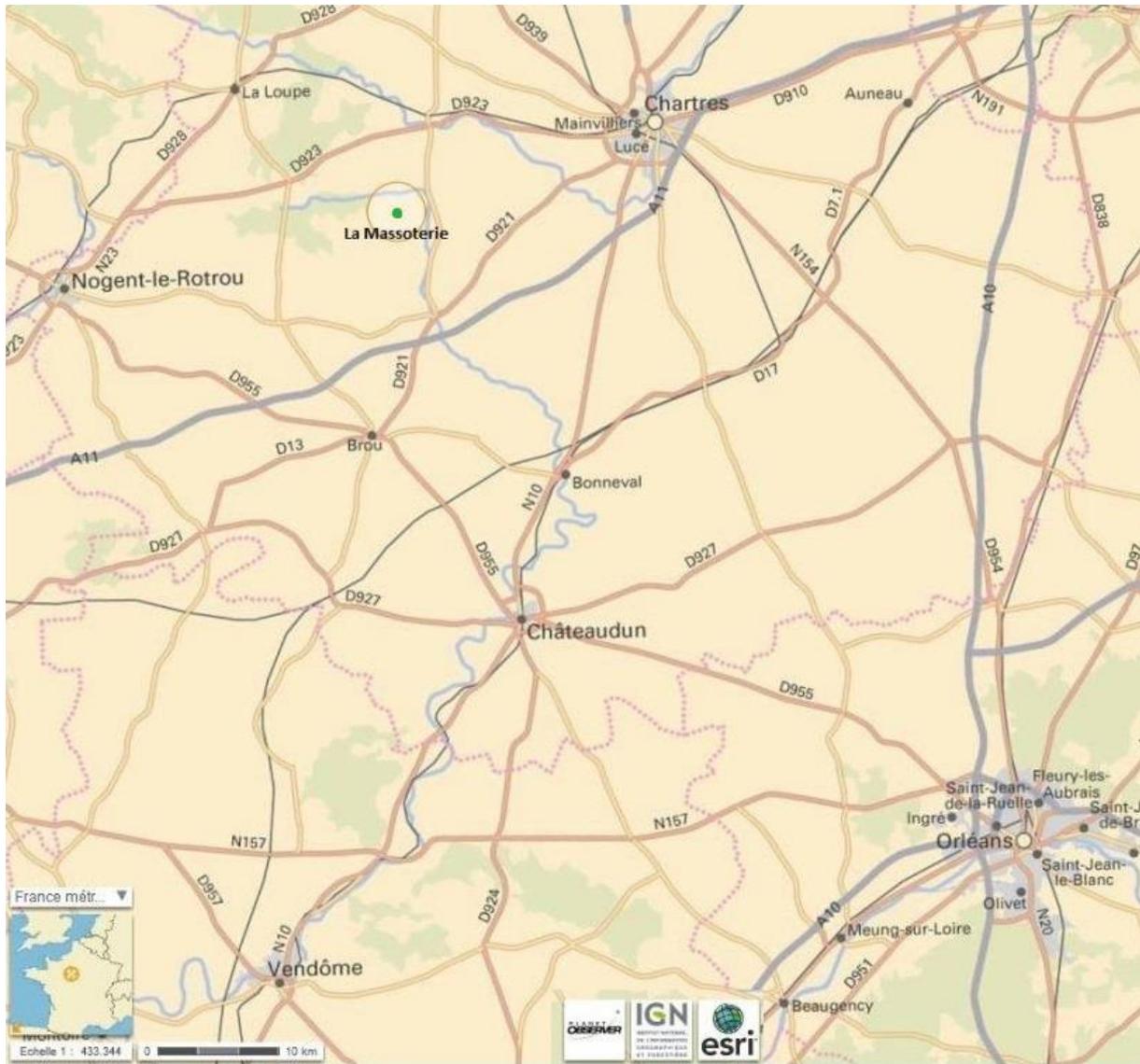
Tableau 1 : nombre d'échantillons prélevés selon la direction de prélèvement et dans chaque fosse.....	12
Tableau 2 : Nomenclature des échantillons.....	13
Tableau 3 : comparaison des valeurs de Ksat mesurées sur un même échantillon .....	18
Tableau 4 : comparaison des valeurs de Ksat entre répliques .....	18
Tableau 5 : valeurs de Ksat mesurées dans l'horizon LA .....	20
Tableau 6 : Valeurs de Ksat mesurées dans les deux horizons et suivant la direction de prélèvement .....	20
Tableau 7 : Statistiques descriptives des valeurs de Ksat suivant la direction et l'horizon .....	21
Tableau 8 : Paramètres d'ajustement des modèles de courbes de rétention en eau et de conductivité hydraulique à partir de données expérimentales obtenues avec le dispositif HYPROP .....	25

## **Liste des annexes**

Annexe 1 : situation géographique du site
Annexe 2 : profil de sol
Annexe 3 : tableau des mesures de Ksat
Annexe 4 : tableaux des mesures de densité apparente
Annexe 5 : exemples d'ajustement des courbes de conductivité

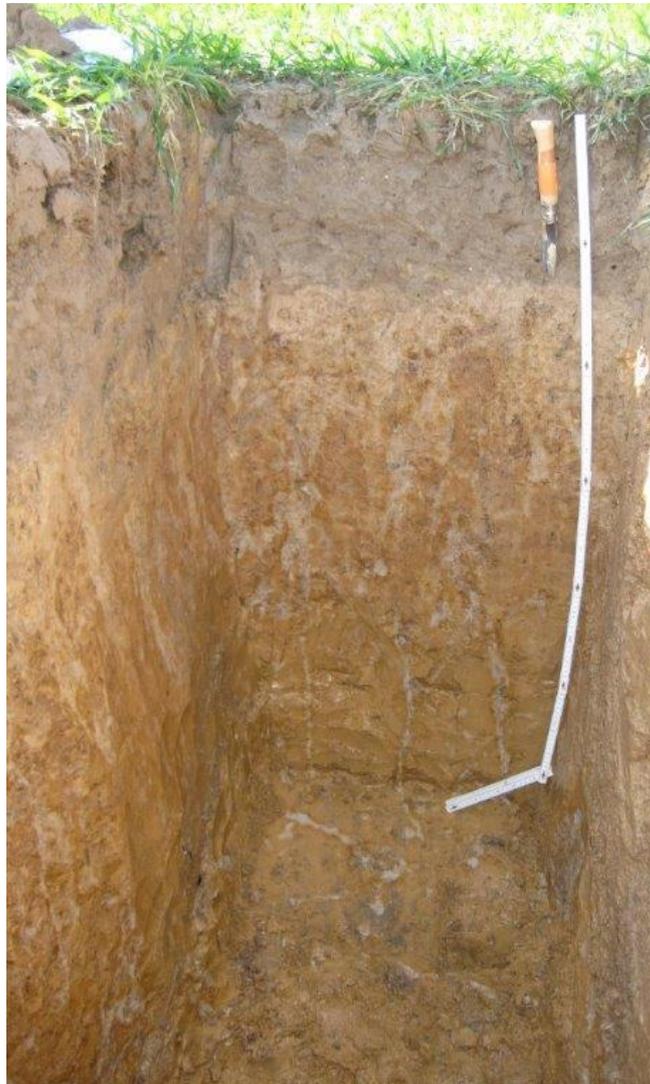
## Annexes

### Annexe 1 : localisation du site d'étude



Annexe 2 : Profil de sol observé sur la parcelle.

Fosse réalisée en haut de versant.



Annexe 3 : Tableau des mesures de Ksat et numéros des échantillons

numéro échantillon	Fosse	Distance du drain (m)	Nom de l'échantillon	K sat (m/s)	
				1° passage	2° passage
1	Fosse A	0	E&BT / Vertical	1,7E-05	x
2	Fosse A	0	E&BT / Horizontale parallèle	4,7E-05	x
3	Fosse A	0	E&BT / Horizontale perpendiculaire	1,4E-07	x
4	Fosse A	0	BTgd / Vertical	3,4E-05	x
5	Fosse A	0	BTgd / Horizontale parallèle	7,1E-06	x
6	Fosse A	0	BTgd / Horizontale perpendiculaire	2,2E-08	x
7	Fosse B	0,6	E&BT / Vertical	2,5E-05	2,0E-05
8	Fosse B	0,6	E&BT / Vertical (2)	6,5E-06	x
9	Fosse B	0,6	E&BT / Horizontale parallèle	1,3E-06	x
10	Fosse B	0,6	E&BT / Horizontale parallèle (2)	6,3E-08	x
11	Fosse B	0,6	E&BT / Horizontale perpendiculaire	3,2E-06	3,1E-06
12	Fosse B	0,6	E&BT / Horizontale perpendiculaire (2)	6,8E-07	x
13	Fosse B	0,6	BTgd / Vertical	8,2E-08	8,1E-08
14	Fosse B	0,6	BTgd / Vertical (2)	2,3E-07	x
15	Fosse B	0,6	BTgd / Horizontale parallèle	3,1E-07	2,3E-07
16	Fosse B	0,6	BTgd / Horizontale parallèle (2)	1,4E-05	1,5E-05
17	Fosse B	0,6	BTgd / Horizontale perpendiculaire	4,5E-07	3,8E-07
18	Fosse B	0,6	BTgd / Horizontale perpendiculaire (2)	2,4E-04	x
19	fosse C	3,6	E&BT / Vertical	1,3E-05	x
20	fosse C	3,6	E&BT / Horizontale parallèle	4,6E-06	x
21	fosse C	3,6	E&BT / Horizontale perpendiculaire	4,1E-08	x
22	fosse C	3,6	BTgd / Vertical	1,9E-07	x
23	fosse C	3,6	BTgd / Horizontale parallèle	1,7E-08	x
24	fosse C	3,6	BTgd / Horizontale perpendiculaire	9,0E-08	1,5E-07
25	fosse D	5,8	E&BT / Vertical	1,0E-05	1,1E-05
26	fosse D	5,8	E&BT / Horizontale parallèle	5,8E-08	1,2E-07
27	fosse D	5,8	E&BT / Horizontale parallèle (2)	4,8E-07	x
28	fosse D	5,8	E&BT / Horizontale perpendiculaire	6,8E-07	x
29	fosse D	5,8	E&BT / Horizontale perpendiculaire (2)	1,4E-07	x
30	fosse D	5,8	BTgd / Vertical	5,3E-09	5,7E-09
31	fosse D	5,8	BTgd / Vertical (2)	1,1E-06	8,0E-07
32	fosse D	5,8	BTgd / Horizontale parallèle	7,1E-08	x
33	fosse D	5,8	BTgd / Horizontale parallèle (2)	6,6E-06	x
34	fosse D	5,8	BTgd / Horizontale perpendiculaire	2,4E-08	2,8E-08
35	fosse D	5,8	BTgd / Horizontale perpendiculaire (2)	2,5E-08	x

numéro échantillon	Fosse	Distance du drain (m)	Nom de l'échantillon	K sat (m/s)	
				1° passage	2° passage
36	toutes distances au drain		LA / Vertical 1	1,8E-04	xxx
37			LA / Vertical 2	1,9E-04	2,3E-04
38			LA / Vertical 3	1,6E-04	1,6E-04
39			LA / Vertical 4	5,7E-05	xxx
40			LA / Vertical 5	1,3E-05	1,6E-05
41			LA / Vertical 6	9,5E-06	1,1E-05
42			LA / Vertical 7	pas de mesure de Ksat	
43			LA / Vertical 8		
44	Fosse B	0,6	LA / Hpar	8,2E-09	xxx
45	Fosse B	0,6	LA / Hprp	1,7E-04	4,1E-04
46	Fosse B	0,6	LA / Hpar (2)	pas de mesure de Ksat	
47	Fosse B	0,6	LA / Hprp (2)		

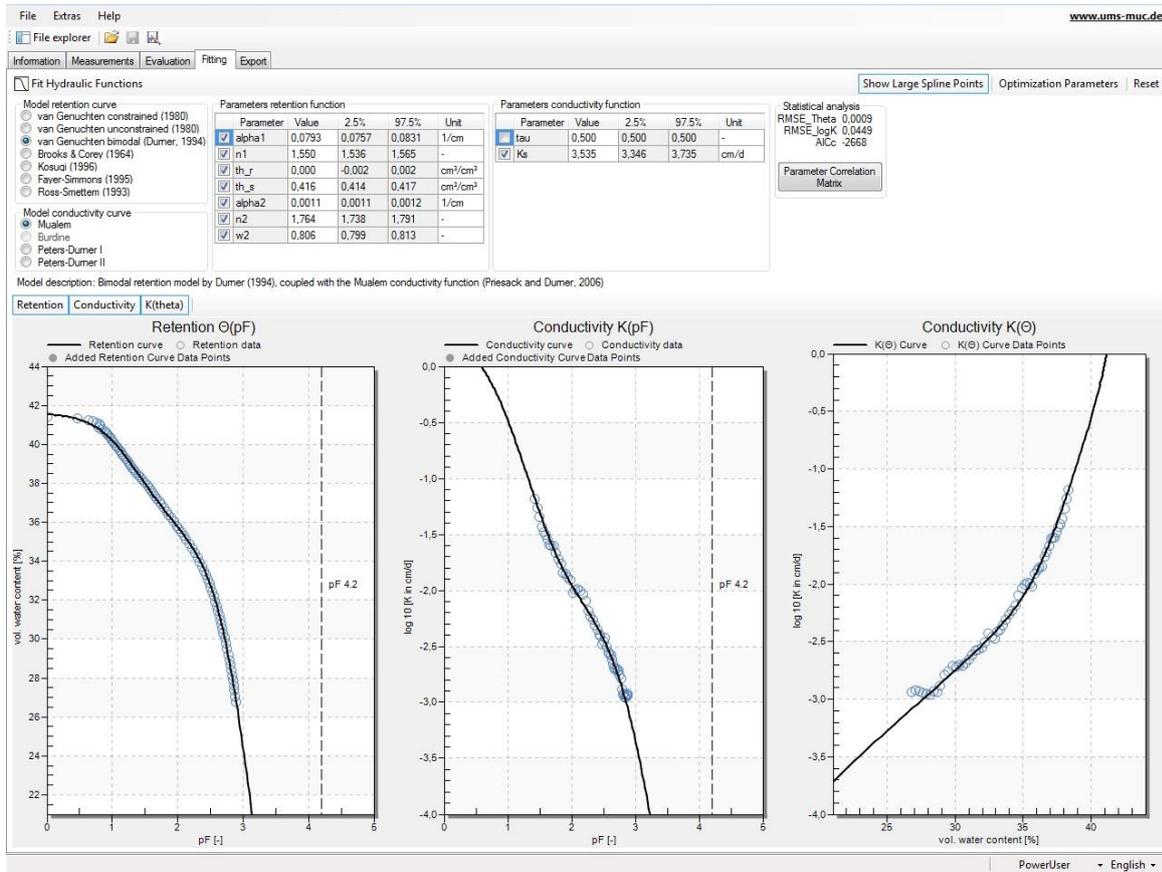
Annexe 4 : tableaux de mesure de la densité apparente

fosse	densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )					
	45 cm vertical	45 cm Hpar	45 cm Hprp	65 cm vertical	65 cm Hpar	65 cm Hprp
A	1,53	1,48	1,63	1,45	1,49	1,67
B	1,53	1,54	1,54	1,67	1,62	1,68
B	1,62	1,57	1,54	1,62	1,58	1,65
C	1,58	1,60	1,58	1,64	1,73	1,72
D	1,60	1,63	1,63	1,64	1,68	1,65
D	x	1,54	1,61	1,62	1,50	1,65
moyenne	1,57			1,63		

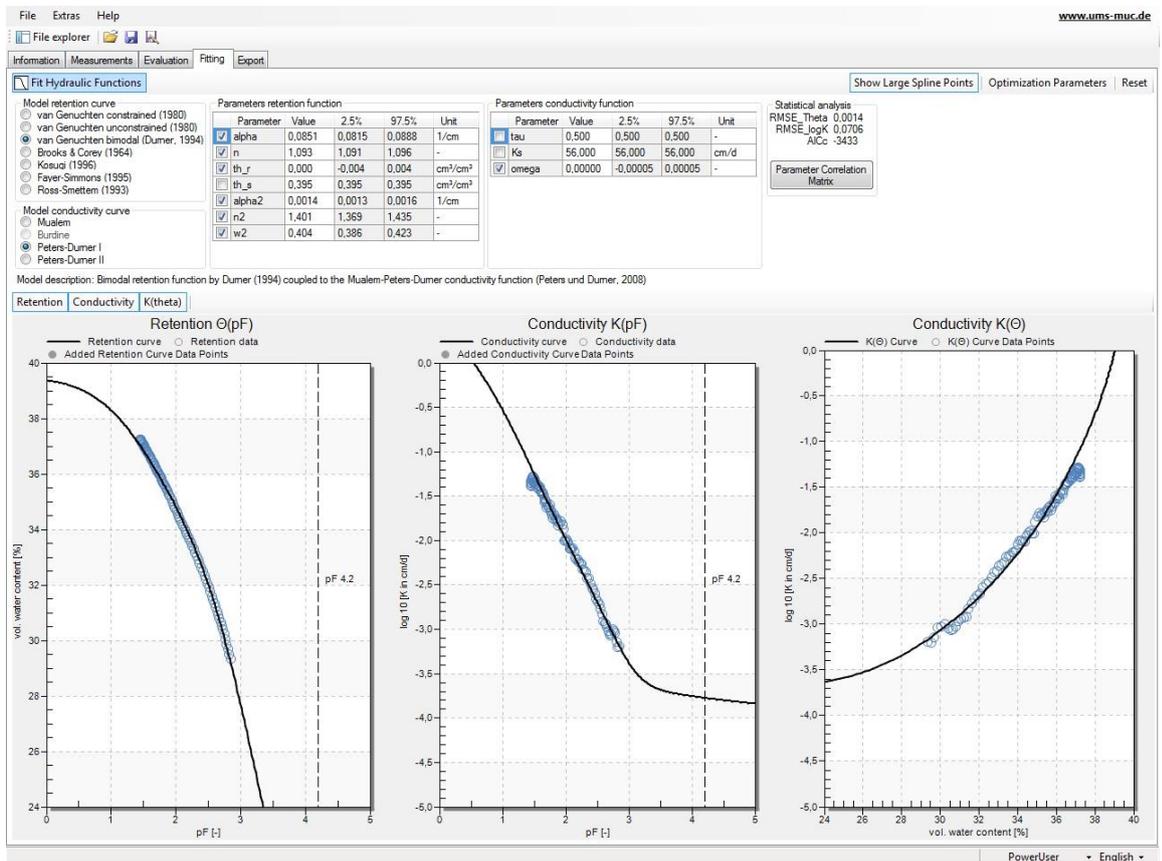
	Ksat (m/s)	densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )
LA Vertical 6 (41)	1,0E-05	1,48
LA Vertical 7 (42)	x	1,34
LA Vertical 8 (43)	x	1,26
LA Hpar (44)	8,2E-09	1,56
LA Hpar (2) (45)	x	1,50
LA Hprp (46)	2,7E-04	1,46
LA Hprp (2) (47)	x	1,53

# Annexe 5 : exemples d'ajustements réalisés à partir du logiciel HYPROP – FIT

## Fosse A – VERTICAL 45 cm



## Fosse B – VERTICAL 45 cm



## Table des matières

Sommaire .....	1
Glossaire.....	2
Présentation de l'organisme d'accueil.....	3
1. Introduction .....	4
1.1. Contexte et problématique.....	4
1.2. Eléments bibliographiques .....	5
1.2.1. Généralités.....	5
1.2.2. Méthodes de détermination de la conductivité hydraulique.....	6
1.2.3. Variation de la conductivité hydraulique .....	8
2. Matériels et méthodes.....	10
2.1. Présentation du site d'étude .....	10
2.2. Prélèvement des échantillons.....	11
2.3. Détermination de la conductivité hydraulique à saturation (Ksat) .....	13
2.3.1. Mesure de la conductivité hydraulique à saturation (Ksat).....	13
2.3.2. Analyse des valeurs de conductivité hydraulique à saturation.....	14
2.4. Mesure de rétention en eau et estimation de la conductivité hydraulique en régime insaturé (K).....	14
2.4.1. Partie expérimentale au laboratoire.....	14
2.4.2. Ajustement des courbes de conductivité hydraulique .....	16
3. Résultats .....	17
3.1 Estimation de la conductivité hydraulique à saturation (Ksat).....	17
3.1.1. Répétabilité et répétitivité des mesures .....	17
3.1.2. Valeurs moyennes de la conductivité hydraulique à saturation pour les 3 horizons étudiés.....	19
3.1.3. Comparaison des valeurs de Ksat.....	21
3.1.4. Variabilité spatiale de la conductivité hydraulique à saturation .....	22
3.2 Détermination des courbes de conductivité hydraulique K(h) et K( $\theta$ ).....	24
3.2.1. Données expérimentales.....	24
3.2.2. Courbes de rétention.....	25
3.2.3. Courbes de conductivité hydraulique .....	27
4. Discussion .....	30
4.1. Eléments méthodologiques.....	30
4.1.1. Ergonomie des dispositifs mis en œuvre.....	30
4.1.2. Taille des échantillons analysés .....	30
4.1.3. Evaluation du dispositif HYPROP pour la rétention en eau .....	31

4.2. Evolution de la conductivité hydraulique en fonction de la direction de prélèvement et de la distance au drain .....	32
Conclusion.....	34
Références bibliographiques .....	35
Liste des figures .....	37
Liste des tableaux .....	38
Liste des annexes.....	38
Annexes .....	39
Table des matières .....	44



## **Résumé**

La conductivité hydraulique est un paramètre essentiel dans la compréhension des mouvements de l'eau dans le sol. C'est un paramètre qui varie notamment selon la structure du sol, sa texture et son état de saturation.

Nous avons étudié l'anisotropie de la conductivité hydraulique sur une parcelle drainée à proximité de Chartres (28) sur un sol lessivé dégradé à hydromorphie temporaire. L'objet de l'étude était de comparer les valeurs de conductivité hydraulique en régimes saturé et insaturé, suivant trois directions de prélèvement (verticale, horizontale parallèle et horizontale perpendiculaire au drain) et d'analyser l'évolution de la conductivité hydraulique suivant la distance du drain, en utilisant des dispositifs expérimentaux novateurs permettant des mesures sur des cylindres de sol non perturbés de petite taille.

Nous avons montré que la conductivité hydraulique à saturation selon l'axe vertical est supérieure à la conductivité selon les axes horizontaux, en particulier dans l'horizon E&BT. La conductivité hydraulique à saturation diminue avec l'éloignement du drain, même si quelques échantillons nuancent cette évolution.

La conductivité hydraulique en régime insaturé est plus difficile à évaluer. Au vu de nos résultats, celle-ci ne présente ni tendance suivant la direction de prélèvement, ni évolution notable selon la distance au drain.

**Mots clés** : conductivité hydraulique, tenseur, anisotropie, sols, parcelle drainée, directions de prélèvement

## **Abstract**

Hydraulic conductivity is an essential parameter to understand the movements of water and fluids in the soil. This parameter varies according to the soil structure and texture, as well as the saturation level.

We studied anisotropy of the hydraulic conductivity on a degraded Luvisol located in a drained plot near to Chartres (Eure et Loir, France). The aim of the study was to compare values of saturated and unsaturated hydraulic conductivity of three directions (vertical, horizontal parallel and horizontal perpendicular to the drain) and to analyse the variations of hydraulic conductivity according to the distance to the drain, by using novel experimental designs using small undisturbed soil cylinders.

We demonstrated that saturated hydraulic conductivity along the vertical axis was larger than conductivity along the horizontal axes, especially in the E&BT horizon. The saturated hydraulic conductivity decreased with the distance to the drain, even if some samples refute this evolution.

The unsaturated hydraulic conductivity was more difficult to evaluate. Neither trend according to the sampling direction, neither evolution with the distance to the drain was observed.

**Keywords** : hydraulic conductivity, tensor, anisotropy, soils, drained plot, sampling directions