



**HAL**  
open science

## Caractérisation du réservoir utilisable des sols et évolution en fonction des successions culturales

Florian Bourgeois

► **To cite this version:**

Florian Bourgeois. Caractérisation du réservoir utilisable des sols et évolution en fonction des successions culturales. [Stage] Autres régions du monde. Université François Rabelais (Tours), FRA. 2013, 40 p. hal-02810588

**HAL Id: hal-02810588**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02810588>**

Submitted on 6 Jun 2020

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

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

Rapport de stage pour l'obtention  
de la 1<sup>ère</sup> année de Master

# Caractérisation du réservoir utilisable des sols et évolution en fonction des successions culturales



**Florian BOURGEOIS**

**Avril-juillet 2013**

Maître de stage : Isabelle COUSIN

## Remerciements

Je tiens à remercier personnellement Isabelle Cousin qui m'a offert cette possibilité de stage de recherche dans la science du sol. Elle a toujours été là pour me guider et m'expliquer avec le sourire quand j'étais un peu « hors cadre ».

Pour la partie laboratoire, un grand merci à Hervé Gaillard qui m'a enseigné les techniques pour apprivoiser les presses à membranes et à plaques (surtout cette Mélanie, un peu facile en apparence, qui n'hésite pas à t'attraper par la main dès qu'elle en a l'occasion). Il a été super et d'une grande efficacité et de bon conseil. C'est appréciable de travailler avec des professionnels comme ça.

Pour la partie modélisation, un grand merci également à Christine Le Bas qui nous a donné quelques heures de son temps pour effectuer les simulations tant utiles dans ce rapport.

Un petit paragraphe pour remercier Xavier Charrier et toute l'équipe de l'INRA de Lusignan pour nous avoir fourni les données des profils pédologiques et pour avoir été à notre disposition pour répondre à quelques-unes de nos interrogations. Merci à Xavier pour la visite du site du SOERE en ce premier jour de vrai soleil de l'année.

Je remercie ma collègue de bureau, Eva Rabot pour ces coups de mains de dernière minute et ses conseils de diplômé fort utiles et appréciables. Des bons moments de rire également ont participés à la bonne ambiance autour de ce stage.

De façon plus générale, je remercie tous les gens que j'ai rencontrés et avec qui j'ai pu discuter pendant ce court séjour, aussi bien pendant les cours de Lindy Hop que pendant les petites sorties au cinéma ou en ville, et bien sûr, dans les couloirs du bâtiment (j'avoue, un peu à la salle café aussi).

Un grand merci à tous.

# TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>3</b>
<b>I. LES PROPRIETES HYDRIQUES DES SOLS ET LA NOTION DE RESERVOIR UTILISABLE (RU).....</b>	<b>3</b>
1) TENEUR EN EAU DU SOL, POTENTIEL HYDRIQUE ET PERMEABILITE .....	3
2) NOTION DE RESERVOIR UTILISABLE.....	4
3) VALEURS DE LA CAPACITE AU CHAMP ET DU POINT DE FLETRISSEMENT .....	5
4) RESERVOIR UTILISABLE ET RACINES.....	5
<b>II. MATERIELS ET METHODES.....</b>	<b>5</b>
1) DESCRIPTION DU SITE D'ETUDE.....	5
i. Localisation et présentation du SOERE ACBB.....	5
ii. Présentation du site d'étude .....	6
iii. Description des sols.....	7
2) PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS.....	7
3) EXPERIMENTATIONS.....	8
i. Détermination de la rétention en eau sur mottes.....	8
ii. Détermination de la masse volumique apparente.....	9
iii. Statistiques.....	10
4) DETERMINATION DU RESERVOIR UTILISABLE (RU) .....	10
5) MODELISATION .....	10
<b>III. RESULTATS.....</b>	<b>11</b>
1) ANALYSE DE LA TENEUR EN EAU AU POINT DE FLETRISSEMENT PERMANENT .....	11
i. Valeurs de potentiels hydriques prises en compte et hypothèses de travail.....	11
ii. Présentation des données mesurées.....	11
iii. Effet de la texture du sol sur la teneur en eau au point de flétrissement permanent.....	12
iv. Effet du traitement sur la teneur en eau au point de flétrissement permanent.....	13
v. Effets conjoints de la texture du sol et du traitement sur la teneur en eau au point de flétrissement permanent.....	14
vi. Effet dû à la variabilité spatiale des parcelles.....	14
vii. Lien avec le réservoir utilisable.....	14
viii. Synthèse.....	15
2) ANALYSE DE LA TENEUR EN EAU A LA CAPACITE AU CHAMP .....	15
i. Valeurs de potentiels hydriques prises en compte et hypothèses de travail.....	15
ii. Présentation des résultats expérimentaux.....	15
iii. Effet de la texture sur la capacité au champ.....	17
iv. Effet du traitement sur la teneur en eau à la capacité au champ.....	17
v. Effet du positionnement des traitements sur la capacité au champ .....	18
vi. Synthèse.....	19
3) DETERMINATION DU RESERVOIR UTILISABLE.....	19
4) ANALYSE, PAR MODELISATION, DES VARIATIONS DU RESERVOIR UTILISABLE : CONSEQUENCES SUR L'EVOLUTION DU DRAINAGE ET DE LA TENEUR EN EAU DU SOL AU COURS D'UN CYCLE CULTURAL.....	20
i. Objectifs de la modélisation et présentation des scénarios de simulation .....	20
ii. Effet du traitement cultural.....	21
iii. Effet de la taille du réservoir utilisable .....	25
iv. Synthèse.....	26
<b>IV. SYNTHESE ET DISCUSSION.....</b>	<b>26</b>
1) EFFET DE LA SUCCESSION DES CULTURES SUR LE RESERVOIR UTILISABLE ; CONSEQUENCES AGRONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTALES .....	26
2) QUELLES BORNES CHOISIR POUR LE CALCUL DU RESERVOIR UTILISABLE ?.....	26
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>27</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>28</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>29</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>29</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>31</b>

## Résumé

La plante a besoin, pour se développer, d'eau et de nutriments minéraux qu'elle puise dans le sol. La structure du sol, qui conditionne les transferts d'eau et de nutriments, influence donc le développement racinaire. En retour, il est possible que la croissance racinaire affecte, à moyen terme, la structure et les propriétés hydriques du sol. Le premier objectif de ce travail était donc d'analyser l'effet de différentes successions culturales sur le Réservoir Utilisable (RU) des deux premiers horizons d'un sol. Des mesures en laboratoire des teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent ont été réalisées sur des échantillons de sol prélevés sur le SOERE ACBB de Lusignan dont les parcelles présentent des successions cultures / prairies de durées variables. Nous avons montré que, après huit années d'installation du site, les sols sous les différentes successions culturales ont la même teneur en eau au point de flétrissement permanent, mais pas à la capacité au champ, ce qui conduit à des valeurs de RU différenciées. Les sols cultivés continuellement soit en céréales soit en prairies ont un RU inférieur aux sols cultivés alternativement en céréales et en prairies. Ces différences de RU sont suffisantes pour que i) la dynamique de la teneur en eau dans le sol, ii) le drainage annuel à la base du sol et iii) le rendement d'une culture, tous trois estimés par le modèle STICS au cours d'un cycle cultural, soient significativement différents. Le second objectif de ce travail concernait le choix des potentiels hydriques à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent. Nous avons montré que les teneurs en eau n'étaient pas significativement différentes à pF4,2 et pF4,22, mais qu'elles étaient significativement différentes pour pF2, pF2,5 et pF2,7.

Mots clés : propriétés hydriques, teneur en eau, structure du sol, réservoir utilisable, rétention en eau sur mottes, modèle STICS, drainage.

## Abstract

To grow, the plants need, water and mineral nutrients, that are taken from the soil. Soil structure, which determines the transfer of water and nutrients, thus influences root development. However, it could be possible that root growth affects the structure and properties of the soil water. The first objective of this study was therefore to analyse the effect of different crop sequences on the Available Water Content (AWC) of the first two horizons of a soil. Laboratory measurements of water content at field capacity and permanent wilting point were performed on soil samples taken from the SOERE ACBB Lusignan whose plots present series of crops / grasslands of varying durations. We showed that after eight years from the beginning of the experiment, the soils under different crop sequences have the same water content at permanent wilting point, but not at field capacity, which leads to values of different AWC. The soils that were continuously cultivated either with grain or with grasslands exhibited AWC values lower than those grown alternately in cereals and in grassland. These differences in AWC were large enough so that i) the dynamics of the water content in the soil, ii) the annual drainage at the base of the soil and iii) the crop yield, all the three estimated over a crop cycle by the STICS model, were significantly different. The second objective of this work concerned the selection of water potentials at field capacity and permanent wilting point. We have shown that the water contents were not significantly different at pF4.2 and pF4.22, but were significantly different for pF2, pF2.5 and pF2.7.

Key words: hydric properties, water content, soil structure, available water content, water retention on soil clods, STICS model, drainage.

# INTRODUCTION

Le sol joue un rôle essentiel dans le fonctionnement des écosystèmes terrestres. Il est l'interface entre l'hydrosphère, l'atmosphère, la biosphère et la lithosphère. Il assure un rôle de support à la croissance des plantes dont le développement est contrôlé par l'apport en eau et en nutriments minéraux qu'elle reçoit. La croissance racinaire est donc fortement influencée par la structure du sol, qui contrôle elle-même les transferts d'eau et de gaz dans les sols. A contrario, les racines se développant dans ce sol peuvent en modifier la structure, à la fois dans la couche labourée mais également dans les horizons plus profonds. Elles pourraient donc, par conséquent, en modifier les propriétés, en particulier les propriétés hydriques, et plus spécifiquement la réserve utile. Cette dernière représente la quantité d'eau maximale que les racines peuvent extraire du sol. Le projet scientifique RURac<sup>1</sup> auquel se rattachent les travaux présentés dans ce mémoire repose sur l'hypothèse que l'action racinaire peut modifier la structure du sol, notamment dans l'horizon profond non atteint par le travail du sol, et donc, à terme, entraîner des modifications de la quantité d'eau disponible pour les plantes.

L'objectif de ce mémoire est donc de tester cette hypothèse. Il s'appuie sur une démarche en deux étapes :

- Dans un premier temps (chapitre II), des mesures de la quantité d'eau disponible pour les plantes seront réalisées sur les sols de différentes parcelles d'un même site expérimental pour lequel des successions culturales différenciées ont été mises en place depuis plusieurs années. Cette quantité d'eau disponible est souvent qualifiée de « réserve utile », et le paragraphe suivant en présentera la définition et les limites (chapitre I)
- Dans un second temps, les différentes réserves utiles mesurées seront utilisées comme données d'entrée dans un modèle de bilan hydrique (chapitre III). Nous pourrions ainsi discuter de l'effet réel des différences de réserve utile mesurée sur le rendement d'une culture, la teneur en eau du sol et le drainage à la base du sol.

## I. LES PROPRIETES HYDRIQUES DES SOLS ET LA NOTION DE RESERVOIR UTILISABLE (RU)

### *1) Teneur en eau du sol, potentiel hydrique et perméabilité*

La compréhension des transferts d'eau dans les sols est essentielle pour l'agriculteur et le gestionnaire d'espace. Elle passe par la compréhension des caractéristiques hydriques du sol à savoir : sa teneur en eau, sa perméabilité et l'état énergétique de l'eau.

La teneur en eau est la quantité d'eau que le sol contient alors que la perméabilité d'un sol est sa capacité à se laisser traverser par l'eau. L'état énergétique de l'eau, qui sera souvent nommé « potentiel » dans la suite de ce mémoire correspond à l'énergie contenue dans un volume unitaire d'eau. Ce potentiel de l'eau est subdivisé en trois catégories : le potentiel gravitaire qui est lié à la gravité, le potentiel hydrostatique qui est lié au poids de la colonne d'eau au-dessus d'un point donné et enfin le potentiel matriciel qui représente la force d'interaction entre les phases solides et liquides au sein du sol. On exprime ce potentiel – qui prend des valeurs négatives - en unité de pression (mbar, hPa, en général), en unité de longueur (cm), ou en unité dite « pF », qui représente le logarithme en base 10 de la valeur absolue du potentiel exprimé en cm.

---

<sup>1</sup> RURac : Mise en évidence de l'évolution temporelle de la Réserve Utile des sols sous l'action des racines : Une première pierre dans une optique de gestion des propriétés hydriques du sol par gestion de la végétation et de son enracinement. Projet financé dans le cadre des Paris Scientifiques du Département Environnement et Agronomie de l'INRA.

L'eau s'écoule à travers un système de pores de géométrie complexe défini par des diamètres et des tortuosités très variables (Bruand et Coquet, 2010). C'est grâce à l'eau que la plante se nourrit, il est donc nécessaire de connaître la quantité d'eau que le sol peut retenir, mais aussi ce qu'il peut restituer à la plante. Cette quantité d'eau que le sol peut retenir dépend de deux caractéristiques du milieu : la texture du sol et sa structure (Bruand et al., 1996 ; Gobat et al., 2010). La texture représente la répartition des particules élémentaires (argiles, limons, sables) constituant le milieu ; l'assemblage de ces particules élémentaires crée un réseau poreux dit textural (Bruand et al., 1996). La structure représente l'organisation des vides et des pleins à une échelle plus large (assemblage des agrégats et des mottes de terre, fissures, conduits...).

## 2) Notion de réservoir utilisable

La texture et la structure sont à l'origine de l'état de l'eau dans le sol, que l'on peut organiser en trois catégories: l'eau gravitaire, l'eau utilisable et l'eau inutilisable (Figure 1). C'est l'eau utilisable qui est nécessaire à l'alimentation de la plante. Selon l'agencement et la taille des particules qui composent le sol, les vides ou pores n'ont pas la même forme ni la même taille. La figure 1 montre de façon simplifiée l'organisation en couches (matérialisé seulement au niveau des limites par des traits interrompu-courts) de l'eau autour des particules du sol. P représente la force de gravité, F représente la force d'attraction des particules du sol (« le potentiel matriciel »), et S représente la succion exercée par les racines. La couche la plus proche de la particule est très fortement adsorbée par celle-ci. L'eau retenue à cet endroit et avec cette force est située dans des pores de taille inférieure à 0,2 µm. Elle n'est pas accessible aux plantes car la force d'attraction des particules est supérieure à la succion maximale que la racine peut exercer sur le sol pour en extraire de l'eau. Cette succion maximale correspond au potentiel dit « point de flétrissement permanent », au-delà de laquelle les plantes ne prélèvent plus l'eau du sol. En deçà de ce point de flétrissement permanent, l'eau est utilisable par les plantes. La quantité d'eau maximale que le sol peut stocker correspond à la quantité d'eau qui ne draine pas naturellement par gravité. Ce point où la force gravitaire s'équilibre avec la succion du sol est nommé « point de ressuyage » ou encore « capacité au champ ».

Au final, la quantité d'eau maximale que les plantes peuvent extraire du sol (eau utilisable dans la figure 1) est bornée par la teneur en eau au point de flétrissement permanent, et la teneur en eau à la capacité au champ. Ce stock d'eau disponible dans le sol pour les plantes est couramment appelé réserve utile (RU). En cohérence avec l'analyse bibliographique de Généré et al (2012), on lui préférera l'appellation de « réservoir utilisable » (RU), afin de bien exprimer que la notion recouvre une vision de la quantité d'eau potentiellement disponible pour les plantes, et non de la quantité d'eau utilisée.

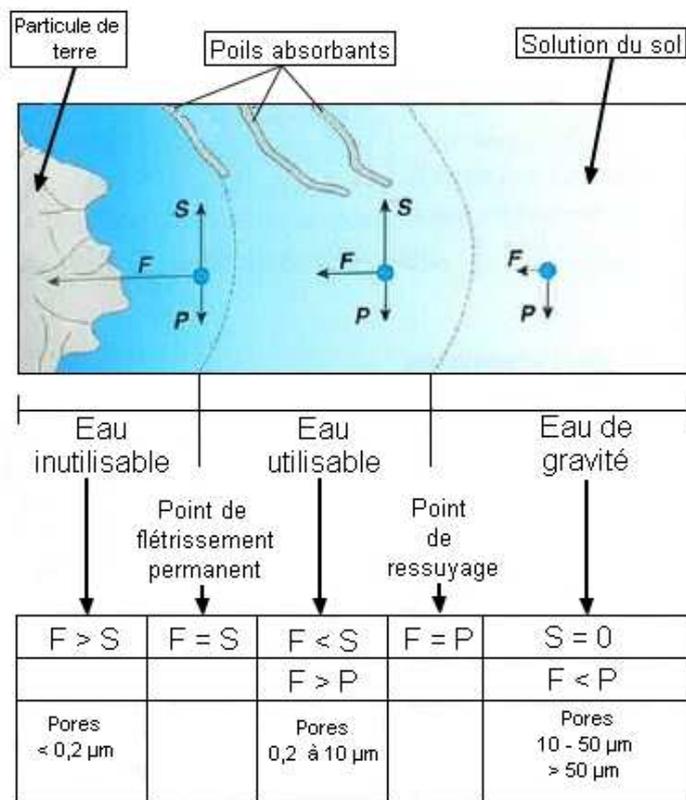


Figure 1 : Les différents états de l'eau en lien avec les forces s'appliquant sur l'eau et la porosité (Gobat et al, 2010).

### 3) Valeurs de la capacité au champ et du point de flétrissement

Les valeurs de potentiel qui permettent de borner le calcul du RU ne font pas l'objet d'un consensus. Le potentiel hydrique qui correspond à la capacité au champ, c'est-à-dire la limite entre l'eau retenue par les forces capillaires et l'eau évacuée par les forces gravitaires, dépend de la structure du sol et, dans une moindre mesure, de sa texture. Les pédologues fixent sa valeur à pF 2 ou pF 2,5 (-100hPa ou -330hPa) (Bruand et al., 2004). En revanche, les écophysiolgistes la fixent plutôt à pF 2,7 (-500 hPa), arguant que toute l'eau retenue par les forces capillaires n'est pas exploitable par les racines. De même, en ce qui concerne le point de flétrissement permanent, c'est-à-dire la limite à partir de laquelle les plantes ne peuvent plus prélever d'eau dans le sol, les propositions sont divergentes : les pédologues le considèrent une valeur fixe correspondant à pF 4,2 (-15800 hPa), ce qui représente une moyenne acceptable pour les plantes de milieu tempéré. Les écophysiolgistes considèrent que, sous nos climats, les plantes peuvent prélever de l'eau jusqu'à pF 4,22 (-16500hPa) (Gobat et al., 2010).

### 4) Réservoir utilisable et racines

Il est connu de longue date que la croissance racinaire est dépendante de la structure et des propriétés hydriques du sol. Cependant, plusieurs travaux (Young, 1995 ; Czarnes et al, 2000 ; Dexter, 1987 dans Whalley et al., 2005 et Materechera et al, 1992 dans Whalley et al., 2005) montrent qu'au niveau de la rhizosphère, c'est-à-dire de la zone du sol directement en contact avec les racines, le mucilage racinaire peut modifier la teneur en eau et la structure du sol. Le projet RURac s'inscrit dans la lignée de ces travaux.

Les travaux présentés dans ce mémoire testeront donc plusieurs hypothèses concernant l'influence de la structure et de la texture sur les teneurs en eau à la capacité au champ, au point de flétrissement permanent, et sur le réservoir utilisable. Ils traiteront également de l'influence des valeurs de potentiel utilisées pour représenter la capacité au champ et le point de flétrissement permanent.

## II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

### 1) Description du site d'étude

#### i. Localisation et présentation du SOERE ACBB

Le site d'étude (Figure 2) se trouve dans le département de la Vienne (86), plus précisément dans la commune de Lusignan, à environ 20 km au sud-ouest de Poitiers

Ce site, situé sur le site de l'INRA, fait partie du SOERE<sup>2</sup> ACBB Agro-écosystèmes, Cycles Biogéochimiques et Biodiversité depuis 2003. Le SOERE est constitué de trois sites permettant d'étudier, aux échelles annuelle et décennale, la dynamique des écosystèmes prairiaux sous l'action de l'homme et ses conséquences environnementales.

Le site de Mons-en-Chaussée (Picardie) permet l'étude des cycles biogéochimiques sur un système de cultures constitué par des rotations de cultures céréalières annuelles. Les sites de Theix et Laqueuille (Auvergne) sont dédiés aux grandes prairies permanentes. Enfin, le site de Lusignan constitue un intermédiaire entre ces deux systèmes ; il est consacré au suivi de polycultures et à l'impact de la fréquence de retournement des prairies sur les propriétés du sol.



Figure 2 : Localisation de Lusignan.

<sup>2</sup> Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement

## ii. Présentation du site d'étude

Ce site couvre 25 hectares mais seul environ un hectare concerne cette étude. La zone étudiée est découpée en 10 parcelles d'environ 27 m de large par 36 de long (10 ares) réparties en deux blocs parallèles (bloc 1 et bloc 2) (Figure 3). Le terrain est légèrement incliné vers le sud. Cinq types de successions culturales ont été appliqués sur chaque bloc, et réparties spatialement de façon à faire varier la distance entre ces traitements. Par la suite, ces différentes successions culturales seront nommées « traitements ».

Chaque parcelle est équipée d'un lysimètre, et, à différentes profondeurs : de bougies poreuses permettant le prélèvement de la solution du sol, de sondes d'humidité, de sondes de température et de tensiomètres. L'ensemble de ces données, qui permet une analyse détaillée des flux d'eau et de solutés dans le sol, est disponible pour répondre aux différents programmes de recherche travaillant sur le site de Lusignan.

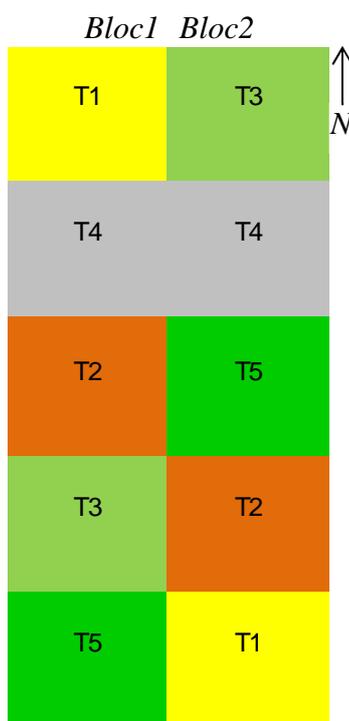


Figure 3 : Schématisation du parcellaire d'étude.

Le Tableau I présente les différents traitements appliqués sur les parcelles, depuis une rotation céréalière en continu (T1), jusqu'à une prairie permanente (T5). Le traitement 2 correspond à une succession « 3 années cultures - 3 années prairies », et le traitement 3 à une succession « 6 années prairies - 3 années cultures ». Les trois années de cultures respectent une rotation annuelle de trois céréales et toujours dans cet ordre : maïs, blé et orge. Ces derniers sont appliqués depuis 2005. Le traitement 4 existe mais n'est pas traité dans l'étude (les parcelles apparaissent grisées dans la Figure 3).

Tableau I : Description des différentes successions culturales c1, maïs; c2, blé et c3, orge.

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
T1 Cultures céréalières	c1	c2	c3	c1	c2	c3	c1	c2	c3	c1	c2
T2 Prairie 3ans, fauche et apport d'Azote	c1	c2	c3	prairie 3ans			c1	c2	c3		
T3 Prairie 6ans, fauche et apport d'Azote	prairie 6ans						c1	c2	c3		
T5 Prairie 20ans, fauche et apport d'Azote	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

### iii. Description des sols

Durant l'été 2004, les sols des différentes parcelles ont été décrits. Deux profils pédologiques ont été établis par parcelle, soit un total de 20 profils détaillés par l'équipe de l'INRA de Lusignan (Figure 4).

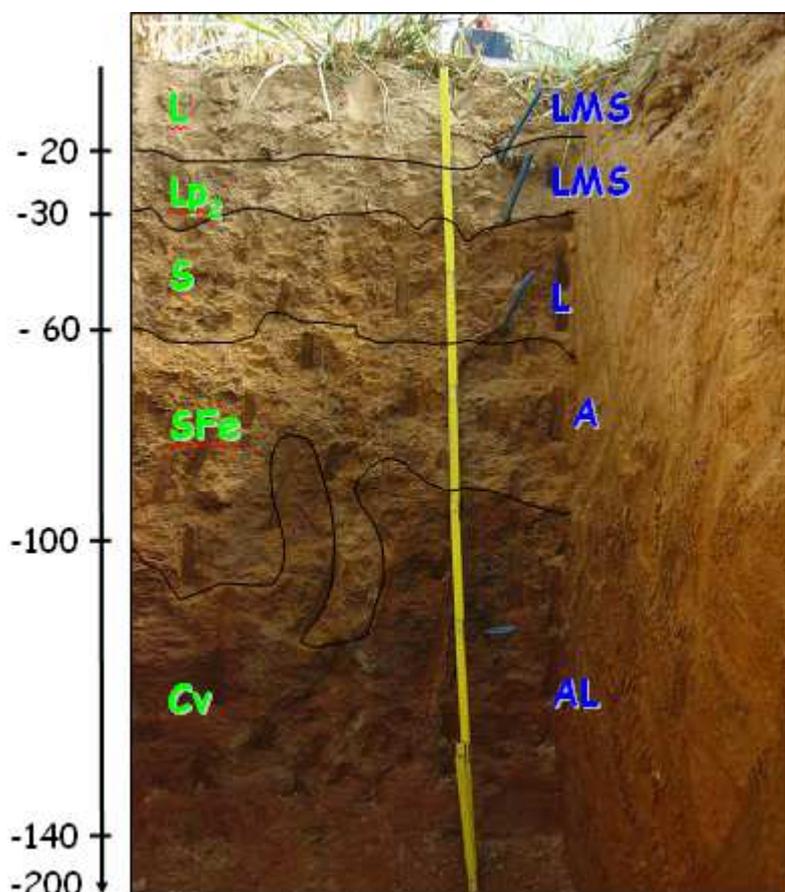


Figure 4 : Profil de sol observé sur le site de Lusignan : Brunisol saturé développé sur argile rubéfiée avec vestige de carapace ferrugineuse. Les lettres en vert à gauche représentent la désignation des horizons selon le référentiel pédologique ; les lettres en bleu à droite représentent la texture de chaque horizon.

Les sols des différentes parcelles présentent tous la succession d'horizons L/S/C :

- de 0 à ~30 cm, un horizon L de texture limono-sableuse, assez riche en matière organique.
- de ~30 à ~60 cm, un horizon S de texture limono-argileuse à argilo-limoneuse, plus compact et de couleur brune avec quelques taches ocres.
- de ~60 à ~80/120 cm, un horizon SFe, riche en argile, de couleur similaire à l'horizon S. La différenciation S/SFe n'est pas observable dans toutes les fosses.
- à partir de ~80/120 cm, un horizon Cv, de texture argilo-limoneuse.
- En dessous, un horizon M a parfois été décrit. Il s'agit du matériau parental.

Entre 80 et 115 cm de profondeur, les horizons S<sub>Fe</sub> et C<sub>v</sub> s'entremêlent et l'on observe des structures en forme de glosses. La teneur en argile augmente fortement avec la profondeur du profil pédologique. D'après le référentiel pédologique, ces sols peuvent donc être classés en tant que Brunisols (Baize, 2008).

#### 2) Prélèvement des échantillons

Les prélèvements ont été effectués en novembre 2012, après 8 ans de culture contrôlée, dans des conditions proches de la capacité au champ, c'est-à-dire au moment de l'équilibre entre les forces de gravité et les forces capillaires exercées par les particules du sol. Les prélèvements ont été réalisés dans l'horizon de surface L, entre 5 et 25 cm de profondeur, et dans l'horizon sous-jacent S, entre 35

et 45 cm de profondeur. Dans chaque horizon, des blocs ont été découpés et la structure a été conservée. Un soin particulier a été porté sur le prélèvement de l'horizon S pour ne pas le mélanger avec l'horizon de surface. Les blocs ont été stockés dans des boîtes hermétiques et celles-ci sont conservées en chambre froide pour limiter l'activité biologique et éviter la perte en eau.

Grâce aux analyses réalisées par l'équipe de Lusignan au moment de l'installation du site, on connaît la texture de tous les horizons dans lesquels ont été effectués les prélèvements. On constate que l'horizon sous-jacent S est plus argileux que l'horizon de surface L qui est plus sableux (Figure 5). On observe également une plus grande dispersion des points dans le diagramme de texture pour l'horizon S que pour l'horizon L.

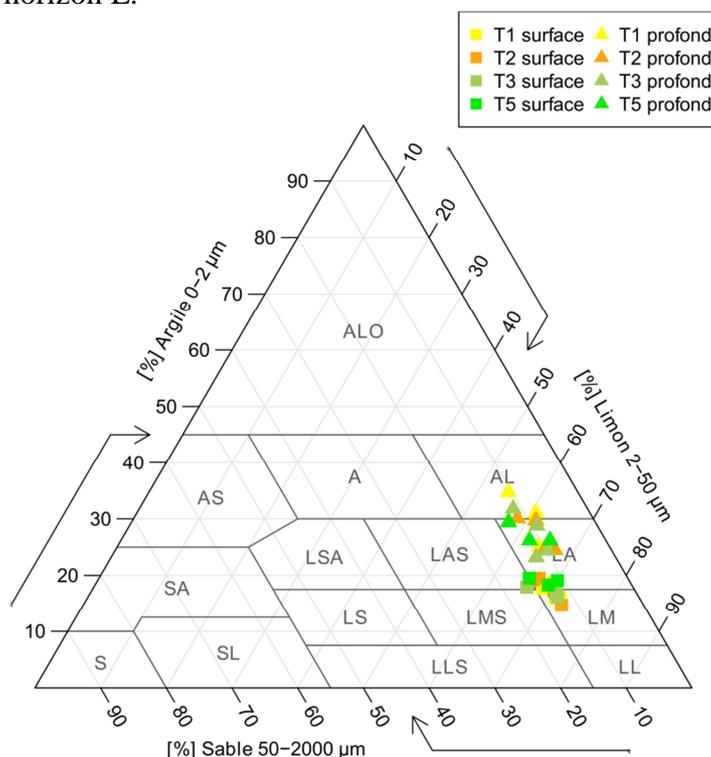


Figure 5: Texture des horizons L (surface) et S (profond) en fonction des différents traitements. LM : limon moyen, LAS: limono-sablo-argileux, LA: limono-argileux, AL: argilo-limoneux (Jamagne, 1967).

### 3) Expérimentations

#### i. Détermination de la rétention en eau sur mottes

Pour chaque valeur de potentiel étudié et pour chaque horizon, les teneurs en eau massiques ont été mesurées sur huit mottes centimétriques (~20 cm<sup>3</sup>).

Les mottes sont détachées du bloc initial manuellement. Un soin particulier est apporté à la sélection des mottes qui doivent contenir un minimum de racines (horizon de surface notamment) et un minimum de macroporosité lié à l'activité biologique (trous de vers de terre).

Les mottes sont mises en équilibre à une pression déterminée dans une presse à membrane ou presse à plaque de Richards (Richards, 1956, dans Frison, 2005) pendant sept jours (Figure 6).

Une pression connue est appliquée dans la chambre, ce qui crée un différentiel de pression par rapport à la pression atmosphérique. L'air comprimé ne peut s'échapper que par l'exutoire prévu en dessous de la plaque ou la membrane. La poussée qui s'opère permet l'évacuation de l'eau jusqu'à atteindre le point d'équilibre entre la pression de la chambre et la pression atmosphérique. Les manomètres de contrôle sont étalonnés tous les ans pour limiter les erreurs de mesures. Le protocole détaillé de l'expérimentation est donné en Annexe 1.

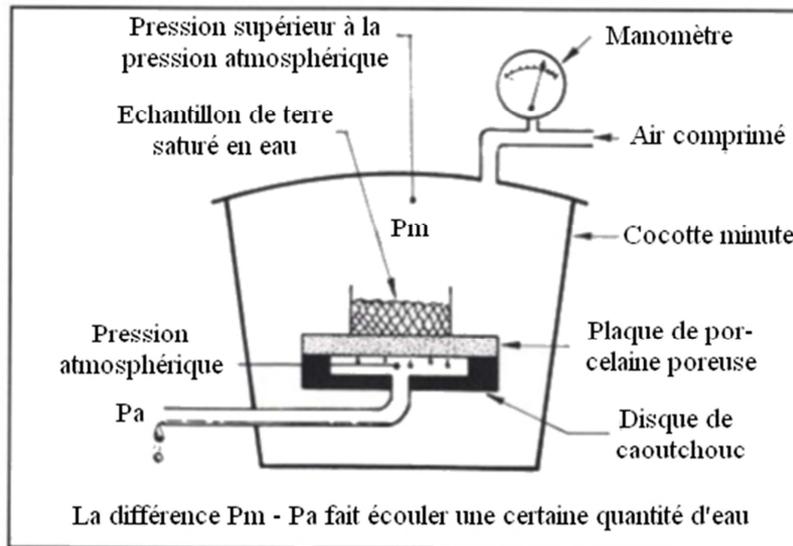


Figure 6 : Dispositif expérimental permettant la mesure de la rétention en eau sur des échantillons de sols (Soltner, 2003).

Après que les mottes ont été mises à l'équilibre dans les presses pendant sept jours, elles sont pesées, puis séchées à 105°C pendant 24h et repesées. On détermine ainsi leur teneur en eau massique ( $w$ , exprimée en g/100g) selon la formule suivante :

$$w = \frac{m_{hum} - m_{105}}{m_{hum}} \quad [1]$$

Où  $m_{hum}$  (g) représente la masse de la motte en sortie de presse et  $m_{105}$  (g) représente la masse de la motte après séchage à 105°C.

Les teneurs en eau massique ( $w$ ) ont été déterminées après sept jours de mise à l'équilibre dans les presses aux valeurs de potentiel matriciel suivantes :

- 100hPa ( $W_{2,0}$  à pF = 2), -330hPa ( $W_{2,5}$  à pF = 2.5), - 500hPa ( $W_{2,7}$  à pF = 2.7) ;
- 15 800hPa ( $W_{4,2}$  à pF = 4.2), -16 500hPa ( $W_{4,22}$  à pF = 4.22).

## ii. Détermination de la masse volumique apparente

La mesure de la masse volumique apparente par la méthode au pétrole a été réalisée sur toutes les mottes à toutes les valeurs de potentiel. Pour chaque valeur de potentiel et chaque horizon, la mesure de la masse volumique apparente été effectuée sur 8 mottes, afin d'obtenir une valeur moyenne, incluant l'hétérogénéité de l'horizon.

La masse volumique apparente a été mesurée par la méthode au pétrole (Monnier et al., 1973 dans Frison, 2005) qui consiste à laisser les mottes imbiber dans le pétrole pendant 6h pour les saturer. A l'aide d'un système de nacelle, la motte est plongée dans une cuve de pétrole, et, grâce au principe d'Archimède, la balance indique la masse de fluide déplacé. La formule utilisée est la suivante :

$$D_a = \frac{m_{105} * \rho_p}{m_p * \rho_w} \quad [2]$$

avec,  $D_a$  : la masse volumique apparente ( $cm^3.cm^{-3}$ ),  $m_{105}$ : la masse de l'échantillon séché à 105°C,  $m_p$  : la masse de pétrole déplacé par l'échantillon,  $\rho_p$  : la masse volumique du pétrole, et  $\rho_w$  : la masse volumique de l'eau. Un protocole détaillé rigoureusement les étapes à respecter (Annexe 2).

On notera que la masse volumique apparente des mottes ne représente pas la masse volumique apparente de l'horizon de sol d'où ces dernières sont issues, car on sous-échantillon la macroporosité (fissures, trous et galeries) en fabriquant des mottes. Cette masse volumique est donc généralement supérieure à la masse volumique de l'horizon. Par la suite, selon le contexte, on utilisera la masse volumique apparente mesurée sur mottes dans cette étude, ou la masse volumique de l'horizon déterminée par l'équipe du SOERE lors du creusement de fosses.

### iii. Statistiques

Des analyses statistiques ont été réalisées sur les teneurs en eau massique ( $w$ ) moyennes mesurées lors de nos expérimentations. Compte tenu du nombre d'individus présents dans chaque échantillon, un test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été effectué ainsi qu'un test bilatéral de Dunn.

Les analyses de variance (ANOVA) ainsi que les tests non-paramétriques de Kruskal-Wallis ont été effectués à l'aide du logiciel XLSTATS 2012.

## 4) Détermination du Réservoir Utilisable (RU)

A partir des valeurs d'humidité mesurées en laboratoire, on détermine le RU d'un horizon de sol et d'un profil de sol par les formules suivantes :

$$RU_{hor} = (w_{cc} - w_{pfp}) * \rho_{hor} * z_{hor} \quad [3]$$

$$RU_{profil} = \sum_1^n RU_{hor} \quad [4]$$

avec :  $RU_{hor}$ , le réservoir utilisable en mm d'un horizon de sol,  $w_{cc}$ , sa teneur en eau à la capacité au champ,  $w_{pfp}$  sa teneur en eau au point de flétrissement permanent,  $\rho_{hor}$  sa masse volumique apparente, et  $z_{hor}$  son épaisseur.  $RU_{profil}$  représente le RU du profil de sol.

Le réservoir utilisable est aussi exprimé en  $mm.cm^{-1}$  quand on veut comparer des valeurs sur des horizons ou des profils de sol d'épaisseurs différentes.

Par la suite, on exprimera soit le  $RU_{hor}$  en  $mm.cm^{-1}$ , soit le  $RU_{profil}$  en cm, ce dernier étant calculé pour une profondeur de 42 cm, soit la profondeur la plus faible de la base de l'horizon S.

## 5) Modélisation

La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel STICS (Brisson et al., 1998). Cet outil nous permet de faire varier le RU des horizons de sol des différentes successions culturales et de faire un suivi des propriétés hydriques sur un cycle cultural. Le but étant d'analyser l'influence de la valeur du RU, seul ce paramètre a été modifié lors de la modélisation.

Le support de la modélisation est un profil de sol représentatif du site de Lusignan constitué de quatre horizons. On renseigne les profondeurs d'apparition des horizons et leur épaisseur, leurs teneurs en eau massique à la capacité au champ et au point de flétrissement, et leur masse volumique apparente. La masse volumique apparente des horizons a été choisie parmi les données mesurées sur les profils pédologiques par l'équipe de l'INRA de Lusignan.

On choisit une année climatique modèle, pour laquelle on dispose des variables météorologiques nécessaires à l'utilisation du modèle (température journalière minimale, température journalière maximale, pluie journalière, évapotranspiration Penman, rayonnement global), soit l'année 1999-2000.

On modélise la croissance d'une culture de blé succédant à une culture de maïs. Les paramètres du modèle concernant la culture sont choisis parmi des paramètres classiques dans la région. Le blé est semé le 08/11/1999 et récolté en juin/juillet de l'année suivante, à maturité physiologique. On conduit un itinéraire technique classique dans la région, constitué de quatre apports d'azote au cours du cycle de croissance.

La simulation est initialisée au 01/10/1999, soit quand le sol est nu suite à la récolte de maïs, et terminée au 30/09/2000, soit quand le sol est nu suite à la récolte de blé.

Deux séries de simulations ont été analysées dans cette étude. La première consiste à analyser l'effet des successions culturales sur l'évolution annuelle de la teneur en eau, et la seconde consiste à évaluer, sur un même traitement, l'effet de la variation du réservoir utilisable. Nous avons ici choisi d'analyser, sur les traitements T1 et T3, l'effet d'un RU minimal (calculé à partir des teneurs en eau à pF 2,7 et 4,2) et d'un RU maximal (calculé à partir des teneurs en eau à pF2 et 4,22).

### III. RESULTATS

#### *1) Analyse de la teneur en eau au point de flétrissement permanent*

##### **i. Valeurs de potentiels hydriques prises en compte et hypothèses de travail**

Le point de flétrissement permanent est fixé, par les pédologues, à un potentiel constant : pF 4,2. Les teneurs en eau ont donc été mesurées après que les échantillons ont été équilibrés à ce potentiel, mais également pour la valeur pF = 4,22, valeur proposée comme point de flétrissement permanent de certaines plantes par les écophysiolgistes (Gobat et al, 2010).

Selon la loi de Jurin, les pores saturés à ces potentiels hydriques sont de diamètre inférieur ou égal à 0,2  $\mu\text{m}$ . Ils appartiennent donc au domaine de la porosité texturale, et dépendent de la texture du sol. Nous posons donc les hypothèses suivantes :

- Hypothèse 1 : la teneur en eau au point de flétrissement peut varier dans notre domaine d'étude si les variations de texture, et notamment de teneur en argile, sont suffisantes.
- Hypothèse 2 : la teneur en eau au point de flétrissement ne dépend pas de la structure du sol et n'est pas affectée par les traitements entre parcelles.

##### **ii. Présentation des données mesurées**

Les tableaux II et III présentent les teneurs en eau mesurées à pF 4,2 et pF 4,22 pour les différents traitements, sur chaque bloc, respectivement pour l'horizon L et l'horizon S. Pour les deux horizons étudiés, la teneur en eau à pF 4,22 est inférieure à la teneur en eau à pF 4,2<sup>3</sup>. Cependant, cette différence n'est statistiquement significative que pour les traitements T3 et T5, essentiellement dans l'horizon de surface (les variations de teneur en eau massique sont égales, respectivement, à 1,4 et 1,33 g/100g).

---

<sup>3</sup> sauf pour T2. On suspecte ici une erreur expérimentale de réglage des manomètres de pression ou une légère fuite lors de l'expérimentation.

**Tableau II : Teneurs en eau (g/100g) au point de flétrissement permanent pour l'horizon L. (Les lettres correspondent au résultat du test statistique de Kruskal-Wallis. Elles sont différentes lorsque la teneur en eau entre traitements à un potentiel donné sur un bloc donné, est significativement différente au seuil de 5%.)**

	Bloc 1			Bloc 2	
	pF 4,2	pF 4,22		pF 4,2	pF 4,22
Traitement 1	7.5 ±0.1 a	7.3 ±0.1 a	Traitement 1	8.7 ±0.1 a	8.6 ±0.1 a
Traitement 2	6.8 ±0.1 a	7.0 ±0.1 a	Traitement 2	7.6 ±0.1 a	7.7 ±0.1 a
Traitement 3	8.0 ±0.2 a	7.7 ±0.3 a	Traitement 3	7.9 ±0.3 b	6.5 ±0.2 a
Traitement 5	8.4 ±0.2 b	6.9 ±0.1 a	Traitement 5	7.4 ±0.1 b	6.3 ±0.1 a

**Tableau III : Teneurs en eau (g/100g) au point de flétrissement permanent pour l'horizon S. (Les lettres correspondent au résultat du test statistique de Kruskal-Wallis. Elles sont différentes lorsque la teneur en eau entre traitements à un potentiel donné sur un bloc donné, est significativement différente au seuil de 5%.)**

	Bloc 1			Bloc 2	
	pF 4,2	pF 4,22		pF 4,2	pF 4,22
Traitement 1	10.0 ±0.1 b	9.6 ±0.1 a	Traitement 1	12.4 ±0.2 a	12.1 ±0.1 a
Traitement 2	7.4 ±0.3 a	8.7 ±0.6 a	Traitement 2	9.9 ±0.2 a	10.0 ±0.2 a
Traitement 3	8.6 ±0.3 a	8.6 ±0.3 a	Traitement 3	12.4 ±0.2 a	12.4 ±0.3 a
Traitement 5	11.5 ±0.3 b	10.1 ±0.2 a	Traitement 5	7.5 ±0.1 a	7.5 ±0.2 a

### iii. Effet de la texture du sol sur la teneur en eau au point de flétrissement permanent

Nous avons conduit cette analyse pour l'horizon S<sup>4</sup>, où nous avons donc analysé le lien statistique entre :

- La teneur en eau au point de flétrissement permanent à pF 4,2 d'une part et,
- La texture du sol caractérisée par : 1) la teneur en argile, 2) la teneur en limons fins, 3) la teneur en limons grossiers, 4) la teneur en argile + limons fins et 5) la teneur en argile + limons fins + limons grossiers.

Aucune tendance ne se dégage de cette analyse statistique (Tableau IV). Toutes les valeurs de P sont hors du seuil de confiance de 5% sauf pour le lien entre la teneur en eau à pF 4,2 et la teneur en limons grossiers (Lg) où  $P = 0.03$  ; cependant, même dans ce cas, il n'y a pas de lien entre les variables ( $R^2 = 0.08$ ). Il n'est donc pas possible d'identifier une relation simple entre la teneur en eau au point de flétrissement permanent et la texture du sol, sur les horizons S du site de Lusignan, probablement parce que les différences de texture entre les parcelles sont faibles.

**Tableau IV : Résultats de l'ANOVA sur la teneur en eau massique à pF 4,2 en fonction de la texture du sol.**

	R <sup>2</sup>	p-value
A+Lf+Lg	0.06	0.06
A+Lf	0.00	0.99
Lg	0.08	0.03
Lf	0.01	0.49
A	0.01	0.59

<sup>4</sup> Nous n'avons pas conduit cette analyse pour l'horizon L, car nous ne disposions pas, pour cet horizon, des données de teneur en carbone dont on suppose qu'elles jouent un rôle non négligeable sur la teneur en eau au point de flétrissement permanent.

#### iv. Effet du traitement sur la teneur en eau au point de flétrissement permanent

Pour conduire cette analyse, les données des deux blocs ont été moyennées par traitement. Les données sont présentées ci-dessous, d'abord l'horizon L (Tableau V) puis l'horizon S (Tableau VI).

Comme au paragraphe ii, on observe que, excepté pour le traitement T2, la teneur en eau à pF 4,22 est toujours inférieure à la teneur en eau à pF 4,2. Elles ne sont significativement différentes que pour les traitements T3 et T5 de l'horizon L.

Pour les deux valeurs de potentiel, aussi bien en surface qu'en profondeur, les teneurs en eau sont toujours plus élevées pour les échantillons prélevés sur les sites T1 que sur les T5. Cependant, les différences ne sont pas toujours statistiquement différentes. L'analyse de la variance (Tableau VII) montre, en outre, que le traitement n'explique que 23% (respectivement 21%) de la variabilité de la teneur en eau au point de flétrissement permanent dans l'horizon L (respectivement l'horizon S).

**Tableau V : Teneur en eau massique moyenne (g/100g) dans l'horizon L. (Les lettres correspondent au résultat du test statistique de Kruskal-Wallis. Elles sont différentes lorsque les teneurs en eau comparées sont statistiquement différentes au seuil de 5%. Les lettres minuscules concernent l'effet traitement (lecture verticale du tableau) alors que les lettres majuscules concernent l'effet de potentiel (lecture horizontale mais non étudiée ici)).**

	pF 4.2			pF 4.22		
T1	8.1 ±0.2	b	A	8.0 ±0.2	b	A
T2	7.2 ±0.1	a	A	8.0 ±0.3	b	A
T3	8.5 ±0.2	b	B	7.1 ±0.2	ab	A
T5	7.9 ±0.2	ab	B	6.6 ±0.1	a	A

**Tableau VI : Teneur en eau massique moyenne (g/100g) dans l'horizon S. (Les lettres correspondent au résultat du test statistique de Kruskal-Wallis. Elles sont différentes lorsque les teneurs en eau comparées sont statistiquement différentes au seuil de 5%. Les lettres minuscules concernent l'effet traitement (lecture verticale du tableau) alors que les lettres majuscules concernent l'effet de potentiel (lecture horizontale mais non étudiée ici)).**

	pF 4.2			pF 4.22		
T1	11.2 ±0.3	bc	A	10.8 ±0.3	b	A
T2	8.7 ±0.4	a	A	10.4 ±0.3	b	B
T3	12.4 ±0.5	c	A	10.1 ±0.5	ab	A
T5	9.5 ±0.5	ab	A	8.6 ±0.4	a	A

**Tableau VII : Résultat de l'ANOVA sur la teneur en eau massique à pF4,2 en fonction de l'effet des successions culturales.**

	R <sup>2</sup>	p-value
Horizon L	0.23	0.001
Horizon S	0.21	0.002

### v. Effets conjoints de la texture du sol et du traitement sur la teneur en eau au point de flétrissement permanent

Les données présentées au paragraphe iii indiquent que l'on ne voit pas d'effet marqué de la texture seule sur les teneurs en eau mesurées au point de flétrissement permanent. Les données du paragraphe iv montrent, de même, qu'il y a peu d'effet dû au traitement (Tableau VII).

Si l'on analyse conjointement les deux effets (texture et traitement), 29 % de la variabilité de teneur en eau est expliquée, aussi bien en surface qu'en profondeur (avec un p respectif de 0.0005 et 0.0004).

Il y a une amélioration visible du modèle de la teneur en eau en considérant les deux facteurs et non seulement le traitement, ce qui montre qu'un troisième facteur, issu de l'interaction entre le traitement quel qu'il soit et la texture du sol et/ou un autre effet, joue un rôle sur la teneur en eau au point de flétrissement.

### vi. Effet dû à la variabilité spatiale des parcelles.

La variabilité de la teneur en eau est presque totalement expliquée par la position des parcelles dans le cas de l'horizon S (92% du modèle avec  $p < 0,0001$ ) et est fortement expliquée dans l'horizon L (60% du modèle pour  $p < 0.0001$ ).

La représentation en box plot (Figure 7) vient conforter l'analyse statistique présentée ci-dessus. La Figure 7 (A) montre que les données ne présentent pas d'organisation particulière quand elles sont classées par traitement alors qu'une certaine logique se distingue la Figure 7 (B), où les données sont ordonnées spatialement. En descendant dans la toposéquence, la teneur en eau massique chute brutalement puis augmente progressivement. Cette tendance souligne l'effet topographique visible dans le paysage avec une pente douce orientée vers le sud.

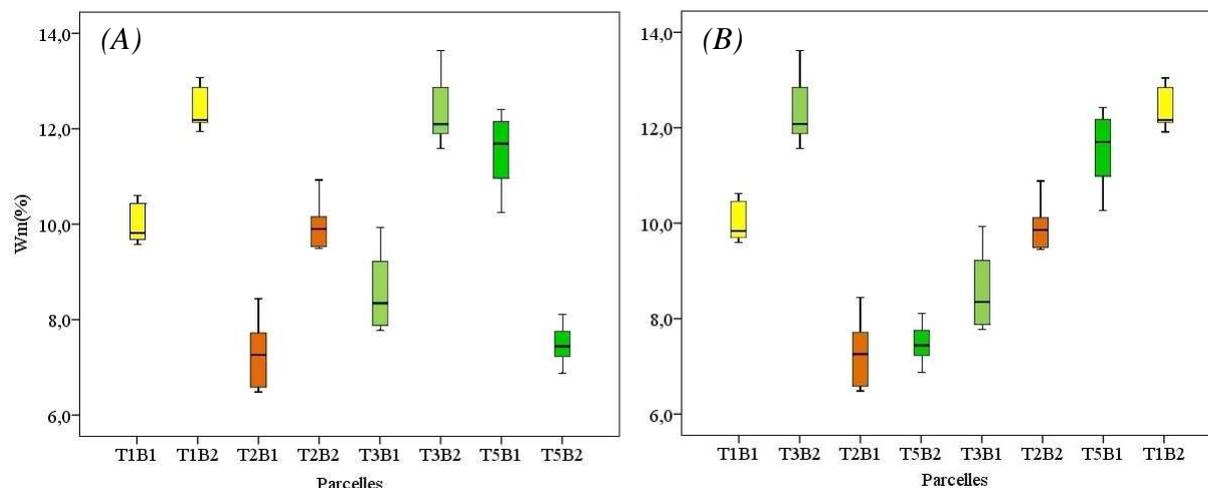


Figure 7 : Teneur en eau massique de l'horizon S, représentée en box-plot. En (A), les parcelles sont classées par traitement alors qu'en (B) elles sont organisées conformément à leur position spatiale dans le paysage.

On peut faire l'hypothèse que la pente favorise les écoulements dans la direction Nord-Sud, avec des dépôts de matière (argile notamment), qui s'accumulent en bas de pente.

### vii. Lien avec le réservoir utilisable

Pour synthétiser nos résultats, nous avons donc conduit une ANOVA à deux facteurs (le facteur « texture du sol » représenté ici par la somme des teneurs en argile et en limons fins et grossiers, et le facteur « traitement ») sur la teneur en eau volumique utilisée par la suite pour le calcul du réservoir utilisable.

Cette analyse croisée donne le pourcentage d'explication de la teneur en eau volumique à un seuil de 5% pour l'horizon L et l'horizon S. Les variabilités de la teneur en eau sont expliquées à 30% en profondeur et à 43% en surface (avec p respectif de 0.0004 et  $< 0.0001$ ). Comme montré dans

le test statistique en iii, la texture n'explique pas, seule, la variabilité de teneur en eau. L'effet du traitement est prépondérant dans ce test mais n'explique pas la majorité de la variabilité de teneur en eau volumique. On note cependant que l'effet « traitement » est beaucoup plus fort en surface (13% de différence). Le système étudié est donc complexe puisque presque 60 % de la variabilité de teneur en eau volumique est liée à d'autres paramètres que la texture et la succession culturale.

### **viii. Synthèse**

La teneur en eau au point de flétrissement, sur le site de Lusignan, est de l'ordre de 8 g/100g dans l'horizon L et légèrement plus élevée, environ 10 g/100g dans l'horizon S. Les valeurs de potentiel matriciel retenues pour caractériser le point de flétrissement permanent (pF 4,2 et pF 4,22) ne conduisent pas à des différences de teneurs en eau significatives, quelle que soit la succession culturale. Dans l'horizon S, la teneur en eau au point de flétrissement n'est pas corrélée à la texture de l'horizon et notre hypothèse 1 n'est donc pas confirmée, probablement parce que les variations de texture sur le site sont faibles. Cependant, la teneur en eau au point de flétrissement est d'autant plus élevée que le site de prélèvement est situé en position basse dans le paysage. Dans les horizons L et l'horizon S, la teneur en eau au point de flétrissement n'est pas liée non plus au type de succession culturale, ce qui nous permet de confirmer notre hypothèse 2.

## ***2) Analyse de la teneur en eau à la capacité au champ***

### **i. Valeurs de potentiels hydriques prises en compte et hypothèses de travail**

La capacité au champ représente le point d'équilibre entre les forces gravitaires et les forces capillaires qui s'exercent sur l'eau présente dans le sol ; autrement dit, c'est la teneur en eau maximale qu'un sol peut stocker.

Cette limite est difficile à estimer car elle diffère pour chaque sol en fonction de la structure et de la texture du milieu, mais elle prend également des valeurs différentes selon les disciplines. Les écophysiologistes fixent cette borne à pF 2,7 (-500hPa) (Whalley et al, 2005) alors que les pédologues la fixent à pF 2 (-100hPa) ou à pF 2,5 (-330hPa) (Bruand et al, 2004).

Nous testons ici les hypothèses suivantes :

- Hypothèse 3 : la teneur en eau à la capacité au champ ne dépend pas de la texture de l'horizon.
- Hypothèse 4 : la teneur en eau à la capacité au champ dépend de la structure du sol et peut donc être affectée par les traitements entre parcelles.
- Hypothèse 5 : l'installation d'une culture pérenne doit favoriser la structuration de l'horizon S par son activité racinaire, au contraire d'une culture annuelle. Les teneurs en eau à la capacité au champ doivent donc être classées selon l'ordre suivant :  $T1 < T2 < T3 < T5$ .

### **ii. Présentation des résultats expérimentaux**

Le Tableau VIII et le Tableau IX présentent les valeurs de teneur en eau massique mesurées sur des échantillons prélevés, respectivement, dans l'horizon L et dans l'horizon S pour les trois valeurs de potentiel hydrique identifiés comme étant représentatifs de la teneur en eau à la capacité au champ.

**Tableau VIII : Teneur en eau massique (g/100g) à la capacité au champ dans l'horizon L. (Les lettres correspondent au résultat du test statistique de Kruskal-Wallis. Elles sont différentes lorsque les teneurs en eau comparées sont statistiquement différentes au seuil de 5%. Les lettres minuscules concernent l'effet des successions culturales alors que les lettres majuscules concernent l'effet de potentiel).**

	Bloc 1					
	pF 2		pF 2,5		pF 2,7	
Traitement 1	18.9 ±0.3	B a	16.7 ±0.1	AB a	15.1 ±0.1	A a
Traitement 2	22.3 ±0.4	B c	19.1 ±0.3	AB b	16.3 ±0.3	A c
Traitement 3	20.5 ±0.3	B bc	18.9 ±0.1	AB b	17.4 ±0.3	A bc
Traitement 5	19.7 ±0.1	B ac	17.9 ±0.1	AB ab	16.1 ±0.2	A ab

	Bloc 2					
	pF 2		pF 2,5		pF 2,7	
Traitement 1	21.6 ±0.2	B a	18.7 ±0.3	AB ab	16.3 ±0.3	A a
Traitement 2	21.7 ±0.3	B ab	17.8 ±0.2	A a	17.4 ±0.2	A ab
Traitement 3	22.9 ±0.2	B b	19.2 ±0.4	A b	19.4 ±0.5	A b
Traitement 5	21.0 ±0.3	B a	18.2 ±0.3	A ab	16.9 ±0.1	A a

Dans l'horizon de surface L (Tableau VIII), quels que soient le traitement et le bloc, les teneurs en eau à pF 2,7 sont toujours inférieures aux teneurs en eau à pF 2,5<sup>5</sup>, elles-mêmes inférieures aux teneurs en eau à pF 2. Les teneurs en eau, à un potentiel donné, sont plus faibles pour les traitements T1 et T5 que pour les traitements T3 et T2 (sauf pour les valeurs à pF 2,5 du bloc 2). Excepté pour le traitement T2, les valeurs de teneurs en eau aux valeurs de pF 2, 2,5 et 2,7 sont toujours plus faibles pour les échantillons prélevés dans le bloc 1 que pour ceux prélevés dans le bloc 2.

Dans l'horizon S (Tableau IX), de même, les teneurs en eau à pF 2,7 sont toujours inférieures aux teneurs en eau à pF 2,5<sup>6</sup>, elles-mêmes inférieures aux teneurs en eau à pF 2. Excepté pour le traitement T2, les valeurs de teneurs en eau aux pF 2, 2,5 et 2,7 sont toujours plus faibles pour les échantillons prélevés dans le bloc 1 que pour ceux prélevés dans le bloc 2.

<sup>5</sup> Excepté pour le traitement T3 du bloc 2. Les mesures seraient à vérifier mais nous n'avons pas eu le temps de le faire pendant le stage.

<sup>6</sup> Excepté pour le traitement T1 du bloc 1.

**Tableau IX : Teneur en eau massique (g/100g) à la capacité au champ dans l'horizon S. (Les lettres correspondent au résultat du test statistique de Kruskal-Wallis. Elles sont différentes lorsque les teneurs en eau comparées sont statistiquement différentes au seuil de 5%. Les lettres minuscules concernent l'effet des successions culturales alors que les lettres majuscules concernent l'effet de potentiel).**

	Bloc 1		
	pF2	pF 2,5	pF 2,7
Traitement 1	19.0 ±0.2 B a	18.0 ±0.3 A a	18.1 ±0.2 A a
Traitement 2	22.6 ±0.2 B c	18.6 ±0.2 A a	17.9 ±0.2 A a
Traitement 3	21.1 ±0.2 B bc	18.9 ±0.2 A a	18.2 ±0.1 A a
Traitement 5	20.0 ±0.1 B ab	19.6 ±0.8 AB a	18.4 ±0.2 A a

	Bloc 2		
	pF2	pF 2,5	pF 2,7
Traitement 1	21.3 ±0.2 B ab	19.5 ±0.1 A b	19.1 ±0.3 A a
Traitement 2	21.0 ±0.3 B ab	19.5 ±0.1 AB b	18.5 ±0.3 A a
Traitement 3	21.9 ±0.1 B b	19.6 ±0.2 A b	19.0 ±0.1 A a
Traitement 5	20.9 ±0.1 B a	18.6 ±0.1 AB a	18.3 ±0.6 A a

### iii. Effet de la texture sur la capacité au champ

Pour tester notre hypothèse 3, nous avons décidé de mener une analyse statistique sur l'horizon S entre la teneur en eau à la capacité au champ mesurée à pF 2 et la texture du sol caractérisée par : 1) la teneur en argile, 2) la teneur en limons fins, 3) la teneur en limons grossiers, 4) la teneur en argile + limons fins et 5) la teneur en argile + limons fins + limons grossiers.

La régression linéaire effectuée donne des résultats qui n'ont aucun lien entre eux. La variabilité de la teneur en eau massique n'est pas du tout expliquée par la texture dans l'horizon S pour un potentiel hydrique de pF 2.

### iv. Effet du traitement sur la teneur en eau à la capacité au champ

Pour analyser l'effet de la succession culturale, nous avons calculé des moyennes des teneurs en eau massique à chaque potentiel sur les deux blocs (Tableau X).

Pour l'horizon de surface, quel que soit le traitement, la teneur en eau à pF 2,7 est toujours significativement inférieure à la teneur en eau à pF 2, avec des écarts de plusieurs points de teneur en eau (de l'ordre de 5% pour T1 et T2) (Tableau X). La teneur en eau à pF 2,5 est, de même, toujours significativement inférieure à la teneur en eau à pF 2 (jusqu'à 3,5 % pour T2). En revanche, les teneurs en eau à pF 2,7, ne sont significativement différentes des teneurs en eau à pF 2,5 que pour T1 et T5.

Les moyennes présentées (Tableau X) montrent que la teneur en eau à la capacité au champ est toujours inférieure, pour les échantillons prélevés sur les sites T1, à celle de ceux prélevés sur les autres sites, même si les différences entre valeurs ne sont pas toujours statistiquement significatives (pF 2 et pF 2,5). Pour les teneurs en eau mesurées à pF 2 et 2,5, les traitements T1 et T5 appartiennent au même groupe et présentent des teneurs en eau significativement différentes des traitements T2 et T3, même si les variations nettes de teneur en eau entre traitements restent faibles, toujours inférieures à 2%.

**Tableau X : Teneur en eau moyenne (g/100g) à la capacité au champ dans l'horizon L. (Les lettres correspondent au résultat du test statistique de Kruskal-Wallis. Elles sont différentes lorsque les teneurs en eau comparées sont statistiquement différentes au seuil de 5%. Les lettres minuscules concernent l'effet des successions culturales alors que les lettres majuscules concernent l'effet de potentiel).**

	pF 2			pF 2.5			pF 2.7		
T1	20.2 ±0.4	a C		17.8 ±0.3	a B		15.7 ±0.2	a A	
T2	22.0 ±0.3	b B		18.5 ±0.2	ab A		17.4 ±0.1	b A	
T3	21.7 ±0.4	b B		19.0 ±0.2	b A		18.5 ±0.4	b A	
T5	20.3 ±0.2	a C		18.1 ±0.2	a B		17.4 ±0.1	b A	

Pour l'horizon sous-jacent, quel que soit le traitement, les teneurs en eau à pF 2,5 et 2,7 sont toujours significativement inférieures à la teneur en eau à pF 2 (Tableau XI).

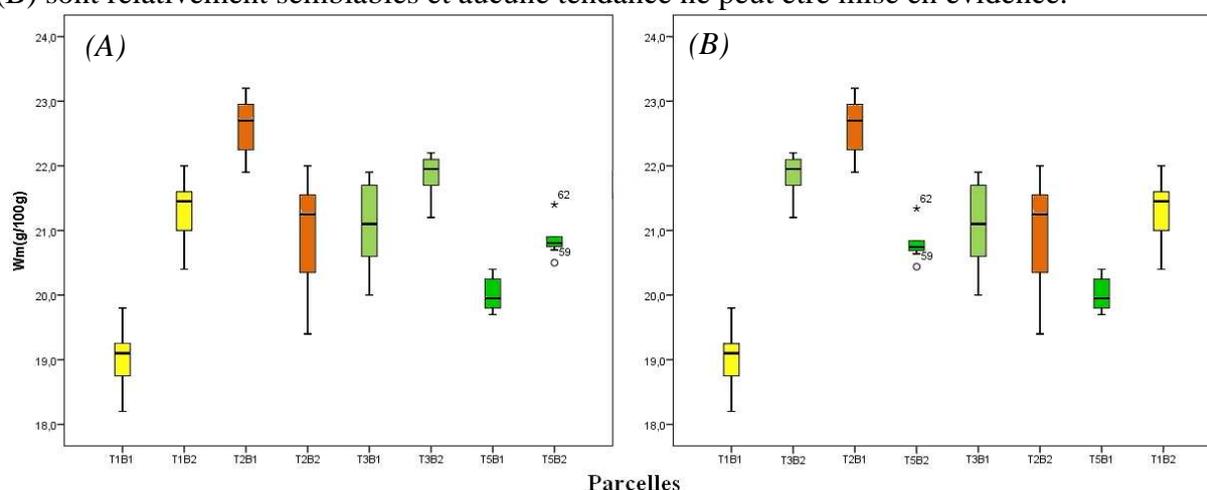
Pour le pF 2, les traitements T1 et T5, appartiennent au même groupe et leurs teneurs en eau sont significativement inférieures à celles des traitements T2 et T3, même si les écarts réels de teneurs en eau mesurées sont faibles (inférieurs à 2%). Pour les pF 2,5 et 2,7, les teneurs en eau ne sont pas statistiquement variables entre traitements.

**Tableau XI : Teneur en eau moyenne (g/100g) à la capacité au champ dans l'horizon S. (Les lettres correspondent au résultat du test statistique de Kruskal-Wallis. Elles sont différentes lorsque les teneurs en eau comparées sont statistiquement différentes au seuil de 5%. Les lettres minuscules concernent l'effet des successions culturales alors que les lettres majuscules concernent l'effet de potentiel.)**

	pF 2			pF 2.5			pF 2.7		
T1	20.2 ±0.3	a B		18.8 ±0.2	a A		18.6 ±0.2	a A	
T2	21.7 ±0.3	b B		19.0 ±0.2	a A		18.2 ±0.2	a A	
T3	21.5 ±0.2	b B		19.2 ±0.1	a A		18.6 ±0.1	a A	
T5	20.4 ±0.1	a B		19.1 ±0.5	a A		18.3 ±0.3	a A	

#### v. Effet du positionnement des traitements sur la capacité au champ

Nous avons également testé l'effet de la répartition des traitements dans l'horizon profond à pF 2 (Figure 8). Contrairement à ce que nous avons observé pour le point de flétrissement (Figure 7), à pF 2 la répartition des parcelles ne semble pas affecter la teneur en eau de l'horizon S. En effet, (A) et (B) sont relativement semblables et aucune tendance ne peut être mise en évidence.



**Figure 8 : Teneur en eau massique représentée en box-plot. En (A), les parcelles sont classées par traitement alors qu'en (B), elles sont ordonnées spatialement.**

## vi. Synthèse

La teneur en eau à la capacité au champ, dans les horizons L et S du site de Lusignan, ne dépend pas de la texture de l'horizon, ce qui confirme notre hypothèse 3. Elle varie significativement selon les valeurs de potentiel matriciel choisies pour représenter la teneur en eau à la capacité au champ (pF 2, pF 2,5 ou pF 2,7). La teneur en eau est de l'ordre de 20 g/100g à pF 2 pour les deux horizons étudiés et de 16 g/100g (respectivement 18 g/100g) dans l'horizon L (respectivement l'horizon S) à pF 2,7. On observe un effet significatif de la succession culturale sur la teneur en eau à la capacité au champ, ce qui confirme notre hypothèse 4. En revanche, notre hypothèse 5 s'avère erronée puisque les traitements T1 (succession de cultures annuelles) et T5 (culture pérenne) sont classés statistiquement dans un même groupe tandis que les traitements T2 et T3 (succession de cultures annuelles et d'une culture pérenne de durées variables) sont classés dans un autre groupe. Sur le site de Lusignan, c'est donc l'alternance de cultures annuelles et de cultures pérennes, et non la durée d'une culture pérenne qui permet de faire varier la teneur en eau du sol à la capacité au champ.

### 3) Détermination du réservoir utilisable

Les différences de teneur en eau entre pF 4,2 et pF 4,22 étant faibles pour l'ensemble des situations étudiées (paragraphe II.1.iv), nous retiendrons la valeur de pF 4,2 comme référence pour le point de flétrissement permanent dans le calcul du réservoir utilisable.

En revanche, nous avons gardé les trois valeurs (pF 2 ; pF 2,5 ; pF 2,7) comme valeurs de référence de la capacité au champ. Afin de pouvoir comparer les résultats entre eux, nous avons calculé le réservoir utilisable pour une profondeur de 42 cm, soit l'intégralité de l'horizon L puis l'épaisseur de l'horizon S limité au plus petit horizon S des données des profils pédologiques de 2004 (Tableau XII).

Dans le bloc 1, les traitements T1 et T5 se distinguent une nouvelle fois des traitements T2 et T3 par une valeur de RU inférieure de plus de 10 mm. La valeur du RU du traitement 2 à pF 2 dans le bloc 1 est notablement supérieure aux autres valeurs de RU (91,7 mm). Selon que l'on considère une borne supérieure à pF 2 ou une borne supérieure à pF 2,7, le réservoir utilisable varie de façon importante. Cette variation est plus faible dans le bloc 2 que le bloc 1 qui présente une amplitude maximum de 13.5 mm contre seulement 3 mm dans le bloc 2.

**Tableau XII : Réservoir utilisable (mm) des parcelles du site d'étude calculé pour une profondeur de 42 cm. (Sauf pour T5B2 où le RU a été calculé sur 40 cm).**

	Bloc 1			Bloc 2		
	pF 2	pF 2,5	pF 2,7	pF 2	pF 2,5	pF 2,7
T1	61.8	51.6	46.5	65.8	51.6	42.9
T2	91.7	70.7	62.9	77.4	59.3	55.5
T3	75.1	63.5	57.2	77.8	58.5	58.9
T5	61.3	53.9	44.2	76.5	62.0	56.6

#### 4) Analyse, par modélisation, des variations du Réservoir Utilisable : conséquences sur l'évolution du drainage et de la teneur en eau du sol au cours d'un cycle cultural

##### i. Objectifs de la modélisation et présentation des scénarios de simulation

Nous avons montré, dans les paragraphes précédents, que le RU pouvait varier de façon significative, à la fois en fonction des traitements, mais également en fonction des bornes que l'on choisit pour le calculer. Nous souhaitons désormais analyser par modélisation si ces variations ont des répercussions sur la teneur en eau du sol au cours d'une saison culturale. Nous avons ainsi choisi 8 scénarios de simulation. Pour chaque scénario, les conditions climatiques et les caractéristiques écophysiologicals de la culture (blé) sont maintenues constantes. Le profil de sol est représenté par la succession des quatre horizons décrits sur le terrain. Les horizons sont renseignés par leur épaisseur et leur masse volumique apparente. On initialise la simulation à la date du 01/01/1999, après une récolte de maïs et l'on considère que la teneur en eau initiale du sol est très faible, proche de la teneur en eau au point de flétrissement (Tableau XIII).

**Tableau XIII : Paramètres caractéristiques du sol pour la modélisation.**

Horizon	Profondeur d'apparition (cm)	Épaisseur (cm)	Masse volumique apparente (g.cm <sup>-3</sup> )	Teneur en eau		
				Teneur en eau initiale (% massique)	à la capacité au champ (% massique)	au point de flétrissement permanent (% massique)
L	0	25	1,4	12	<i>variable</i>	<i>variable</i>
S	25	35	1,45	10	<i>variable</i>	<i>variable</i>
SFe	60	35	1,55	12	24	12
Cv	95	30	1,6	12	24	12

Seules les teneurs en eau massiques à la capacité au champ et au point de flétrissement dans les horizons L et S sont modifiées à chaque simulation (Tableau XIV).

Les simulations de 1 à 4 permettent d'analyser l'effet de la succession culturale, en prenant comme bornes du RU les teneurs en eau utilisées classiquement, soit les teneurs en eau à pF 2 et pF 4,2.

Les simulations 5 à 8 permettent d'analyser l'effet de la variation des bornes du RU. Pour cela, nous avons choisi les traitements T1 et T3, qui appartiennent à des ensembles différents dans les analyses statistiques. Les simulations 5 et 6 représentent le RU maximum possible, calculé avec les teneurs en eau à pF 2 et pF 4,22. Les simulations 7 et 8 représentent le RU minimum possible, calculé avec les teneurs en eau à pF 2,7 et pF 4,2.

**Tableau XIV : Valeurs de la borne supérieure et de la borne inférieure choisies pour le calcul du RU pour les horizons S et L de chaque simulation. Indication de la valeur du RU (en mm) correspondante.**

			pF 2	pF 2,7	pF4,2	pF 4,22	RU
simulation1	T1	Horizon L	20.2		8.1		42.4
		Horizon S	20.2		11.2		45.4
simulation2	T2	Horizon L	22.0		7.2		51.8
		Horizon S	21.8		8.7		66.6
simulation 3	T3	Horizon L	21.7		7.9		48.3
		Horizon S	21.5		10.5		55.8
simulation 4	T5	Horizon L	20.3		7.9		43.5
		Horizon S	20.4		9.5		55.5
simulation 5	T1	Horizon L	20.2			8.0	43.0
		Horizon S	20.2			10.8	47.3
simulation 6	T3	Horizon L	21.7			7.1	51.4
		Horizon S	21.5			10.5	55.6
simulation 7	T1	Horizon L		15.7	8.1		26.6
		Horizon S		18.6	11.2		37.5
simulation 8	T3	Horizon L		18.4	7.9		36.6
		Horizon S		18.6	10.5		41.4

## ii. Effet du traitement cultural

On constate que le rendement ne varie pas de façon significative entre les traitements, même si les simulations 2 et 3 (représentant respectivement les traitements T2 et T3) conduisent à des rendements plus élevés, de l'ordre de 3 q/ha, que les simulations 1 et 4 (représentant respectivement les traitements T1 et T5) (Tableau XV). La quantité d'eau drainée cumulée à la base du profil de sol est inférieure, de l'ordre de 15 mm, pour les traitements T2 et T3, comparativement aux traitements T1 et T5 (Tableau XV). On notera que la récolte est d'autant plus faible que la quantité d'eau drainée cumulée est élevée.

**Tableau XV : Données synthétiques issues de la modélisation concernant l'effet des successions culturales.**

	Récolte (q/ha)	Drainage cumulé (mm)
simulation 1	147,2	178
simulation 2	151,1	161
simulation 3	150,3	164
simulation 4	147,7	176

La Figure 9 récapitule, pour les quatre horizons (L, S, SFe, Cv), la chronique de la teneur en eau pour les simulations 1 à 4 alors que la figure 10 récapitule la chronique de la teneur en eau pour les simulations 5 à 8 pour ces mêmes horizons.

L'horizon L, au contact avec l'atmosphère, est directement sous l'influence des précipitations et/ou de l'évapotranspiration, et présente ainsi une courbe très bruitée. Cependant l'évolution de la teneur en eau n'est pas corrélée directement avec le bilan P-ETP. En effet, on peut décrire l'évolution de la teneur en eau dans cet horizon selon quatre périodes :

- du 01/10/99 au 25/10/99, la teneur en eau augmente, jusqu'à la capacité au champ, car la teneur en eau initiale dans le profil de sol est faible et le profil de sol fonctionne en sol nu à cette période.

- du 26/10/99 au 29/02/2000, la teneur en eau dans l'horizon de surface est élevée, presque toujours égale à la teneur en eau à la capacité au champ. C'est la période de recharge hivernale, pendant laquelle la culture, semée le 08/11/1999 ne transpire pas suffisamment pour diminuer significativement la teneur en eau du sol.

- du 01/03/2000 au 01/07/2000, date de la récolte du blé, l'évolution de la teneur en eau dans le sol est complexe, sous la triple influence des précipitations, de l'évaporation et de la transpiration de la plante.

- à partir du 02/07/2000, la plante étant récoltée, la teneur en eau du sol augmente de nouveau, jusqu'au remplissage de l'horizon à la teneur en eau à la capacité au champ. La teneur en eau à la capacité au champ est atteinte dès le 09/07/2000, soit seulement 9 jours après la récolte, car l'année 2000 présente des pics de pluie importants à cette période.

Dans l'horizon S, on observe la même évolution que dans l'horizon L, avec cependant une dynamique plus lissée, et un retard à la fois au dessèchement pendant la période printanière lorsque le prélèvement racinaire est actif, et pendant la période de recharge estivale après la récolte. En effet, la teneur en eau à la capacité au champ n'est atteinte pour cet horizon qu'à la date du 30/08/2000. Ces observations, restent valables pour les horizons SFe et Cv.

La teneur en eau des horizons SFe et Cv est supérieure à la teneur en eau des horizons L et S (2% pour les maximum et 4 % pour les extrêmes), car leurs textures sont différentes et leur RU est supérieur. Même en période de prélèvement racinaire actif pendant le printemps, la teneur en eau dans ces horizons ne descend jamais en dessous de 20%. On observe enfin, que, par construction du modèle de bilan hydrique, la teneur en eau de chaque horizon ne peut être supérieure à sa teneur en eau à la capacité au champ. C'est la limite d'un tel modèle, qui ne représente pas les teneurs en eau très élevées.

Pour chaque horizon, les courbes d'évolution de la teneur en eau évoluent en phase au cours du temps, et seules leurs amplitudes changent. Pour les horizons S et L, les traitements se classent selon deux groupes : T1/T5 d'une part, et T2/T3 d'autre part, qui se distinguent nettement.

Dans l'horizon S, entre le 9 novembre 1999 et le 24 avril 2000, la teneur en eau du traitement T1 reste inférieure à la teneur en eau du traitement T5 (0.2 % de différence).

A partir de la deuxième quinzaine de mai environ, la tendance s'inverse et l'écart entre les courbes s'intensifie (0.7% d'écart) jusqu'au 30 août 2000, date à laquelle la teneur en eau est de nouveau égale la teneur en eau à la capacité au champ.

Dans l'horizon SFe, la teneur en eau est égale à la teneur en eau à la capacité au champ à la même date, le 9 décembre 1999, bien que l'effet des traitements ait été visible dès le 11 novembre, où l'on observe une séparation entre les deux groupes identifiés plus haut. En effet, les cultures sans alternance prairie/céréale ont une teneur en eau supérieure de 1% environ par rapport à la teneur en eau des cultures en alternance. Après avoir atteint la teneur en eau à la capacité au champ, toutes les courbes se superposent pour diverger à partir du 5 mai. T2 et T1 apparaissent très différents alors que T3 et T5 sont proches, avec une amplitude de 0,7% de teneur en eau entre les extrêmes. Le comportement des courbes dans l'horizon Cv est similaire au comportement des courbes décrit dans l'horizon précédent, mais plus atténué.

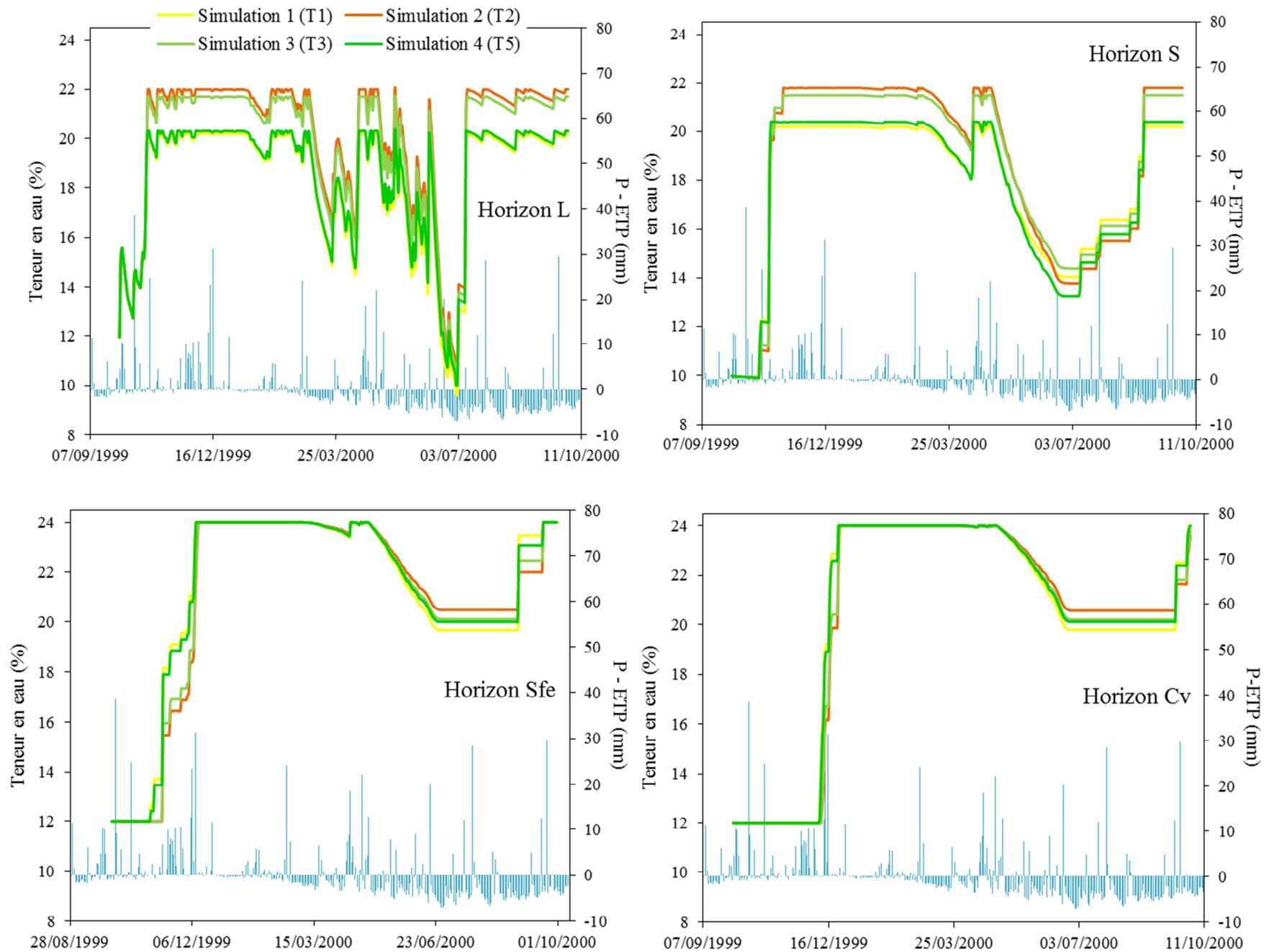


Figure 9 : Evolution de la teneur en eau pour chaque horizon pour les schémas de simulation 1 à 4, représentant les différentes successions culturales

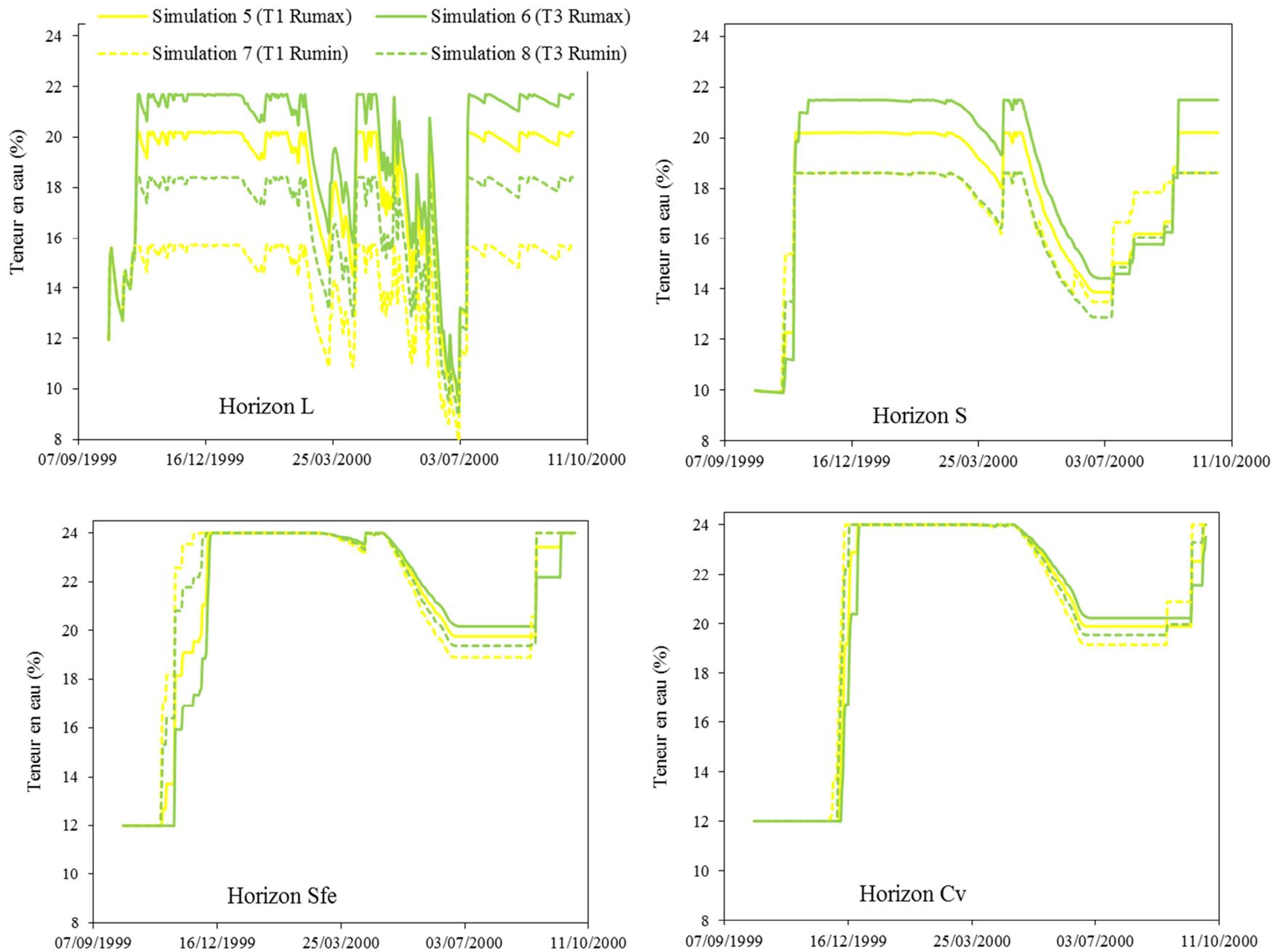


Figure 10 : Evolution de la teneur en eau pour chaque horizon selon les schémas de simulation 5 à 8 représentant les variations extrêmes du RU.

### iii. Effet de la taille du réservoir utilisable

Le mode de calcul du RU, c'est-à-dire le choix des bornes supérieure et inférieure, a une conséquence non négligeable, à la fois sur le rendement – où l'on observe une différence de 10 q/ha entre les scénarios extrêmes des simulations 6 et 7– et la quantité d'eau drainée cumulée – où l'on observe une différence de 47 mm d'eau entre ces mêmes scénarios (Tableau XVI).

Comme au paragraphe précédent, on observe, de façon accrue ici, que le rendement est d'autant plus faible que la quantité d'eau drainée cumulée est élevée, probablement parce que, dans ces situations, le RU est faible et la plante ne peut prélever suffisamment d'eau pour satisfaire ses besoins physiologiques.

**Tableau XVI : Données synthétiques issues de la modélisation concernant l'effet de la variation de la taille du réservoir utilisable.**

	Récolte (q/ha)	Drainage cumulé (mm)
simulation 5	147,2	178
simulation 6	150,3	164
simulation 7	139,9	211
simulation 8	143,8	197

Les allures générales des courbes décrites au paragraphe précédent – dynamique de moins en moins bruitée vers la profondeur ; atténuation des effets du climat vers la profondeur ; augmentation plus tardive de la teneur en eau en période post-récolte – restent vraies lorsque l'on analyse l'effet du mode de calcul du RU (Figure 10). De façon attendue, la teneur en eau dans l'horizon L est d'autant plus élevée que le réservoir utilisable de cet horizon est élevé. Cette observation reste valable pour les horizons plus profonds, mais s'atténue avec la profondeur car le RU du profil de sol étant calculé par addition des RU de chaque horizon, il est proportionnellement moins variable lorsque la profondeur du sol augmente.

L'analyse de l'évolution de la teneur en eau au cours du temps montre que, d'une manière générale, l'écart entre les teneurs en eau simulées pour des variations extrêmes du RU sur un traitement donné diminue avec la profondeur (Figure 10). En effet, pour le traitement T1, cet écart peut atteindre 4,8 points de teneur en eau dans l'horizon L, alors qu'il n'est que de 0,7 point dans l'horizon Cv.

Dans l'horizon S, on note que les courbes d'évolution de la teneur en eau pour les simulations 7 et 8, soit pour les RU minimum des horizons L et S, sont superposées du 01/11/1999 au 01/06/2000, soit pendant toute la période hivernale et une partie de la période de croissance végétale. Pendant la période - qui suit la récolte - de remplissage du réservoir pour atteindre la teneur en eau à la capacité au champ, du 03/07/2000 au 26/07/2000, la teneur en eau dans l'horizon S est la plus élevée pour le scénario 7, c'est-à-dire pour le scénario de RU minimal dans les horizons L et S correspondant au traitement T1. Cette seconde période de remplissage après la récolte est très différente pour les horizons SFe et Cv, lorsqu'on la compare à celle de l'horizon S. En effet, les courbes sont classées comme celles de l'horizon L, c'est-à-dire que les teneurs en eau sont d'autant plus élevées que le RU est important.

Pour les horizons où la teneur en eau à la capacité au champ est constante au cours des simulations, c'est-à-dire pour les horizons profonds SFe et Cv, la teneur en eau à la capacité au champ est atteinte plus rapidement lorsque le RU est faible dans les horizons de surface L et S, soit pour les simulations 7 et 8. Ce phénomène est flagrant pour l'horizon SFe et peu marqué pour l'horizon Cv.

#### iv. Synthèse

La modélisation nous a permis, à partir des mesures de RU obtenues en laboratoire, de simuler la teneur en eau des horizons sol du site de Lusignan sur une année culturale. L'effet de traitement (simulations 1 à 4) met en évidence la distinction entre le groupe de traitements T1 et T5, qui présente des teneurs en eau plus faibles et un drainage supérieur de 5 mm, et le groupe de traitements T2 et T3. Le choix des bornes de calcul du RU est très important. En effet, le drainage annuel varie de 47 mm entre les RU extrêmes. Les horizons de sol présentent des chroniques de teneur en eau de moins en moins bruitée avec la profondeur. Les différences de teneur en eau entre scénario diminuent avec la profondeur. On observe enfin que le rendement est d'autant plus faible que le drainage est élevé. Si l'on considère que le transfert de produits polluants vers la nappe est d'autant plus important que le drainage est élevé, on constate ici que performance agronomique et protection de l'environnement ne sont pas incompatibles.

### IV. SYNTHÈSE ET DISCUSSION

#### *1) Effet de la succession des cultures sur le Réservoir Utilisable ; conséquences agronomiques et environnementales*

Nos résultats montrent que la teneur en eau dans les horizons S et L au point de flétrissement permanent n'est pas influencée par des différences de structure qui pourraient être générées par un historique d'enracinement différencié entre parcelles ; ce résultat est attendu. En revanche, nos données montrent également qu'elle n'est pas influencée significativement non plus par des variations de texture entre parcelles, même si les parcelles situées en positions basses sur le site de Lusignan présentent une teneur en eau plus élevée que celle des autres parcelles.

La texture n'a également aucun effet sur la teneur en eau à la capacité au champ alors que les différences de structure du sol générées par des successions culturales différentes jouent un rôle non négligeable sur la teneur en eau à cette borne. Cependant, notre hypothèse selon laquelle la durée d'implantation d'une prairie conduirait à une amélioration du RU s'est avérée erronée. En effet, les parcelles de types T1 et T5 – soit les parcelles cultivées continûment en prairie ou en cultures – présentent des RU plus faibles que les parcelles de types T2 et T3 – soit les parcelles cultivées en alternance en prairies et en culture, avec des durées d'implantation de la prairie variables. Ces résultats sont cohérents avec les résultats préliminaires obtenus par différentes équipes de recherche ayant analysé le fonctionnement hydrique d'autres blocs du site de Lusignan (Cousin, communication orale, juin 2013). Il semblerait donc que l'alternance de périodes de cultures annuelles et de cultures pérennes favorise la structuration du sol et donc augmente la teneur en eau à la capacité au champ des deux premiers horizons du sol, ce qui a pour conséquence d'augmenter son réservoir utilisable. Cette augmentation du RU améliore le rendement de quelques quintaux à l'hectare et diminue la quantité d'eau drainée annuelle à la base du sol. Une telle situation permet donc de conjuguer la performance agronomique et des enjeux environnementaux de protection de la nappe.

#### *2) Quelles bornes choisir pour le calcul du Réservoir Utilisable ?*

Dans les travaux que nous avons présentés ici, nous avons choisi les valeurs des bornes permettant de calculer le RU sur la base des données de la littérature, et nous avons constaté, par notre exercice de modélisation, que le choix de ces bornes n'était pas sans conséquence sur la dynamique de la teneur en eau du sol au cours d'un cycle culturel, la quantité d'eau drainée à la base du sol, et même le rendement de la culture. Il s'agit donc désormais de proposer quelques recommandations qui permettraient à un agriculteur ou un gestionnaire d'espace de faire « le bon choix » pour calculer le réservoir utilisable.

Le potentiel hydrique au point de flétrissement permanent dépend à la fois des propriétés hydriques du sol et de la plante qui s'y développe. Il peut donc être raisonné sur la base d'un suivi d'humidité dans le sol, assorti d'un suivi de l'état de la culture. On peut ainsi identifier la teneur en eau à partir de laquelle la plante dépérit durablement. Toutefois, nos travaux montrent que cette teneur en eau varie peu entre pF<sub>4,2</sub> et pF<sub>4,22</sub>, soit pour un différentiel de potentiel de 750 hPa. Le choix moyen du potentiel à pF<sub>4,2</sub>, tel que préconisé par les pédologues, est donc raisonnable.

La valeur de l'humidité à la capacité au champ est plus difficile à proposer de façon générale. En l'absence de tout autre élément de décision, on retiendra la proposition de Bruand et al. (2004) qui fixent la valeur du potentiel à la capacité au champ à pF<sub>2</sub>. Cette proposition est réaliste pour des travaux qui viseraient, par exemple, à estimer le réservoir utilisable sur de grands espaces. A une échelle très locale, telle que celle des parcelles du site de Lusignan, on peut recommander d'analyser une chronique de teneur en eau mesurée sur le terrain en période hivernale en sol nu, par des mesures à la sonde TDR, par exemple. Lors d'une année climatique classique, la valeur d'humidité la plus fréquemment observée deux jours après une pluie représente la valeur à la capacité au champ.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Pour qu'une plante se développe, il lui faut des ressources minérales et de l'eau. Pendant son développement, la plante interagit avec le sol via la rhizosphère. Si le rôle de la structure du sol sur le développement racinaire et, plus généralement, sur la croissance de la plante est assez bien connu, certains auteurs ont mis en évidence des modifications à l'échelle locale des propriétés hydriques du sol ainsi que de la structure du sol. Ainsi, il paraît normal de s'intéresser aux modifications possibles d'une culture sur la teneur en eau et donc la structure du sol. Pour ce faire, nous avons analysé l'impact d'un temps de culture pérenne (prairie) sur un cycle de culture céréalière (maïs, blé et orge) dans le but d'anticiper les changements climatiques globaux.

Nos résultats montrent que malgré une variation faible de la texture sur le site, celle-ci n'influe pas sur le Réservoir Utilisable du sol. Au contraire, nous montrons une influence de la structure sur ce paramètre, en fonction des successions culturales. L'alternance de cultures céréalières et de prairies améliorerait le réservoir utilisable dans les deux premiers horizons de sol. L'évolution éventuelle du réservoir utilisable dans les horizons les plus profonds reste à analyser.

La modélisation met en évidence des différences i) de teneurs en eau dans le sol, ii) de drainage à la base du sol et iii) de rendement de la culture, au cours d'une année culturale, mais ces différences restent faibles, au moins pour l'année climatique que nous avons choisie. Il serait alors judicieux de conduire des simulations avec les paramètres de réservoir utilisable que nous avons proposés sur plusieurs années, pour discuter de l'évolution à long terme des caractéristiques mentionnées ci-dessus. De même, nos schémas de simulation pourraient être conduits dans des scénarios climatiques représentatifs des scénarios climatiques futurs probables, ce qui permettrait, à terme, de proposer des choix de successions culturales pertinents pour maintenir un niveau de rendement correct tout en minimisant l'impact de pollutions des nappes.

Enfin, nous nous étions également fixé comme objectif d'analyser l'effet du choix des bornes (teneur en eau à la capacité au champ et teneur en eau au point de flétrissement permanent) sur le calcul du Réservoir Utilisable. Nos résultats de modélisation, montrent, de façon assez théorique, qu'elles modifient sensiblement la valeur du RU et, au cours d'une année culturale, la teneur en eau du sol, la quantité d'eau drainée annuelle, et même le rendement de la culture. Il s'agit donc désormais de proposer une valeur réaliste de RU sur le site étudié. Une confrontation des valeurs de teneur en eau mesurées pour calculer le RU et des valeurs mesurées sur le terrain par un suivi diachronique guidera ce choix.

## BIBLIOGRAPHIE

Baize D., 2008. Référentiel pédologique. Quae, 480p.

Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Delecolle R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18 (5-6), 311-346.

Bruand A., Coquet Y., 2010. Les sols et le cycle de l'eau. In: "Sols et Environnement", Girard M.C., Walter C., Rémy J.C., Berthelin J., Morel J.L. (eds.), Dunod, Paris, chap. 15, 345-363.

Bruand A., Duval O., Cousin I., 2004. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO: Une première proposition combinant le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente. *Etude et Gestion des Sols*, 11(3), 323-332.

Bruand A., Tessier D., 1996. Structure et porosité du sol. *Encyclopédie des techniques agricoles*.

Czarnes S., Hallett P.D., Bengough A.G., Young I.M., 2000. Root- and microbial-derived mucilages affect soil structure and water transport. *European Journal of Soil Science*, 51, 435-443.

Dexter A.R., 1987. Compression of soil around roots. *Plant and Soil*, 97 (3), 401-406.

Dexter A.R., Czyz E.A., Richard G., Reszkowska A., 2008. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. *Geoderma*, 143, 243-253.

Frison A., 2005. Caractérisation des propriétés hydrodynamiques d'horizons hétérogènes de sol. Mémoire de Master, Université d'Orléans, FRA.

Génére V., Bourennane H., Nicoullaud B., Briand S., Dubus I., Girard X., Golaz F., Cousin I., 2012. A-L1 : l'estimation du Réservoir en eau Utilisable (RU) dans les sols : une analyse bibliographique. Livrable du projet FUI Aquateam.

Gobat J.M., Aragno M., Matthey W., 2010. Le sol vivant : base de pédologie, biologie des sols. Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR), 3<sup>ème</sup> édition, 817p.

Jamagne M., 1967. Bases et techniques d'une cartographie des sols. *Annales Agronomiques*, 18:142.

Matechera S.A., Dexter A.R., Alston A.M., 1992. Formation of aggregates around by plant roots in homogenized soils. *Plant and Soil* 142 (1), 69-79

Richards L.A., 1956. Samples retainers for measuring water retention by soil. *Soil Science Society of America Proceedings*, 20, 301-303.

Soltner D., 2003. Les bases de la production végétale, tome 1 : le sol et son amélioration. Sciences et techniques agricoles, 23eme edition, 472 p.

Whalley W.R., Riseley B., Leeds-Harrison P.B., Bird N.R.A., Leech P.K., Adderley W.P., 2005. Structural differences between bulk and rhizosphere soil. *European journal of Soil Science*, 56, 353-360.

Young I.M., 1995. Variation in moisture contents between bulk soil and the rhizosphere of wheat (*Triticum aestivum* L.cv. Wembley). *New Phytol*, 130, 135-139.

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Les différents états de l'eau en lien avec les forces s'appliquant sur l'eau et la porosité.....	4
Figure 2 : Localisation de Lusignan.....	5
Figure 3 : Schématisation du parcellaire d'étude. ....	6
Figure 4 : Profil de sol observé sur le site de Lusignan : Brunisol saturé développé sur argile rubéfiée avec vestige de carapace ferrugineuse. Les lettres en vert à gauche représentent la désignation des horizons selon le référentiel pédologique ; les lettres en bleu à droite représentent la texture de chaque horizon. ....	7
Figure 5: Triangle de texture des horizons L et S en fonction des différents traitements. LM : limon moyen, LAS: limono-sablo-argileux, LA: limono-argileux, AL: argilo-limoneux.....	8
Figure 6 : Dispositif expérimental permettant la mesure de la rétention en eau sur des échantillons de sols (Soltner, 2003). ....	9
Figure 7 : Teneur en eau massique représentée en box-plot. En (A), les parcelles sont classées par traitement alors qu'en (B) elles sont organisées conformément à leur position spatiale dans le paysage. ....	14
Figure 8 : Teneur en eau massique représentée en box-plot. En (A), les parcelles sont classées par traitement alors qu'en (B), elles sont ordonnées spatialement.....	18
Figure 9 : Evolution de la teneur en eau pour chaque horizon pour les schémas de simulation 1 à 4, représentant les différentes successions culturales .....	23
Figure 10 : Evolution de la teneur en eau pour chaque horizon selon les schémas de simulation 5 à 8 représentant les variations extrêmes du RU.....	24

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Description des différentes successions culturales c1, maïs; c2, blé et c3, orge.....	6
Tableau II : Teneurs en eau au point de flétrissement permanent pour l'horizon L. (Les lettres correspondent au résultat du test statistique de Kruskal-Wallis. Elles sont différentes lorsque la teneur en eau entre traitements à un potentiel donné sur un bloc donné, est significativement différente au seuil de 5%.) .....	12
Tableau III : Teneurs en eau au point de flétrissement permanent pour l'horizon S. (Les lettres correspondent au résultat du test statistique de Kruskal-Wallis. Elles sont différentes lorsque la teneur en eau entre traitements à un potentiel donné sur un bloc donné, est significativement différente au seuil de 5%.) .....	12
Tableau IV : Résultats de l'ANOVA sur la teneur en eau massique à pF 4,2 en fonction de la texture du sol. ....	12
Tableau V : Teneur en eau massique moyenne dans l'horizon L. (Les lettres correspondent au résultat du test statistique de Kruskal-Wallis. Elles sont différentes lorsque les teneurs en eau comparées sont statistiquement différentes au seuil de 5%. Les lettres minuscules concernent l'effet traitement (lecture verticale du tableau) alors que les lettres majuscules concernent l'effet de potentiel (lecture horizontale mais non étudiée ici).....	13
Tableau VI : Teneur en eau massique moyenne dans l'horizon S. (Les lettres correspondent au résultat du test statistique de Kruskal-Wallis. Elles sont différentes lorsque les teneurs en eau comparées sont statistiquement différentes au seuil de 5%. Les lettres minuscules concernent l'effet traitement (lecture verticale du tableau) alors que les lettres majuscules concernent l'effet de potentiel (lecture horizontale mais non étudiée ici). ....	13
Tableau VII : Résultat de l'ANOVA sur la teneur en eau massique à pF4,2 en fonction de l'effet des successions culturales.....	13
Tableau VIII : Teneur en eau massique à la capacité au champ dans l'horizon L. (Les lettres correspondent au résultat du test statistique de Kruskal-Wallis. Elles sont différentes lorsque les teneurs en eau comparées sont statistiquement différentes au seuil de 5%. Les lettres minuscules concernent l'effet des successions culturales alors que les lettres majuscules concernent l'effet de potentiel). ....	16
Tableau IX : Teneur en eau massique à la capacité au champ dans l'horizon S. (Les lettres correspondent au résultat du test statistique de Kruskal-Wallis. Elles sont différentes lorsque les teneurs en eau comparées sont statistiquement différentes au seuil de 5%. Les lettres minuscules concernent l'effet des successions culturales alors que les lettres majuscules concernent l'effet de potentiel). ....	17
Tableau X : Teneur en eau moyenne à la capacité au champ dans l'horizon L. (Les lettres correspondent au résultat du test statistique de Kruskal-Wallis. Elles sont différentes lorsque les teneurs en eau comparées sont statistiquement	

différentes au seuil de 5%.Les lettres minuscules concernent l'effet des successions culturales alors que les lettres majuscules concernent l'effet de potentiel). .....	18
Tableau XI : Teneur en eau moyenne à la capacité au champ dans l'horizon S. (Les lettres correspondent au résultat du test statistique de Kruskal-Wallis. Elles sont différentes lorsque les teneurs en eau comparées sont statistiquement différentes au seuil de 5%.Les lettres minuscules concernent l'effet des successions culturales alors que les lettres majuscules concernent l'effet de potentiel.) .....	18
Tableau XII : Réservoir utilisable des parcelles du site d'étude calculé pour une profondeur de 42 cm. (Sauf pour T5B2 où le RU a été calculé sur 40 cm). .....	19
Tableau XIII : Paramètres caractéristiques du sol pour la modélisation. ....	20
Tableau XIV : Valeurs de la borne supérieure et de la borne inférieure choisies pour le calcul du RU pour les horizons S et L de chaque simulation. Valeur du RU calculée pour tout le profil de sol pour chaque scénario de simulation.	21
Tableau XV : Données synthétiques issues de la modélisation concernant l'effet des successions culturales. ....	21
Tableau XVI : Données synthétiques issues de la modélisation concernant l'effet de la variation de la taille du réservoir utilisable.....	25

# **ANNEXES**

## Annexe 1: Protocole expérimental de mesure de la teneur en eau sur mottes.

 Unité UR 272	Mode opératoire	Réf : MO-MET-04
	Mesure des propriétés de rétention en eau sur des mottes	Version 2 date : 05/02/08 Page 1 / 4

### 1. Objet et domaine d'application

La méthode décrite est utilisée pour des potentiels matriciels variant de -10 à -15 000 hPa.

Propriétés de rétention en eau : variation de la teneur en eau des mottes en fonction du potentiel matriciel de l'eau  $h$  (hPa),  
exprimée en  $\text{g.g}^{-1} \Rightarrow W$   
ou en  $\text{m}^3.\text{m}^{-3} \Rightarrow \theta$

### 2. Documents de référence

- AFNOR, 1994 : Méthode de détermination du volume apparent et du contenu en eau des mottes. Norme X31-505, décembre 1992. In : *Recueil de normes françaises, Qualité des sols*. 172-183.
- Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darthout R., Jamagne M., 1996 : Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente. *Etude et Gestion des Sols*. 3, 1, 27-40.
- Hall D. G., Reeve M. J., Thomasson A. J., Wright V. F., 1977: *Water retention porosity and density of fields soils*. Technical Monograph. n° 9. Soil Survey of England & Wales, Harpenden.
- Stocle J., Veerman G. J., 1997 : Determination of the water retention characteristic using the pressure plate extractor. *Manual for soil physical measurements*, version 3.0. Technical Document. SC-DLO Wageningen. 6 p.
- Tessier D., Berrier J., 1979 : Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols. Observation de sols humides soumis à différents pF. *Science du Sol*, 1, 67-82.

### 3. Liste de diffusion et si nécessaire niveau de confidentialité

- l'Animateur Qualité
- le laboratoire de Physique du Sol

### 4. Hygiène et sécurité

- R.A.S.

### 5. Principe de la méthode

Des mottes en continuité hydraulique avec de l'eau à la pression atmosphérique sont soumises à une pression pneumatique constante à l'intérieur d'une enceinte. L'application d'une pression  $P$  permet de fixer le potentiel matriciel de l'eau à  $-P$ . Une fois l'équilibre atteint, la teneur en eau des mottes est déterminée en mesurant leur masse humide puis leur masse sèche après passage à l'étuve à 105°C.

	Rédacteur	Vérificateur	Approbateur
Nom :	Hervé Gaillard	Guillaume Giot	Guillaume Giot
Fonction :	TR	Animateur Qualité	Animateur Qualité
Visa :			

 Unité UR 272	<b>Mode opératoire</b>	Réf : <b>MO-MET-04</b> Version 2 date : <b>05/02/08</b> Page 2 / 4
	<b>Mesure des propriétés de rétention en eau sur des mottes</b>	

## 6. Matériels nécessaires

- enceinte de mise sous pression
- étuve
- compresseur
- batterie de détendeur à fuite
- manomètres
- bouteille d'azote
- balance

## 7. Réactifs (chimiques et biologiques)

- Néant

## 8. Contraintes de la méthode

Voir contenu du mode opératoire ci-dessous

## 9. Contenu du mode opératoire

Des blocs ou des mottes de dimensions décimétriques ( $10^2$  à  $10^3$  cm<sup>3</sup>) sont prélevés lorsque le sol est à une humidité proche de la capacité au champ.

Ces blocs sont conservés humides dans des récipients hermétiques et à 4°C (limitation de l'activité biologique).

### *Préparation de l'échantillon*

Les mottes de dimension centimétrique sont obtenues par fragmentation manuelle des blocs ou des mottes de dimension décimétrique prélevés. Il est souhaitable de veiller à l'élimination des fragments de petite taille qui peuvent adhérer aux mottes ainsi individualisées (utilisation d'un pinceau). Une douzaine de mottes sont ainsi préparées pour chaque valeur de potentiel matriciel.

### *Installation*

Les mottes sont disposées sur une pâte de kaolinite préalablement ressuyée à -100 hPa. Cette pâte a pour fonction d'établir une continuité hydraulique satisfaisante entre les mottes et la membrane ou la plaque poreuse. Une membrane synthétique est utilisée pour des pressions allant de 10 à 1000 hPa, la plaque poreuse pour les pressions supérieures. Le point de bulle de la membrane ou de la plaque est supérieur à la pression appliquée. De la sorte, elles laissent passer l'eau mais pas l'air.

### *Mesures*

Le dispositif est fermé. La pression est appliquée progressivement en particulier pour les pressions supérieures à 1000 hPa. Cette mise sous pression du dispositif permet de vérifier que la membrane ou que la plaque poreuse sont bien étanches à l'air (absence de bulles d'air dans les tuyaux d'évacuation de l'eau en excès).

La pression chasse l'eau des pores jusqu'à ce que les forces de succion exercées par les pores équilibrent la pression qui s'exerce sur les ménisques. Ainsi, lorsque la pression augmente, l'eau est chassée de pores de plus en plus petits.

A une pression  $P$  donnée, l'eau n'est plus présente que dans des pores de rayon équivalent inférieur ou égal à  $r$  (loi de Jurin) avec :

$$r = \frac{1500}{P}$$

$r$  étant exprimé en  $\mu\text{m}$  et  $P$  en hPa.

Les pressions appliquées sont en routine :

10 hPa (pF = 1)	33 hPa (pF = 1,5)
100 hPa (pF = 2)	330 hPa (pF = 2,5)
1000 hPa (pF = 3)	3300 hPa (pF = 3,5)
10000 hPa (pF = 4)	15000 hPa (pF = 4,2)

Les valeurs de pression comprises entre 10 et 1000 hPa sont obtenues à l'aide d'un compresseur et d'une batterie de détendeur à fuite. Les pressions supérieures sont obtenues à l'aide d'une bouteille d'azote.

Pour des mottes de dimensions centimétriques, 7 jours suffisent pour atteindre l'équilibre. L'enceinte est alors ouverte et les mottes sont débarrassées de la kaolinite qui peut rester collée à leur base, elles sont pesées individuellement, puis mises à l'étuve à 105°C. Après 24h, les mottes sont ramenées à la température ambiante du laboratoire dans un dessiccateur et de nouveau pesées afin de déterminer leur masse sèche.

### Calcul

La teneur en eau à chaque valeur de potentiel matriciel est donnée par la relation :

$$W = \frac{m_h - m_s}{m_s}$$

avec :

$W$  = teneur en eau massique à la valeur de pression  
( $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )

$m_h$  = masse de la motte humide (g)

$m_s$  = masse de la motte sèche à 105°C (g)

Les calculs et enregistrements des résultats se font avec les documents suivants :

- **E-MET-01** : Feuille de Calcul - Mesure de la rétention en eau pour un potentiel défini. Méthodologie: cellule à pression
- **E-MET-02** : Présentation Résultats – Prélèvement unique. Mesure de la rétention en eau à plusieurs potentiels. Méthodologie: cellule à pression
- **E-MET-03** : Présentation Résultats – Prélèvements multiples. Mesure de la rétention en eau à plusieurs potentiels. Méthodologie: cellule à pression
- **E-MET-04** : Feuille de Calcul - Mesure de la densité apparente par la méthode au pétrole

 Unité UR 272	<b>Mode opératoire</b>	Réf : <b>MO-MET-04</b> Version 2 date : 05/02/08 Page 4 / 4
	<b>Mesure des propriétés de rétention en eau sur des mottes</b>	

- **E-MET-05** : Présentation Résultats – Prélèvement unique. Mesure de la rétention en eau (cellule à pression) et de la densité apparente (méthode au pétrole)
- **E-MET-06** : Présentation Résultats – Prélèvements multiples. Mesure de la rétention en eau (cellule à pression) et de la densité apparente (méthode au pétrole)

## Notes

Aux faibles valeurs de pression, les mottes peuvent se réhumecter plus qu'elles ne se réhumectent *in situ*. Ceci se produit en particulier pour certains sols argileux, ceux-ci n'étant plus soumis aux contraintes mécaniques qui règnent *in situ*. On assiste à un phénomène de déconsolidation.

Le temps d'équilibre est un facteur important pour la qualité des déterminations. Sept jours sont généralement suffisants pour la plupart des sols. Pour des sols très argileux, il y a lieu de vérifier que 7 jours sont effectivement suffisants. Enfin, l'utilisation de mottes de plus grande taille a pour conséquence un allongement du temps nécessaire pour atteindre l'équilibre.

## Annexe 2 : Protocole expérimental de mesure de la masse volumique apparente par la méthode au pétrole.

 Unité UR 272	<b>Mode opératoire</b> <b>Mesure de la densité apparente par la méthode au pétrole</b>	Réf : MO-MET-01 Version 2 date : 05/02/2008 Page : 1 / 4
---	---	---

### 1. Objet et domaine d'application

Ce mode opératoire définit une méthode de détermination de la densité apparente d'échantillons de sol.

Densité apparente sèche  $D_a$  : masse d'un volume de sol séché à 105°C rapportée à la masse d'un même volume d'eau.

### 2. Documents de référence

- Monnier G., Stengel P., Fiès J.C., 1973 : Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. Ann. Agro. 24 (5), 533-545.
- AFNOR, 1994 : Méthode de détermination du volume apparent et du contenu en eau des mottes. Norme X31-505, décembre 1992. In : Recueil de normes françaises, Qualité des sols. 172-183
- Fiche de protocole : Mesure de la densité apparente par la méthode au pétrole, juillet 1998, par Ph Quélin et H. Gaillard

### 3. Liste de diffusion et si nécessaire niveau de confidentialité

- l'Animateur Qualité
- laboratoire de Physique du Sol

### 4. Hygiène et sécurité

R.A.S.

### 5. Principe de la méthode

La densité apparente est déterminée par immersion des échantillons (mottes, agrégats, ...) dans le kérosène. On mesure la force opposée à la poussée d'Archimède qui est exercée par le kérosène sur l'échantillon. Le kérosène présente l'avantage d'être "inactif" (molécules non polaires) vis-à-vis du sol (à la différence de l'eau), faiblement miscible dans l'eau, peu volatil à température ambiante (tension de vapeur faible). Il peut être aisément éliminé lors du séchage des échantillons à l'étuve.

### 6. Matériels nécessaires

- balance de précision METTLER PG503-S n° I22
- bécher
- nacelle suspendue à un statif
- étuve

### 7. Réactifs (chimiques et biologiques)

- kérosène

	Rédacteur	Vérificateur	Approbateur
Nom :	Hervé Gaillard	Guillaume Giot	Guillaume Giot
Fonction :	T.R.	Animateur Qualité	Animateur Qualité
Visa :			

## 8. Contraintes de la méthode

Néant

## 9. Contenu du mode opératoire

La méthode peut être appliquée soit à des échantillons secs, soit humides comme les mottes utilisées lors de la détermination des propriétés de rétention en eau.

### *Dispositif*

Le dispositif de mesure se compose d'une balance de précision ( $\pm 1\text{mg}$ ), d'un bécher rempli de kérosène, d'une nacelle (permettant de contenir l'échantillon) suspendue à un statif (figure 1).

### *Préparation*

① Les échantillons sont immergés dans une coupelle contenant du kérosène (type kerdane, distillat de pétrole) durant un temps suffisant pour que la porosité libre à l'air se sature de kérosène. Le temps nécessaire à la saturation est en moyenne de 5 à 6 heures. Elle peut être de quelques heures pour les échantillons proches de l'état saturé à environ 12 heures pour des échantillons secs à porosité élevée et constituée de pores de petite taille. Pour s'assurer que l'équilibre est atteint, il est nécessaire de vérifier que plus aucune bulle d'air ne s'échappe des échantillons, même lorsqu'on les déplace doucement dans le kérosène.

② On évacue le kérosène de la coupelle et on élimine le kérosène excédentaire à la périphérie de l'échantillon en l'essuyant dans du papier absorbant (type Kleenex). L'échantillon doit passer de l'aspect brillant à l'aspect mat. Dès que l'aspect mat est obtenu il faut cesser l'essuyage car on risque d'extraire du kérosène présent dans la porosité de l'échantillon.

### *Mesures*

③ La nacelle étant suspendue immergée et stabilisée dans le bécher de kérosène, on tare la balance (faire attention que la nacelle ne repose pas sur le fond du bécher, ni ne touche la paroi du bécher).

Relever la nacelle hors du bécher. Mettre l'échantillon dans celle-ci.

④ Immerger totalement l'ensemble. Après stabilisation, noter la masse indiquée par la balance. On retire la nacelle et l'échantillon du dispositif.

⑤ On recueille l'échantillon et on le place à l'étuve à  $105^{\circ}\text{C}$  pendant 48 h. (Le kérosène sera éliminé par évaporation à cette température.)

On détermine la masse sèche par pesée.

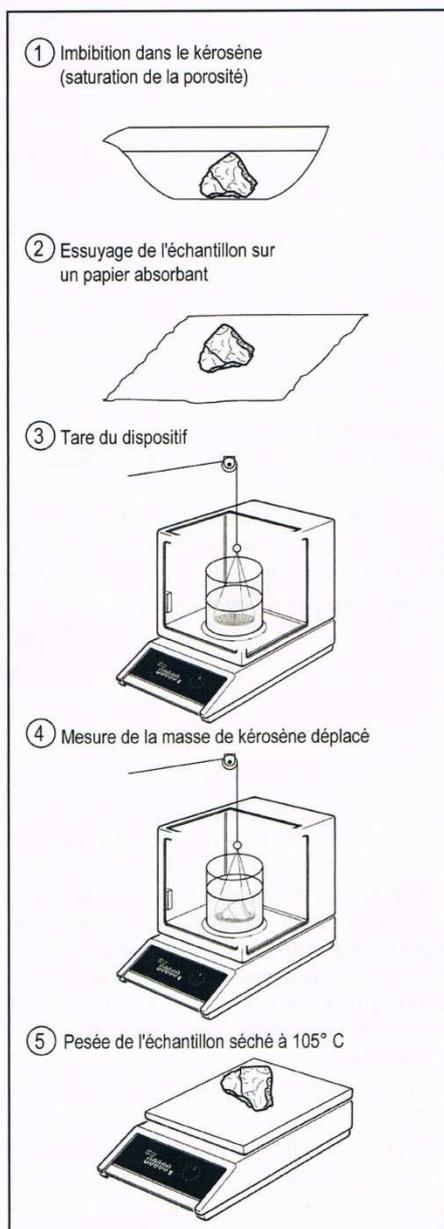


Figure 1 : Dispositif et différentes étapes du mode opératoire

### Calcul

La formule utilisée pour le calcul est de la forme :

$$Da = \frac{m_s \times \rho_p}{m_p \times \rho_w}$$

avec :

- $Da$  = densité apparente
- $m_p$  = masse de kérosène déplacé par l'échantillon (g)
- $m_s$  = masse de l'échantillon séché à 105 °C (g)
- $\rho_p$  = masse volumique du pétrole (généralement voisine de 0,782 g.cm<sup>-3</sup>)
- $\rho_w$  = masse volumique de l'eau (1 g.cm<sup>-3</sup>).

Les calculs et enregistrements des résultats se font avec les documents suivants :

- **E-MET-04** : Feuille de Calcul - Mesure de la densité apparente par la méthode au pétrole
- **E-MET-05** : Présentation Résultats – Prélèvement unique. Mesure de la rétention en eau (cellule à pression) et de la densité apparente (méthode au pétrole)
- **E-MET-06** : Présentation Résultats – Prélèvements multiples. Mesure de la rétention en eau (cellule à pression) et de la densité apparente (méthode au pétrole)

### Précision et difficultés de manipulation

La durée de l'immersion de la motte dans le kérosène doit être suffisante pour éviter que l'échantillon n'absorbe encore du kérosène lors de la mesure.

Lorsque les échantillons sont soumis à imbibition dans le kérosène durant de nombreuses heures, il faut veiller à recouvrir le récipient contenant le kérosène avec un film plastique pour éviter que de l'eau présente dans les échantillons soit éliminée par évaporation. En effet, une faible proportion d'eau est miscible dans le kérosène, et l'eau a une tension de vapeur très supérieure à celle du kérosène. Il en résulte que l'eau contenue dans le kérosène s'évapore beaucoup plus rapidement que ce dernier. Ainsi, si l'on n'y prend pas garde, on peut assister à un dessèchement des échantillons, l'eau allant de ceux-ci vers le kérosène, puis du kérosène dans l'atmosphère par évaporation.

L'élimination du kérosène à la périphérie de l'échantillon est l'opération la plus délicate, car il faut éviter d'extraire du kérosène de la porosité de l'échantillon.

La masse volumique du kérosène doit être vérifiée périodiquement ; elle est déterminée à l'aide d'un objet de volume connu avec précision (bille calibrée).

Bien que l'eau soit très faiblement miscible avec le kérosène, il est nécessaire d'utiliser du kérosène dans lequel on a ajouté une petite quantité d'eau de façon à éviter que de l'eau présente dans les échantillons ne soit absorbée par le kérosène.

## Résumé

La plante a besoin, pour se développer, d'eau et de nutriments minéraux qu'elle puise dans le sol. La structure du sol, qui conditionne les transferts d'eau et de nutriments, influence donc le développement racinaire. En retour, il est possible que la croissance racinaire affecte, à moyen terme, la structure et les propriétés hydriques du sol. Le premier objectif de ce travail était donc d'analyser l'effet de différentes successions culturales sur le Réservoir Utilisable (RU) des deux premiers horizons d'un sol. Des mesures en laboratoire des teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent ont été réalisées sur des échantillons de sol prélevés sur le SOERE ACBB de Lusignan dont les parcelles présentent des successions cultures / prairies de durées variables. Nous avons montré que, après huit années d'installation du site, les sols sous les différentes successions culturales ont la même teneur en eau au point de flétrissement permanent, mais pas à la capacité au champ, ce qui conduit à des valeurs de RU différenciées. Les sols cultivés continuellement soit en céréales soit en prairies ont un RU inférieur aux sols cultivés alternativement en céréales et en prairies. Ces différences de RU sont suffisantes pour que i) la dynamique de la teneur en eau dans le sol, ii) le drainage annuel à la base du sol et iii) le rendement d'une culture, tous trois estimés par le modèle STICS au cours d'un cycle cultural, soient significativement différents. Le second objectif de ce travail concernait le choix des potentiels hydriques à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent. Nous avons montré que les teneurs en eau n'étaient pas significativement différentes à pF4,2 et pF4,22, mais qu'elles étaient significativement différentes pour pF2, pF2,5 et pF2,7.

Mots clés : propriétés hydriques, teneur en eau, structure du sol, réservoir utilisable, rétention en eau sur mottes, modèle STICS, drainage.

## Abstract

To grow, the plants need, water and mineral nutrients, that are taken from the soil. Soil structure, which determines the transfer of water and nutrients, thus influences root development. However, it could be possible that root growth affects the structure and properties of the soil water. The first objective of this study was therefore to analyse the effect of different crop sequences on the Available Water Content (AWC) of the first two horizons of a soil. Laboratory measurements of water content at field capacity and permanent wilting point were performed on soil samples taken from the SOERE ACBB Lusignan whose plots present series of crops / grasslands of varying durations. We showed that after eight years from the beginning of the experiment, the soils under different crop sequences have the same water content at permanent wilting point, but not at field capacity, which leads to values of different AWC values. The soils that were continuously cultivated either with grain or with grasslands exhibited AWC values lower than those grown alternately in cereals and in grassland. These differences in AWC were large enough so that i) the dynamics of the water content in the soil, ii) the annual drainage at the base of the soil and iii) the crop yield, all the three estimated over a crop cycle by the STICS model, were significantly different. The second objective of this work concerned the selection of water potentials at field capacity and permanent wilting point. We have shown that the water contents were not significantly different at pF4,2 and pF4,22, but were significantly different for pF2, pF2,5 and pF2,7.

Key words: hydric properties, water content, soil structure, available water content, water retention on soil clods, STICS model, drainage.