
Comment réagissent les paramètres hydrologiques de systèmes soumis à différents itinéraires agricoles ?

Auteur : Renard, Anne-Catherine

Promoteur(s) : Degré, Aurore; Dumont, Benjamin

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/16659>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Comment réagissent les paramètres hydrologiques de systèmes soumis à différents itinéraires agricoles ?

ANNE-CATHERINE RENARD

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT

ANNÉE ACADÉMIQUE 2022 - 2023

PROMOTEURS : PR. AURORE DEGRÉ & CLÉMENCE PIRLOT

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

Comment réagissent les paramètres hydrologiques de systèmes soumis à différents itinéraires agricoles ?

ANNE-CATHERINE RENARD

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT

ANNÉE ACADÉMIQUE 2022 - 2023

PROMOTEURS : PR. AURORE DEGRÉ & CLÉMENCE PIRLOT

Remerciements

Ce mémoire est l'aboutissement de plusieurs mois de travail, mais aussi de plusieurs années d'étude. C'est pourquoi, je voudrais commencer en exprimant ma gratitude à tous ceux sans qui je n'aurais pu y aboutir.

Tout d'abord, j'aimerais remercier Madame Aurore DEGRÉ, ma promotrice, pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser un TFE qui correspondait si bien à mes attentes. Je voulais vous remercier pour m'avoir permis de tracer ma route tout en me guidant de loin, pour votre disponibilité infaillible, vos conseils et votre expertise.

J'aimerais ensuite remercier Clémence PIRLOT pour m'avoir laissé participer un petit peu à ton projet, pour avoir construit ce travail avec moi et pour m'avoir épaulée tout du long. Merci pour ta vision, tes conseils et pour ta présence (jour de réveillon et vacances comprises).

Ensuite je souhaiterais remercier l'axe Echange Eau-Sol-Plante et les habitants du Topo. Tout particulièrement Stéphane BECQUEVORT pour ton soutien et ta patience pour l'expérimentation et Katia BERGHMANS pour ta présence et tes conseils judicieux.

Merci à mes collègues de bureau, Cailloux et Léon! Ce quadri aura été rythmé par le stress, les insomnies et les semaines interminables, mais sans vous et nos pauses café pour rythmer mes journées, je n'y serais jamais arrivé. Et merci à Chloé pour avoir amené l'esprit de Noël dans notre humble bureau.

Une pensée à vous, les amis, les rencontres, l'AG et l'Office. Vous m'avez parfois éloignée du droit chemin mais toujours avec beaucoup de bienveillance.

Je sais qu'un merci ne sera pas suffisant pour exprimer ma gratitude, mais je ne peux finir l'aventure sans vous citer, vous, mes acolytes STE. Merci à Rem's pour tes connaissances techniques; Merci à Nat' pour avoir su parler Python; à Tom pour m'avoir fait voyager; à Capounet d'avoir partagé ta demeure; à Jésus pour avoir illuminé de ta sainte présence la voie de la réussite; and Last but not least, merci à toi Zoé d'avoir fait de moi une Indienne dans la ville. Merci à vous de m'avoir attendue de l'autre côté de la vie adulte.

Le dernier remerciement que je souhaiterais adresser est à ma famille. Merci à vous pour m'avoir soutenue et accompagnée dans tous ces projets farfelus, pour avoir toujours été là, merci à Anouck pour ton regard critique, et à Adelin!

Abstract

The climate crisis LINNEROOTH-BAYER et al., 2015 as well as the intensive exploitation of soils PARK et al., 2018 constitute a major pressure on the environment (soil, air, water). Therefore, understanding and managing the water status of the soil is essential. One method to achieve this is the use of soil water retention curves (WRC).

The present study is part of a project dealing with the value and resilience of innovative rotation systems (vegan, agro-ecological and off-soil). It focused on the impact of these agronomic methods on soil hydrological dynamics.

For this purpose, different theoretical WRCs such as class FPTs (HYPRES and ROSETTA 1) and continuous FPTs (ROSETTA 2, 3 and EU-HYDI) were evaluated and compared. The EU-HYDI WRC were then compared with i) experimental WRC determined by an evaporation method (SCHINDLER et MÜLLER, 2006) ; ii) continuous measurements taken *in situ*. The results obtained highlight the general overestimation of the theoretical EU-HYDI WRC, the technical inability to visualise soil dynamics below the sensor threshold value and the mediating position of the experimental information.

Subsequently, the continuous information collected was analysed for the three horizons (30, 60 and 90 cm) of each plot studied at different time scales : bi-annual, annual and over specific periods determined by climatic and agronomic events. This highlighted the important impact of annual rainfall on the soil retention profile as well as the influence of agronomic itineraries.

Finally, this same continuous information and the observed trends were compared with the agronomic yields of the plots. While agronomic yields are higher for the vegan and agroecological systems, water storage capacities seem to be higher for the vegan system. The phyto soilless system remains undetermined due to its erratic nature. However, these conclusions are only a preliminary view of the subject. Modelling based on different rainfall intensities for each situation studied is recommended.

Résumé

La crise climatique LINNEROOTH-BAYER et al., 2015 ainsi que l'exploitation intensive des sols PARK et al., 2018 constituent une pression importante sur l'environnement (sol, air, eau). C'est pourquoi la compréhension et la gestion du statut hydrique du sol sont primordiales. Une méthode pour y parvenir est l'emploi de courbes de rétention en eau des sols (CRE).

La présente étude s'inscrit dans un projet traitant de l'intérêt et de la résilience de systèmes de rotations innovants (végétaliennne, agroécologique et hors sol). Elle s'est orientée sur l'impact de ces méthodes agronomiques sur les dynamiques hydrologiques des sols.

Pour ce faire, différentes CRE théoriques tels que des FPT de classe (HYPRES et ROSETTA 1) et des FPT continues (ROSETTA 2, 3 et EU-HYDI) ont été évaluées et comparées. Les CRE EU-HYDI ont ensuite été mises en relation avec i) des CRE expérimentales déterminées par une méthode d'évaporation (SCHINDLER et MÜLLER, 2006) ; ii) des mesures continues prises *in situ*. Les résultats obtenus mettent en exergue la surestimation générale de la CRE théorique EU-HYDI, l'incapacité technique de visualiser la dynamique des sols en dessous de la valeur seuil des capteurs et la position médiatrice des informations expérimentales.

Par la suite, les informations continues relevées *in situ* ont été analysées pour les trois horizons (30, 60 et 90 cm) de chaque parcelle étudiée à différentes échelles temporelles : bi-annuelle, annuelle et sur des périodes spécifiques déterminées par les événements climatiques et agronomiques. Ceci a mis en évidence l'impact important de la pluviométrie annuelle sur le profil de rétention des sols ainsi que l'influence des itinéraires agronomiques.

Pour finir, ces mêmes informations continues et les tendances observées ont été confrontées aux rendements agronomiques des parcelles. Alors que les rendements agronomiques sont plus importants pour les systèmes végétalien et agroécologique, les capacités de stockage hydrique semblent plus importantes pour le système végétalien. Le système hors sol phyto reste indéterminé de par leur caractère erratique. Ces conclusions ne sont toutefois qu'une vision préliminaire du sujet. Une modélisation axée sur différentes intensités de pluie pour chaque situation étudiée est recommandée.

Table des matières

Remerciements	i
Abstract	ii
Résumé	iii
1 INTRODUCTION	1
1.1 Contexte de l'étude	1
1.2 Courbe de rétention	2
1.3 Objectifs	5
2 Matériel & Méthodes	6
2.1 Projet Agriculture Is Life For Water Quality (AIL4WaterQuality)	6
2.2 Caractéristiques théoriques des sols	7
2.3 Échantillonnages	8
2.3.1 Granulométrie	9
2.3.2 Densité apparente et porosité	10
2.3.3 Ku-pF	11
2.3.4 Préparation des échantillons	12
2.3.5 Traitement des résultats de laboratoire	13
2.4 Fonctions hydrodynamiques théoriques	14
2.4.1 ROSETTA	14
2.4.2 HYPRES	15
2.4.3 EU-HYDI	15
2.5 Ajustement des données de terrain	16
2.6 Recherche des événements susceptibles de modifier la structure du sol	17
2.6.1 Données pluviométriques	17
2.6.2 Données agronomiques	17
2.7 Comparaison des méthodes de détermination des CRE	17
2.8 Rendements agronomiques	18
3 Résultats	19
3.1 Fonctions hydrodynamiques théoriques	19
3.2 Évolution des données continues	22
3.2.1 Sur l'entièreté de la période	22
3.2.2 Par évènement	23
3.2.3 Par année	26
3.3 Comparaison des différentes méthodes d'acquisition de CRE	28

4	Discussion	30
4.1	Fonctions hydrodynamiques théoriques	30
4.2	Données continues	31
4.2.1	Courbes ajustées sur l'entièreté des données continues	31
4.2.2	Évolution des données continues sur les séquences évènementielles	32
4.2.3	Évolution des données continues sur l'année	32
4.3	Comparaison des trois méthodes	33
4.4	Rendements agronomiques	34
5	Conclusion et perspectives	36
6	Bibliographie	39
7	Annexes	43
7.1	Annexe 1	43
7.2	Annexe 2	44
7.3	Annexe 3	45
7.4	Annexe 4	46
7.5	Annexe 5	52

Table des figures

2.1	Plan expérimental des parcelles de l'expérimentation Agriculture Is Life For Water Quality (AIL4WATERQUALITY)	6
2.2	Pente en degré	8
2.3	Informations pédologiques	8
2.4	Plan d'échantillonnage	9
2.5	Appareil Ku-pF	11
2.6	Mise à calibre des échantillons	12
2.7	Matériel de préparation des échantillons	13
3.1	CRE par horizon déterminées théoriquement par HYPRES, EU-HYDI, ROSETTA 1, ROSETTA 2 et ROSETTA 3	21
3.2	Évolution des données continues du 01/11/20 jusqu'au 01/11/22	23
3.3	QR code d'accès aux capsules vidéos	24
3.4	Séquences particulières de chaque parcelle (avril 2021, octobre-novembre 2021 et septembre-novembre 2022	25
3.5	Comparaison des différentes méthodes d'acquisition de CRE	27
3.6	Comparaison des méthodes d'acquisition pour l'horizon de surface de chaque parcelle	28
7.1	Méthode de prélèvement des échantillons en structure conservée	43
7.2	Différence entre les triangles texturaux de la FAO et de l'USDA	44

Liste des tableaux

2.1	Système de rotation et cultures par parcelle	7
2.2	Bulletin analytique : texture de chaque horizon	10
2.3	Densité apparente et porosité des horizons de chaque parcelle	11
2.4	Degré d'ajustement des données de terrain	17
2.5	Rendements agronomiques des parcelles	18
3.1	Valeurs de Δ permettant la comparaison des différentes méthodes de détermination	29
7.1	EU-HYDI : FPT 21	45
7.2	Calendrier événementiel de la parcelle 5.	46
7.3	Calendrier événementiel de la parcelle 6.	48
7.4	Calendrier événementiel de la parcelle 7.	49
7.5	Calendrier événementiel de la parcelle 8.	50
7.6	Paramètres de ROSETTA pour chaque horizon	52

Acronymes

α point d'entrée d'air

Δ différence de teneur en eau entre celle à la saturation et celle à une pression de 67.4 kPa

θ_r teneur en eau résiduelle

θ_s teneur en eau à saturation

K_s conductivité hydraulique à saturation

AIL4WaterQuality Agriculture Is Life For Water Quality

CIPAN cultures intermédiaires piège à nitrate

CPAR Centre Provincial de l'Agriculture et de le Ruralité

CRA-W Centre Wallon de Recherches Agronomiques

FPT fonctions de pédotransfert

ICOS Integrated Carbon Observation System

IRM Institut royal météorologique de Belgique

MES méthode d'évaporation simplifiée

SPGE Société Publique de Gestion de l'Eau

CRE courbe de rétention en eau des sols

FAO "Food and Agriculture Organization of the United Nations"

USDA "The United States Department of Agriculture"

Chapitre 1

INTRODUCTION

1.1 Contexte de l'étude

La population mondiale augmente de manière exponentielle depuis la révolution industrielle. En réponse à cette croissance démographique, les rendements agronomiques ont dû augmenter (ROBINSON & SUTHERLAND, 2002). Pour ce faire, depuis les années 50, pesticides et fertilisants ont allègrement été employés (PIMENTEL, 1996). Ces pratiques ont des effets néfastes sur l'environnement (VRYZAS, 2018) et tout particulièrement sur la qualité des eaux (PARK et al., 2018 ; SZPAKOWSKA et al., 2022).

C'est pourquoi, pour diminuer la pression engendrée par ces pratiques agricoles sur l'environnement, des systèmes de productions innovants ont été élaborés. Dans le cadre du projet *EcoFoodSystem* ces systèmes sont au nombre de trois. Ils sont basés sur les régimes du *EatLancet* qui étudie les méthodes agricoles d'avenir visant à nourrir la population mondiale de manière durable (WILLETT et al., 2019).

Le premier est un système qualifié de système végétalien au sein duquel aucun lien avec le monde animal n'est présent. Une rotation de 8 ans est prévue avec de la caméline (*Camelina sativa* (L.) Crantz), du froment d'hiver (*Triticum aestivum* L. var. 'Impérateur'), du féverole (*Vicia faba* L. var. 'equina' ou 'minor'), du colza (*Brassica napus* L. var. 'DK expansion' et 'Alicia'), du pois (*Pisum sativum* L.) et de l'orge (*Hordeum vulgare* L.), le tout intercalant des cultures intermédiaires piège à nitrate (CIPAN).

Le second système est un système animal-végétal hors sol. On y retrouve des exportations de sous-produits agricoles tels que fourrage ont lieu, ainsi que des importations de fumier et autres matières organiques d'origine animale. Ce système est subdivisé en deux variantes, employant ou non des herbicides. Une rotation de 8 ans est prévue avec des cultures classiques (telles que la betterave (*Beta vulgaris* L. var. 'myrtille'), le froment d'hiver, la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.), le colza, ou le maïs (*Zea mays* L. var. 'Anovi CS'), en intercalant des CIPAN.

Le troisième et dernier système de rotation innovant est le système animal-végétal en interactions agroécologiques. Dans ce système, l'animal est intégré de la même manière que pour le système précédent, mais des périodes supplémentaires de pâturage de moutons sont adoptées. Une rotation de 8 ans est également prévue avec les mêmes espèces de maïs, de froment d'hiver, de la féverole et de colza, toujours en intercalant des CIPAN.

Par ailleurs, le monde fait face à une crise climatique. Celle-ci s'exprime notamment par des périodes de sécheresse plus fréquentes en été et des crues soudaines qui accentuent l'érosion des sols (LEHNER et al., 2006). Ces modifications du climat présentent un risque important pour la qualité des eaux. En effet, comme le pointe WHITEHEAD et al. (2009), les écoulements incontrôlables en zone urbaine, vers les cours d'eau, engendrent des pollutions anthropiques importantes. De plus, des concentrations plus importantes d'azote devraient se retrouver dans les terres, les rivières, mais aussi les mers et océans (ARHEIMER et al., 2005). Selon les modèles de prédiction, les changements climatiques pourraient diminuer les débits et les temps de parcours de l'eau dans les rivières et les lacs. Le ralentissement et la stagnation pourraient engendrer "une augmentation du potentiel de prolifération d'algues toxiques et une réduction des niveaux d'oxygène dissout" (WHITEHEAD et al., 2009).

Une étude des propriétés hydriques du sol, et plus particulièrement, de ses capacités de rétention est réalisée pour évaluer l'effet conjoint des différents systèmes agronomiques et des variations climatiques.

1.2 Courbe de rétention

Les deux principaux paramètres hydrologiques mesurables du sol sont la teneur en eau et son potentiel matriciel. Ces variables sont mises en relation au moyen de la courbe de rétention en eau des sols (CRE) (LU & GODT, 2013).

La CRE est essentielle pour comprendre et analyser les régimes hydriques et les comportements hydrologiques du sol (BITTELLI et FLURY, 2009; CASSINARI et al., 2015). Dans des contextes géologiques et géotechniques, la CRE est nécessaire pour l'étude de la mécanique des sols non saturés (LU et al., 2010). Elle informe aussi sur le potentiel matriciel de l'eau du sol et son accessibilité pour les plantes (BORDONI et al., 2017). Pour ces raisons, l'emploi de CRE est recommandé et primordial dans la gestion des flux d'eau, de soluté, de CO₂, etc. dans les sols (JABRO et al., 2009).

Il existe différentes méthodes pour obtenir des CRE : des modèles théoriques, des méthodologies expérimentales ou des études *in situ*.

Ces trois méthodes sont rarement étudiées de manière conjointe. En pratique, les modèles théoriques sont les plus utilisés pour leur facilité d'emploi et leurs gains de temps et d'argent (SCHAAP et al., 2001).

Lors de la détermination théorique d'une CRE, un modèle doit être choisi. Les plus utilisés sont ceux de van Genuchten (van GENUCHTEN, 1980) et de Brooks et Corey (BROOKS & COREY, 1964). Ces modèles permettent de paramétrer les propriétés hydrauliques du sol sur base de mesures ou de fonctions de pédotransfert (FPT).

En effet, tous deux décrivent la rétention en eau et la conductivité hydraulique en conditions saturée et insaturée à l'aide de cinq paramètres :

- la teneur en eau résiduelle (θ_r) ;
- la teneur en eau à saturation (θ_s) ;
- le point d'entrée d'air (α) ;
- un paramètre empirique de forme (n) ;

— la conductivité hydraulique à saturation (K_s).

Les FPT permettent d'accéder à ces paramètres et donc aux CRE, sans nécessiter une prise de mesure sur terrain. Elles ont, par ailleurs, l'avantage de pouvoir être générées pour des sols présentant une large gamme de variations pédogénétiques et minéralogiques (GAISER et al., 2000).

Le but intrinsèque des FPT est d'établir des relations mathématiques entre les propriétés difficilement mesurables (comme les paramètres de la CRE) et les propriétés facilement accessibles et disponibles dans les bases de données (DASHTAKI et al., 2010). Il est, par exemple, aisé d'obtenir des informations relatives à la texture, à la distribution granulométrique ou au carbone organique du sol (AMORIM et al., 2022).

La variable d'entrée la plus couramment utilisée dans les FPT est la distribution granulométrique. Cependant, d'autres propriétés physico-hydrauliques du sol peuvent être employées pour améliorer la prédiction des paramètres d'ajustement des CRE par les FPT. Il s'agit, notamment, de la densité apparente, la stabilité des agrégats et les indices structurels qui évoluent dans le temps (DASHTAKI et al., 2010).

Les FPT peuvent, ainsi, simplifier la détermination des CRE (MCBRATNEY et al., 2002) en estimant des hauteurs de pression spécifiques ou en prédisant des paramètres de modèles mathématiques (TIAN et al., 2021). La plupart d'entre elles ayant été établies pour des sols tempérés (NEBEL et al., 2010).

Il est par ailleurs intéressant de noter que les FPT sont divisées en deux catégories : les FPT continues et les FPT de classe (AL MAJOU et al., 2007). La première catégorie utilise des fonctions mathématiques continues, telles qu'exposées ci-devant. La seconde catégorie, les FPT de classe, présentent, quant à elles, des propriétés hydrauliques moyennes pour chaque classe texturale de sol (WÖSTEN et al., 1999). Cette méthode de détermination des paramètres hydriques permet un accès simple et rapide à une information complexe.

Une autre méthode de détermination de la courbe de rétention est la mesure en laboratoire. Les techniques expérimentales s'appuient sur des volumes d'échantillons réduits préférablement en structure conservée (BORDONI et al., 2017). L'intérêt des déterminations expérimentales est l'accessibilité plus spécifique aux paramètres hydriques des sols (en comparaison aux moyens théoriques), et la commodité de mise en place de l'expérimentation. En effet, comparée à une installation *in situ*, l'expérimentation en laboratoire présente moins de contraintes pratiques.

Ces dernières décennies ont connu l'émergence de nombreuses méthodes de détermination de CRE en laboratoire (KLUTE, 1986). Parmi les plus répandues, il est possible de citer : le bac de sable, l'appareil à plaque de pression, les méthodes d'évaporation ou encore les méthodes de pression de vapeur (comme la psychrométrie par thermocouple ou le compteur de potentiel de point de rosée) (CAMPBELL & GEE, 1986).

La limite de ces différentes méthodes est que leur gamme de mesures ne permet pas de couvrir l'ensemble de la gamme de rétention en eau des sols (LU & GODT, 2013). Pour exemple, la méthode de plaques de pression est applicable à des points expérimentaux de pression inférieurs à -200 kPa (BITTELLI & FLURY, 2009). *A contrario*, la méthode de pression de vapeur fournit une évaluation qualitative des caractéristiques de rétention en eau pour toute pression inférieure

à -1000 kPa (CAMPBELL et al., 2012). Pour finir, les méthodes d'évaporation présentent des résultats cohérents dans la plage de tensions matricielles comprises entre 0 et environ -103 kPa (PETERS & DURNER, 2008).

Les données de rétention et de conductivité des sols peuvent, pour finir, être mesurées *in situ*. Autrement dit, la teneur en eau du sol et son potentiel matriciel sont relevés sur le terrain. Les récentes avancées technologiques permettent une mesure continue de ces variables en plus de les acquérir simultanément. Malgré la mise en place lourde de ces mécanismes (excavation des terres, placement des capteurs et de datalogger,...), ces méthodes d'acquisition de données sont les plus proches des conditions environnementales réelles (BORDONI et al., 2017).

En réponse à ces avancées technologiques, des questions relatives à la divergence possible entre les propriétés hydrauliques du sol déterminées théoriquement, mesurées en laboratoire et celles observées sur le terrain ont émergé.

BORDONI et al. (2017) font le constat que la dynamique de rétention en eau d'un sol est généralement considérée comme une propriété non évolutive ; en d'autres termes, le profil de rétention n'évolue pas dans le temps.

Or, les mesures de terrain démontrent que la CRE n'est pas unique pour un sol donné (GERIS et al., 2021). Diverses raisons peuvent justifier cette réalité de terrain. Par exemple, dépendant de l'état hydrique du sol, une courbe différente pourrait en résulter. La CRE caractérisée pour un sol en phase d'assèchement n'est pas similaire à celle obtenue en phase d'humectation (HUANG et al., 2021). Ce phénomène résulte de l'effet d'hystérèse, qui peut affecter un sol dans des conditions *in situ* (par exemple, la variation saisonnière des précipitations) (IYAMA, 2016).

Les CRE sont aussi fortement influencées par la structure du sol. Des études récentes (ASSOULINE et OR, 2013 ; HUANG et al., 2021), mettent en avant l'impact du labour sur les CRE. Les résultats démontrent que le travail du sol sans labour permet une capacité de rétention plus importante de l'horizon de surface (0-30 cm).

La compaction, quant à elle, modifie les réseaux de macroporosité du sol (RICHARD et al., 2001). Son effet sur les capacités de rétention en eau a été prouvé par diverses études (LIPIEC et HATANO, 2003 ; ALVAREZ et STEINBACH, 2009).

Bien que ces impacts soient mis en avant, très peu d'études les ont analysés et confirmés au moyen de données continues *in situ* (HUANG et al., 2021).

1.3 Objectifs

L'objectif global de ce travail est de répondre à la question suivante : "Comment réagissent les paramètres hydrologiques de systèmes soumis à différents itinéraires agricoles?"

Pour ce faire, trois sous-objectifs ont été mis en avant.

La littérature fait état de la variabilité des résultats de rétention selon la méthode de détermination. Toutefois, la comparaison entre les sources d'information (CRE théoriques, méthodes expérimentales et données continues *in situ*) n'a que rarement été étudiée (HUANG et al., 2021), et encore moins sur une large échelle temporelle. Ainsi, le premier sous-objectif poursuivi est de qualifier la variabilité des propriétés hydrologiques de ces trois bases de données pour l'horizon de surface (0-30 cm).

La large base de données de terrain exploitée permet de corréler les différents effets des techniques agricoles et des conditions météorologiques aux propriétés hydrologiques des sols, et ce pour les trois profondeurs : 30, 60 et 90 cm. Le second sous-objectif est donc d'étudier l'influence des variations agricoles et météorologiques à différentes échelles de temps (bi annuelle, annuelle et sur des périodes spécifiques déterminées par les évènements climatiques et agronomiques).

Le dernier sous-objectif est de corréler les réactions hydrologiques mises en avant avec les performances agronomiques des différents systèmes étudiés.

Chapitre 2

Matériel & Méthodes

2.1 Projet Agriculture Is Life For Water Quality (AIL4WaterQuality)

Le projet Agriculture Is Life For Water Quality (AIL4WATERQUALITY) est réalisé au sein de l'axe Echange Eau-Sol-Plante de Gembloux Agro-Bio Tech en partenariat avec le Centre Wallon de Recherches Agronomiques (CRA-W), Greenotec et Protect'eau. Il est financé par la Société Publique de Gestion de l'Eau (SPGE). Le projet soutient deux objectifs principaux. Le but premier est d'élargir la connaissance actuelle sur le devenir des pesticides en vue de limiter leur impact sur l'environnement. Le second objectif, plus global, est l'étude de l'impact de différentes rotations innovantes contribuant à la transition agricole sur le fonctionnement hydrophysique du sol.

Le site expérimental est un terrain de 1.2 ha. Il est situé le long de la rue du Bordia à Gembloux, à côté du cimetière de Gembloux (50° 33' 56.103" N , 4° 42' 30.432" E). Il est constitué de huit parcelles encadrées par deux bandes fleuries (Figure 2.1). Ces parcelles sont instrumentées dans le cadre de l'essai *EcoFoodSystem*, mis en place par la CARE Agriculture Is Life (Gembloux Agro-Bio Tech). Chacune d'entre elles mesure 18 m de large et 84 m de long. Une borne contenant les dataloggers est systématiquement partagée entre deux parcelles. Ces bornes sont positionnées à 25 m du bord inférieur du terrain.

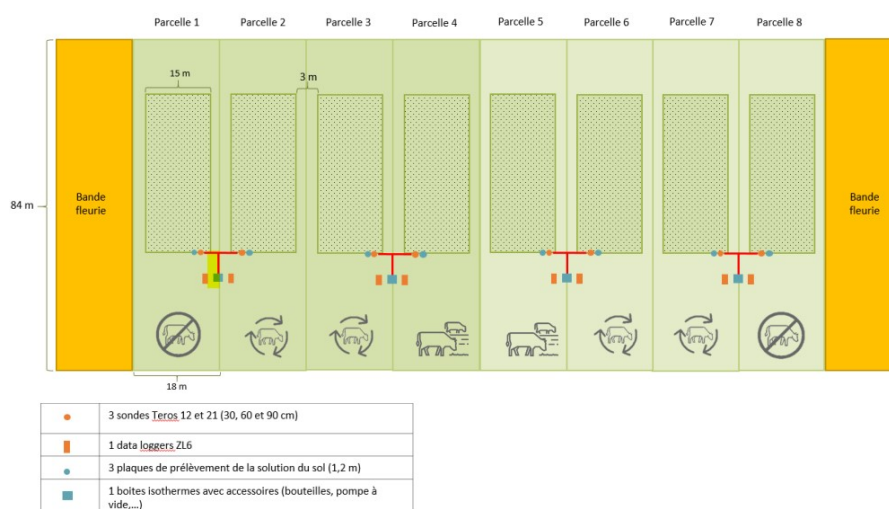


FIGURE 2.1 – Plan expérimental des parcelles de l'expérimentation AIL4WATERQUALITY

Les parcelles sont équipées de sondes TEROS 12 de la marque "MeterGroup". Elles mesurent la teneur en eau, la conductivité électrique et la température du sol. Ces capteurs ont l'avantage d'être robustes, précis après calibration et équipés d'un noyau de ferrite qui limite les interférences. Des sondes TEROS 21 de la marque "MeterGroup" sont également présentes pour mesurer le potentiel hydrique et la température du sol. Leur gamme de mesures s'étend de -9 kPa à -2000 kPa.

Chacune des parcelles étudiées est équipée de trois sondes TEROS 12 et de trois sondes TEROS 21. Les six sondes ont été installées au niveau des trois horizons du profil de sol, à 30, 60 et 90 cm de profondeur. Elles sont toutes connectées au datalogger en surface qui enregistre les mesures toutes les 15 min depuis septembre 2020.

Le projet *EcoFoodSystem* compare trois rotations innovantes basées sur les régimes du *Eat-Lancet* :

- Le système végétalien ;
- Le système animal-végétal hors sol subdivisé en deux variantes :
 - Phyto : employant des herbicides ;
 - Sans-phyto : n'utilisant pas d'herbicides.
- Le système animal-végétal en interactions agroécologiques.

Le projet a été mis en place en 2020 et chaque système est soumis à une rotation de 8 ans. Pour accélérer l'expérimentation, deux temporalités sont présentes.

Dans le cadre de l'étude, les quatre parcelles étudiées sont les parcelles suivant la temporalité 1 ; à savoir les parcelles 5 à 8 (Table 2.1). Une première culture se développe d'avril à novembre 2021. Ensuite, du froment d'hiver est cultivé de décembre 2021 à juillet 2022. Cette seconde culture est commune à toutes les parcelles.

TABLE 2.1 – Système de rotation et cultures par parcelle

Parcelle	Système de rotation	Culture 1 (2020-2021)	Culture 2 (2021-2022)
5	Agroécologique	Maïs	Froment d'hiver
6	Hors sol (sans phyto)	Betterave sucrière	
7	Hors sol (phyto)	Betterave sucrière	
8	Végétalien	Caméline	

2.2 Caractéristiques théoriques des sols

Avec sa formation de Bruxelles marquée par un sous-sol calcaire recouvert d'une importante couche de loess (limon éolien), la zone d'étude possède un profil caractéristique de la Hesbaye.

La carte numérique des sols de Wallonie renseigne la zone d'étude comme une zone limoneuse à drainage favorable (Figures 2.2 et 2.3).

De plus, la zone présente une toposéquence avec sur les hauteurs, un horizon B textural épais et dans les bas de pentes, l'absence de développement de profil.

Les parcelles sont positionnées sur un plateau modérément surélevé à une altitude comprise entre 165 m à 157 m d'une inclinaison de 4 % vers le Nord.

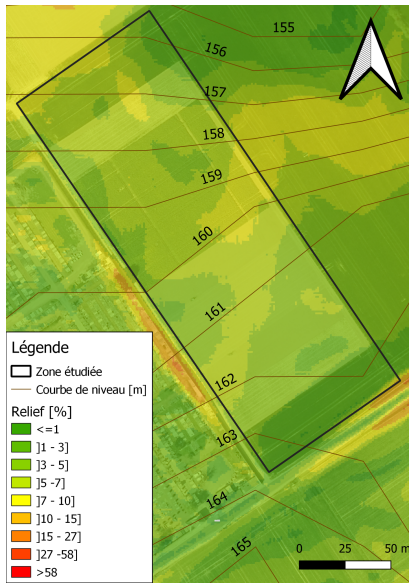


FIGURE 2.2 – Pente en degré

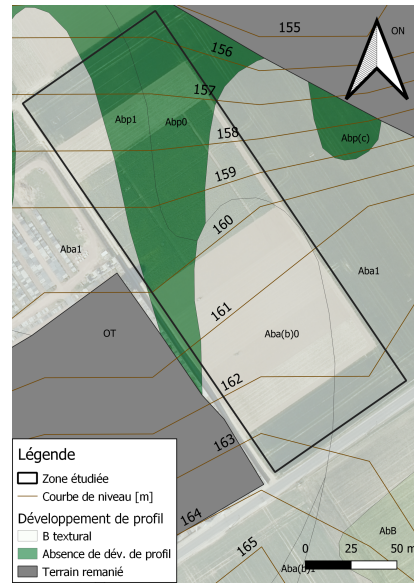


FIGURE 2.3 – Informations pédologiques

2.3 Échantillonnages

Trois types d'échantillonnage ont eu lieu lors de la même campagne de prélèvement du 29 septembre 2022.

Pour chacune des quatre parcelles, trois emplacements ont été déterminés de manière arbitraire suivant le plan d'échantillonnage (Figure 2.4). Tous les échantillons ont été prélevés dans les 20 premiers mètres accessibles de chaque parcelle. De cette manière, les perturbations engendrées n'affectent pas les résultats de rendements et des autres expérimentations effectuées sur le même terrain.

Le premier échantillonnage correspond au prélèvement d'échantillons aux profondeurs de 30 cm, 60 cm et 90 cm pour effectuer une analyse granulométrique. L'opération a été réalisée à trois reprises pour le prélèvement à 30 cm de profondeur. Celui-ci n'a été réalisé qu'une fois pour les autres profondeurs ; seul l'emplacement 1 de chaque parcelle a été échantillonné.

Le second échantillonnage est un ensemble en structure conservée d'un diamètre de 6 cm et d'un volume de 100 cm³ ayant pour but de déterminer la densité apparente ainsi que la porosité des différents horizons. Pour ce faire, et à l'instar du premier échantillonnage, trois répétitions ont été réalisées à 30 cm de profondeur et une seule répétition a été effectuée pour les horizons plus profonds (soit uniquement à l'emplacement 1 de chaque parcelle). Cet échantillonnage a été fait à l'aide d'une tarière manuelle assistée d'un guide aux dimensions des anneaux de prélèvement.

Le troisième type d'échantillons prélevés est un ensemble d'échantillons en structure conservée de 7.2 x 6.1 cm et d'un volume de 250 cm³. Ceux-ci ont été réalisés dans le but de faire une analyse conjointe de la courbe de conductivité hydraulique et de la CRE. Pour ce prélèvement, des trous de 45 cm de profondeur ont été creusés de manière à pouvoir y créer une marche à



FIGURE 2.4 – Plan d'échantillonnage

une profondeur de 25 cm. Avec l'aide d'un guide, les anneaux de prélèvement ont été enfoncés dans le sol. Les anneaux ont été excavés avec une truelle comme illustré en Annexe 7.1. Ce prélèvement a été répété à trois reprises dans chaque parcelle suivant le plan d'échantillonnage (Figure 2.4).

2.3.1 Granulométrie

L'étude granulométrique a été réalisée par le Centre Provincial de l'Agriculture et de la Ruralité (CPAR) de La Hulpe. Dans le cas présent, le sol a été séché à une température inférieure à 40 °C avant d'être broyé à 2 mm par un broyeur à brosse.

Les résultats obtenus sont consignés à la Table 2.2. Il est à préciser que, suite à une erreur de manipulation, les données de l'horizon de surface de la parcelle 8 n'étaient pas accessibles pour l'échantillon prélevé. Pour pallier à ce manque, les données ont été reprises d'une analyse antérieure réalisée en septembre 2021 par le CPAR sur cette même parcelle, dans les mêmes conditions d'échantillonnage.

TABLE 2.2 – Bulletin analytique : texture de chaque horizon

Parcelle	Horizon	Profondeur (cm)	Teneur en CO (%)	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	Texture (USDA)	Texture (FAO)
5 - Maïs	1	30	26.92	11.29	82.89	5.82	Silt	Medium fine
	2	60	3.71	11.59	83.84	4.57	Silt	Medium fine
	3	90	3.63	14.53	81.83	3.64	Silt Loam	Medium fine
6 - Betterave (sans phyto)	1	30	12.63	14.33	79.38	6.29	Silt Loam	Medium fine
	2	60	5.95	14.62	78.87	6.51	Silt Loam	Medium fine
	3	90	2.73	20.23	76.73	3.04	Silt Loam	Medium fine
7 - Betterave (phyto)	1	30	11.51	15.12	79.11	5.77	Silt Loam	Medium fine
	2	60	4.54	22.02	75.32	2.66	Silt Loam	Medium fine
	3	90	/	23.10	73.90	3.00	Silt Loam	Medium fine
8 - Caméline	1	30	56.10	17.20	76.50	6.30	Silt Loam	Medium fine
	2	60	/	21.90	75.20	3.00	Silt Loam	Medium fine
	3	90	/	20.60	76.30	3.10	Silt Loam	Medium fine

2.3.2 Densité apparente et porosité

Les échantillons en structure conservée ont été traités dans le laboratoire de physique des sols du CARE "Environment Is Life". Chaque échantillon de 100 cm³ a été pesé avant d'être séché à 105 °C dans une étuve pendant 24 h. Le poids sec des échantillons et celui des cylindres ont ensuite été enregistrés. En soustrayant ces deux données, la densité apparente des sols a alors pu être déterminée.

Ces échantillons en structure conservée ont aussi permis de déterminer la porosité de chaque horizon. Celle-ci est déterminée par le rapport de la densité apparente et de la densité réelle de particule.

Les données sont compilées à la Table 2.3. Pour rappel, l'échantillonnage a été répété pour l'horizon de surface uniquement. C'est pourquoi les valeurs moyennes de densité apparente et de porosité sont reportées pour cet horizon.

Les écarts-types sont tous inférieurs à 0.08, ce qui signifie que les valeurs sont très peu dispersées.

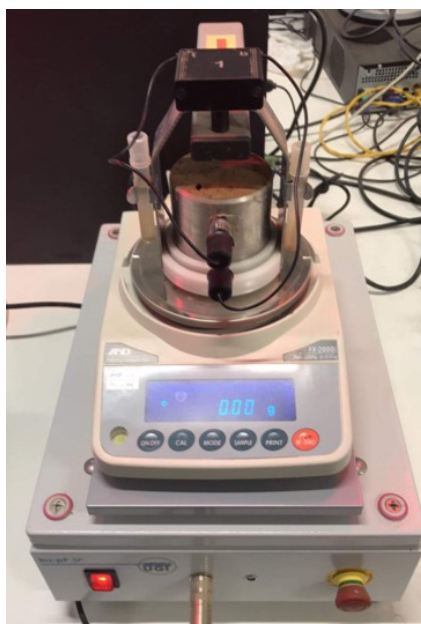


FIGURE 2.5 – Appareil Ku-pF

TABLE 2.3 – Densité apparente et porosité des horizons de chaque parcelle

Parcelle	Horizon	Densité apparente (g/cm ³)	Porosité (%)	Écart-type densité apparente (g/cm ³)	Écart-type porosité (%)
5 - Maïs	1	1.56	40	0.068	0.026
	2	1.38	48	/	/
	3	1.3	51	/	/
6 - Betterave (sans phyto)	1	1.46	44	0.077	0.03
	2	1.52	42	/	/
	3	1.63	38	/	/
7 - Betterave (phyto)	1	1.53	42	0.078	0.03
	2	1.57	40	/	/
	3	1.59	40	/	/
8 - Caméline	1	1.59	39	0.037	0.015
	2	1.45	45	/	/
	3	1.61	39	/	/

Il est à noter que le troisième horizon de la parcelle 5 présente des valeurs de densité apparente et de porosité respectivement inférieures et supérieures aux attentes. Une variation de la sorte peut s'expliquer par la présence de galeries de lombric ou, plus vraisemblablement, de traces racinaires. L'absence de répétition ne permet pas de confirmer cette observation.

2.3.3 Ku-pF

Pour déterminer les conductivités hydrauliques et les informations de rétention dans les gammes non saturées des sols, un appareil “Ku-pF single place” de Umwelt-Geräte-Technik GmbH (UGT) a été employé.

L'approche recherchée à travers ce dispositif se base sur la méthode d'évaporation simplifiée

(MES) de Schindler en 1980 (SCHINDLER & MÜLLER, 2006). La MES se caractérise par la mesure de tension matricielle à deux profondeurs distinctes au cours du temps pendant l'assèchement de l'échantillon, combinée à une pesée en continu.

La CRE est déterminée en associant la teneur en eau à la moyenne des deux tensions mesurées.

Malgré tout, la MES est basée sur des hypothèses de linéarisation concernant la distribution verticale des teneurs en eau et des pressions de la colonne de sol. Ces hypothèses engendrent des approximations. Dans les dernières étapes de l'expérience, la non-linéarité du profil augmente et les erreurs induites par les hypothèses peuvent apparaître (MINASNY & FIELD, 2005). Pour remédier à ceci, la MES a été adaptée. Les contenus moyens en eau sont dérivés de l'intégrale des contenus en eau sur la hauteur de la colonne divisée par la hauteur de la colonne (PETERS & DURNER, 2006).

Cet appareil permet donc de déterminer les conductivités hydrauliques non saturées ainsi que les CRE.

2.3.4 Préparation des échantillons

Avant cette mesure, les échantillons ont premièrement été mis à calibre (Figure 2.6) et la face inférieure protégée par une étamine. Ensuite, les échantillons ont été conservés à 4 °C entre le prélèvement et la manipulation.



FIGURE 2.6 – Mise à calibre des échantillons

Avant l'analyse, les tensiomètres sont mis à saturation pendant 24 h. Ils sont ensuite remplis à l'aide d'une seringue d'eau distillée dégazée. Cette manipulation a pour but de limiter au maximum les risques de cavitation précoce. Ils sont par après, connectés à une pompe à vide et soumis à une pression d'environ -80 kPa pour assurer l'absence de bulle d'air dans les capteurs.

La dernière étape de préparation des capteurs est la calibration. Pour ce faire, les capteurs sont connectés à l'appareil et placés dans une chambre de calibration. Cette dernière est soumise à une pression de -50 kPa. Les données des capteurs sont enregistrées. Lors de cette opération, les pressions mesurées sont observées pour vérifier le bon fonctionnement du matériel.

L'échantillon est mis à saturation pour une période de 48 h avant son analyse. Une fois saturée, l'étamine de l'échantillon peut être enlevée. L'anneau est alors assemblé avec le support de l'expérimentation et séparé de celui-ci par deux filtres : un en papier et le second en plastique léger.

L'espace où se positionnent les tensiomètres est évidé par un guide et un ustensile fin (légèrement plus étroit que les tensiomètres) visible sur la Figure 2.7. De cette manière, l'échantillon de sol est préservé au mieux lors de la mise en place des capteurs.



FIGURE 2.7 – Matériel de préparation des échantillons

Une fois cette étape réalisée, les tensiomètres peuvent être insérés dans l'échantillon. Le portique est reposé sur l'appareil et le programme enclenché.

À partir de l'enclenchement, l'appareil enregistrera les données de pression en kPa et le poids de l'échantillon toutes les 4 minutes depuis l'état de saturation jusqu'à l'état d'assèchement du sol (de 5 à 8 jours).

2.3.5 Traitement des résultats de laboratoire

Les données du laboratoire sont ensuite traitées pour en obtenir les teneurs en eau et leur pression associée dans le but d'obtenir la CRE. Pour ce faire, la teneur en eau à chaque mesure est déterminée comme suit :

$$\theta(i) = \frac{M_e(i) - M_0}{245} \quad (2.1)$$

Où θ est la teneur en eau (cm^3/cm^3); M_e , le poids de l'échantillon au pas de temps i (g); M_0 , le poids initial de l'échantillon (g); 245 correspond au volume de l'échantillon (cm^3).

La pression utilisée est la moyenne des tensions enregistrées par les deux tensiomètres. Dans le cas où ces deux informations n'étaient pas disponibles, la tension du tensiomètre actif a été employée. Cette approximation a été réalisée pour le second échantillon de la parcelle 7 pour

lequel le tensiomètre inférieur a cavité avant la fin du processus d'acquisition de données.

2.4 Fonctions hydrodynamiques théoriques

Les FPT sont employées pour faciliter l'accès aux fonctions hydrodynamiques des sols. Ces FPT permettent d'éviter les campagnes de mesures longues, coûteuses et/ou complexes (SCHAAP et al., 2001).

Les modèles développés par van Genuchten (van GENUCHTEN, 1980) et le modèle de Brooks et Corey (**brooks_hydraulic_1965**) permettent de caractériser les propriétés hydrauliques du sol sur base de mesures ou sur base de FPT. En effet, ils décrivent tous deux la rétention d'eau et la conductivité hydraulique en conditions saturée et insaturée à l'aide de cinq paramètres : θ_r , θ_s , α , n , m et K_s .

Les FPT estiment soit les valeurs clés telles que les teneurs en eau à la capacité au champ (θ_{fc}) et θ_s , α , m et n . Elles peuvent aussi déterminer les paramètres de relations continues tels que la relation de van Genuchten.

Dans ce modèle, la fonction de rétention s'énonce comme suit :

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

Où θ_r est la teneur en eau résiduelle (m^3/m^3); θ_s , la teneur en eau à saturation (m^3/m^3); α , le point d'entrée d'air fixé empiriquement (-); m et n , des facteurs empiriques de forme (-) (van GENUCHTEN, 1980).

En combinant cette équation avec le modèle de Mualem (MUALEM, 1976), la conductivité hydraulique non saturée peut s'exprimer comme suit :

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m]^2 \quad (2.3)$$

Où K_s est la conductivité hydraulique à saturation (m/s); l , le facteur de connexion des pores (-); S_e , la saturation relative (m^3/m^3).

Pour laquelle, la saturation effective correspond à :

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.4)$$

Dans le cadre de cette étude, trois groupes de FPT sont comparés : ROSETTA, HYPRES et EU-HYDI.

2.4.1 ROSETTA

ROSETTA est un modèle fortement répandu dans le monde. Il correspond à une compilation des avancées réalisées par Schapp entre 1998 et 2000 (SCHAAP et al., 2001). ROSETTA estime les paramètres de rétention d'eau de van Genuchten (van GENUCHTEN, 1980), le K_s ainsi que les paramètres de conductivité hydraulique insaturée basés sur le modèle de Mualem (MUALEM,

1976).

Pour l'ensemble des analyses sont employées les données de granulométrie et de densité apparente (respectivement Tables 2.2 et 2.3).

Il existe cinq applications distinctes de ROSETTA (RADCLIFFE & SIMUNEK, 2010) :

- ROSETTA 1 emploie les classes texturales selon le département de l'agriculture américain ("The United States Department of Agriculture" (USDA)), telles que reprises dans la Table 2.2¹ ;
- ROSETTA 2 utilise les données texturales (pourcentage d'argile, de limon et de sable) ;
- ROSETTA 3 se base sur les données texturales tout en considérant la densité apparente ;
- ROSETTA 4 emploie les données texturales, la densité apparente et la teneur en eau à -33 kPa ;
- ROSETTA 5 emploie les données texturales, la densité apparente et la teneur en eau à -33 kPa et la teneur en eau à -1500 kPa.

Dans la présente étude, seules les trois premières applications ont été employées.

2.4.2 HYPRES

Une base de données des propriétés hydriques des sols européens (HYPRES) a été employée pour développer des fonctions de pédotransfert à l'échelle de l'Europe (WÖSTEN et al., 1999).

Pour unifier et coordonner les résultats, les différentes catégories de FPT d'HYPRES ont été modélisées sur base des classes de texture déterminées par la "Food and Agriculture Organization of the United Nations" (FAO). La FAO et l'USDA utilisent les mêmes standards de distributions de la taille des particules. En effet, les deux classifications texturales définissent l'argile comme étant la fraction des particules de sol de taille inférieure à 2 μ m, le limon comme étant compris entre 2 et 50 μ m et le sable est la fraction comprise entre 50 et 2000 μ m (NEMES & RAWLS, 2006). Cependant, l'USDA définit 12 classes texturales là où la FAO n'en présente que cinq. Ces subdivisions sont exposées sous forme de triangles texturaux en Annexe 7.2.

Les FPT dérivent des paramètres optimisés de van Genuchten-Mualem (SCHAAP & LEIJ, 2000). En pratique, les propriétés hydrauliques du sol (teneur en eau et conductivité) sont d'abord caractérisées pour un large échantillon de données par les fonctions mathématiques exposées précédemment. La moyenne géométrique de chaque variable est calculée par classe texturale. Cette opération est possible en raison du type de distribution que suit la relation de la teneur en eau et la conductivité ; à savoir une distribution log-normale. Ensuite, les valeurs moyennes ont été optimisées au moyen du modèle de van Genuchten-Mualem. Il en résulte les "fonctions de pédotransfert de classe" (WÖSTEN et al., 1999).

2.4.3 EU-HYDI

EU-HYDI est une base de données hydropédologiques européenne qui comprend les données d'HYPRES. La particularité d'EU-HYDI est l'intégration au modèle des avancées scientifiques réalisées entre 1999 et 2013 sur les propriétés hydriques (TÓTH et al., 2015).

1. classification des textures de sol sur base des fractions particulières des échantillons réalisée par USDA.

L’inventaire européen des données hydropédologiques (EU-HYDI) résulte de la contribution de 18 pays européens (WEYNANTS et al., 2013). Il a en effet permis d’établir de nouvelles FPT. EU-HYDI a, par exemple, pris en considération des données taxonomiques, chimiques, physiques et hydrologiques. Cette base de données a aussi été étoffée par l’inclusion des occupations des sols européens et de leur étendue spatiale. Il est à préciser que ces FPT ont été entraînées et définies sur base de la classification des textures de sol de l’USDA.

EU-HYDI présente divers modèles et 22 classes de FPT. Le choix des classes est déterminé par les informations à disposition lors de l’estimation des paramètres. Dans le cas présent, la FPT 21 a été employée. Cette fonction particulière a été sélectionnée car elle permet de déterminer les paramètres de CRE à partir de la distribution granulométrique, de la teneur carbone organique et de la densité apparente (TÓTH et al., 2015).

La FPT 21 restitue par un arbre de régression univarié la valeur de θ_r et, par une régression linéaire les valeurs associées de θ_s , \log_{10} , α et $\log_{10}(n - 1)$. Le détail de cette fonction est disponible en Annexe 7.3.

2.5 Ajustement des données de terrain

Les informations relatives aux teneurs en eau et aux potentiels matriciels des sols, et issues des parcelles instrumentées ont été traitées au moyen de python.

L’objectif intrinsèque poursuivi est de comparer les informations de laboratoire, les données d’EU-HYDI et les relevés des premiers horizons de chaque parcelle.

Pour ce faire, une courbe a été ajustée sur les jeux de données continues de terrain couvrant la période de 2 ans qui s’étend du 1^{er} novembre 2020 jusqu’au 1^{er} novembre 2022. Ces courbes sont des ajustements polynomiaux des moindres carrés réalisés à l’aide de la fonction *Polyfit* de *Numpy*.

Ces ajustements ont arbitrairement été faits au troisième degré. Lorsque la condition de monotonie décroissante n’était pas rencontrée, un ajustement de premier degré est alors appliqué. Ceci concerne six courbes sur les douze étudiées (Table 2.4).

TABLE 2.4 – Degré d’ajustement des données de terrain

Parcelle	Horizon	Degré d’ajustement
5 - Maïs	1	3
	2	3
	3	1
6 - Betterave (sans phyto)	1	3
	2	1
	3	3
7 - Betterave (phyto)	1	3
	2	1
	3	1
8 - Caméline	1	1
	2	1
	3	3

2.6 Recherche des événements susceptibles de modifier la structure du sol

2.6.1 Données pluviométriques

Les données météorologiques utilisées dans ce travail sont issues de la station Integrated Carbon Observation System (ICOS) de Lonzée.

Le site de Lonzée est équipé d’un pluviomètre principal à pesée, et d’un pluviomètre secondaire à auget basculant. Le relevé des deux appareils a lieu toutes les 10 secondes avant d’être moyenné sur une période d’une demi-heure. Lorsque le premier pluviomètre est hors service, les informations sont recueillies par le second. Dans les rares situations où aucun des pluviomètres n’est fonctionnel, sont employées les mesures de la station de l’Institut royal météorologique de Belgique (IRM) d’Uccle. Ces valeurs sont renseignées à une échelle journalière.

Afin d’uniformiser la base de données et de simplifier leur lecture, les précipitations cumulées journalièrement ont été calculées sur la période du 1^{er} novembre 2020 au 1^{er} novembre 2022.

2.6.2 Données agronomiques

Pour prendre en compte les actions externes influençant le fonctionnement hydrique des sols, les événements agronomiques de chaque parcelle ont été répertoriés et employés lors de la division événementielle. Ceux-ci ont été fournis par l’équipe du projet *EcoFoodSystem*. Ils sont accessibles pour chaque parcelle en Annexe 7.4.

2.7 Comparaison des méthodes de détermination des CRE

Les CRE sont déterminées d’après trois méthodes (théoriquement selon EU-HYDI, expérimentalement et *in situ*). L’analyse comparative de leur allure a été effectuée de manière descriptive dans un premier temps, et de manière quantitative dans un second temps. Cette seconde méthode repose sur le calcul d’un indicateur (Δ) rendant compte de la forme de la CRE.

Le paramètre α est identifié comme le point d'entrée d'air en plus d'être un paramètre empirique de forme de la CRE (GUARRACINO, 2007). Il peut être utilisé comme comparateur numérique lors de l'étude de CRE (NGO-CONG et al., 2021). Toutefois, sa valeur n'est pas disponible pour l'ensemble des méthodes. En effet, les courbes ajustées sur les données *in situ* n'ont pas de paramètres α , n , ou m . Pour y remédier, un indicateur alternatif a été introduit : la différence de teneur en eau entre celle à la saturation et celle à 67.4 kPa (Δ). Cette valeur de 67.4 kPa a été choisie car elle correspond à la dernière mesure commune aux courbes définies en laboratoire, et ce pour tout échantillon confondu.

Δ permet d'approximer la pente d'une CRE, soit de caractériser la propension de rétention des sols. Au plus Δ est faible, au plus le profil de rétention est vertical ; autrement dit, au moins le sol a tendance à retenir l'eau. Dès lors, la comparaison des Δ évalués met en évidence la variation entre les méthodes de détermination employées.

2.8 Rendements agronomiques

Une rotation particulière est mise en place en fonction de la parcelle d'étude (Table 2.1). Les rendements de chaque culture implantée sont enregistrés par l'équipe d'*EcoFoodSystem*. Seules les données d'intérêt ont été reportées à la Table 2.5 ; à savoir :

- les rendements nets (T/ha) des cultures développées sur les parcelles 5 à 8 ;
- les rendements moyens (T/ha) de ces mêmes plantations cultivées en Wallonie ;
- les rendements nets en sucre (T/ha) des betteraves mises en culture sur les parcelles 6 et 7.

Il est à préciser que les valeurs relatives à la caméline n'ont pas pu être déterminées pour cause de rendement trop faible et de qualité médiocre de la culture.

TABLE 2.5 – Rendements agronomiques des parcelles

Parcelle	Rotation	Année	Culture	Rendement (T/ha)	Rendement moyen (T/ha)	Rendement en sucre (T/ha)
5	Agroécologique	20-21	Maïs	8.69	12.60	/
		21-22	Froment	6.84	7.93	/
6	Hors sol (sans phyto)	20-21	Betterave	63.80	62.20	14.35
		21-22	Froment	6.12	7.93	/
7	Hors sol (phyto)	20-21	Betterave	79.40	62.20	11.51
		21-22	Froment	6.12	7.93	/
8	Végétalienne	20-21	Caméline	No data	1-1.5	/
		21-22	Froment	8.12	7.93	/

Chapitre 3

Résultats

3.1 Fonctions hydrodynamiques théoriques

La Figure 3.1 représente les CRE théoriques déterminées via les cinq méthodes sélectionnées, et ce pour les trois horizons de chaque parcelle.

Les paramètres de van Genuchten déterminés pour ROSETTA sont consignés dans l'Annexe 7.5. La discussion ne s'axe pas sur leurs valeurs, mais plutôt les CRE obtenues par leur biais.

Les CRE HYPRES sont invariables selon les profils.

Les CRE ROSETTA 1 ont deux formes. Une première forme exprimée pour les deux premiers horizons de la parcelle 5. Dans cette première configuration le θ_s est très important (proche de $0.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$). Une seconde forme exprimée pour tous les autres horizons avec un θ_s d'une valeur proche de $0.45 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Comme exprimé dans la Section 2.4.1, la CRE ROSETTA 2 est construite sur base de la granulométrie spécifique à chaque horizon. Bien que la granulométrie varie d'un horizon à un autre, les courbes ROSETTA 2 sont très similaires d'un cas à l'autre. Entre les différents horizons, seules de légères variations sont observées pour des pressions plus importantes. Pour la majorité des graphiques (tous sauf les deux premiers horizons de la parcelle 5), la teneur à saturation est supérieure à tous les autres horizons.

La FPT ROSETTA 3 prend en compte la densité apparente et EU-HYDI, la teneur en carbone organique en plus (Section 2.4.4). Pour la parcelle 5, les deux courbes atteignent un θ_s plus important avec la profondeur. La courbe EU-HYDI montre un profil bien plus vertical pour l'horizon de surface que pour les autres horizons et les autres parcelles.

Pour la parcelle 6, les θ_s sont de moins en moins grands. Ils passent d'une valeur proche de $0.45 \text{ m}^3/\text{m}^3$ pour l'horizon supérieur, à une valeur légèrement inférieure à $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ pour l'horizon inférieur. L'allure générale de la courbe EU-HYDI est plus verticale pour l'horizon de surface avec une valeur de teneur en eau important pour de faibles tensions et qui reste supérieur aux autres résultats pour les tensions plus grandes. Cette observation est valable pour les parcelles 7 et 8 où EU-HYDI adopte le même comportement.

Pour la parcelle 7, les θ_s restent globalement constants pour ROSETTA 3 et EU-HYDI.

La teneur à saturation pour la parcelle 8 est dans le même ordre de grandeur ($0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$) pour l'horizon supérieur et inférieur. À la profondeur de 60 cm, le θ_s approche une valeur de $0.45 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Les parcelles 7 et 8 montrent une tendance similaire pour les courbes EU-HYDI et ROSETTA 3.

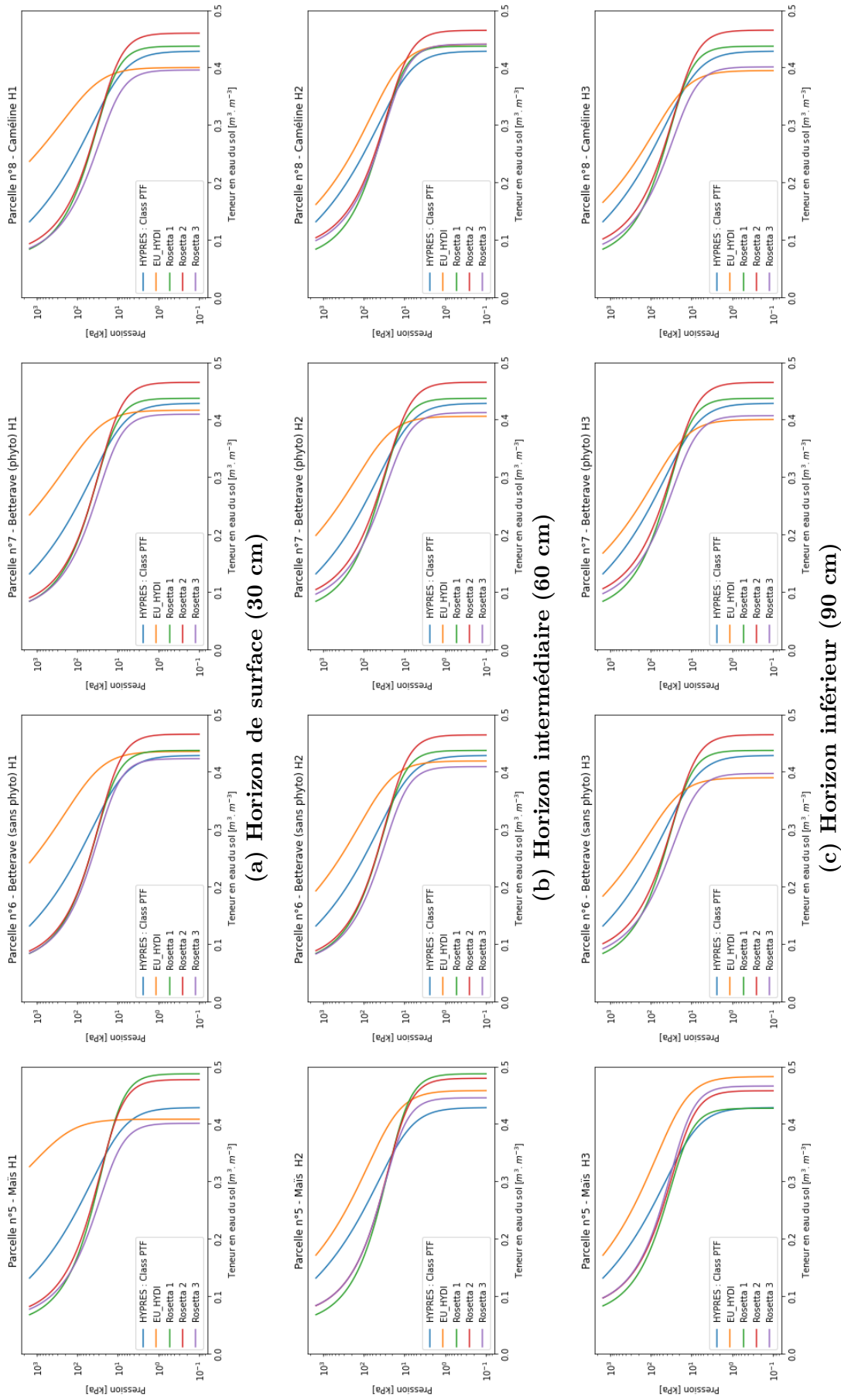


FIGURE 3.1 – CRE par horizon déterminées théoriquement par HYPRES, EU-HYDI, ROSETTA 1, ROSETTA 2 et ROSETTA 3

3.2 Évolution des données continues

La Figure 3.2, ainsi que les capsules vidéos liées à la Section 3.2.2, illustrent la pluviométrie journalière d'une part, et les CRE des horizons respectifs à chaque parcelle d'autre part.

À chaque reprise, la pluviométrie est représentée sur toute la période étudiée. Des lignes discontinues y apparaissent pour les graphiques ne représentant qu'une séquence. Ces lignes délimitent la période pour laquelle la CRE est mise en graphique. Les événements pluviométriques sont représentés par des traits discontinus en gris alors que les événements agronomiques, en orange.

Les courbes de couleur claire sont les CRE théoriques obtenues par les FPT d'EU-HYDI.

Les courbes foncées sont les CRE ajustées aux données de terrain. Les larges points sont les valeurs de θ_s , déterminées en laboratoire sur les échantillons en structure conservée. Enfin, les données continues de terrain sont représentées par les amas de points.

Les couleurs employées sont liées à l'horizon représenté : le bleu pour l'horizon de surface, le orange pour l'horizon intermédiaire et le vert pour l'horizon inférieur.

3.2.1 Sur l'entièreté de la période

La Figure 3.2 illustre la totalité des données récoltées sur la période étudiée pour chaque parcelle. Elles permettent de visualiser la variabilité intrinsèque de celles-ci.

Dans chaque situation :

- les mesures ne descendent pas sous la limite de -9 kPa ;
- les valeurs mesurées ne sont jamais supérieures aux données obtenues théoriquement pour des horizons respectifs ;
- les mesures *in situ* de l'horizon de surface couvrent une plus large gamme de teneur en eau et de pression que les mesures du second horizon elles-mêmes couvrant une gamme plus grande que celles de l'horizon inférieur ;
- les données de θ_s déterminées en laboratoire sont pour chaque horizon proches de la valeur estimée théoriquement ; la θ_s de l'horizon inférieur de la parcelle 5 étant supérieure à $0.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ($0.51 \text{ m}^3/\text{m}^3$).

La parcelle 5 montre une réelle divergence entre les données observées et les données prédites. La CRE du premier horizon ajustée sur l'entièreté des données de terrain montre une allure plus horizontale que la CRE théorique obtenue par EU-HYDI.

La parcelle 6 montre une similitude de profil entre les CRE théoriques et les mesures. Néanmoins, la gamme de teneur en eau des mesures est inférieure à celle recouverte par les CRE théoriques.

Les mesures de la parcelle 7 évoluent dans des gammes de teneur en eau plus grandes que les autres parcelles. La CRE ajustée pour l'horizon de surface atteint une θ_s grande, mais toujours inférieure à la valeur de CRE EU-HYDI.

Les mesures de la parcelle 8 sont étendues sur une large gamme tant de teneur en eau que de pression. Les tendances des CRE ajustées sont globalement parallèles aux CRE théoriques.

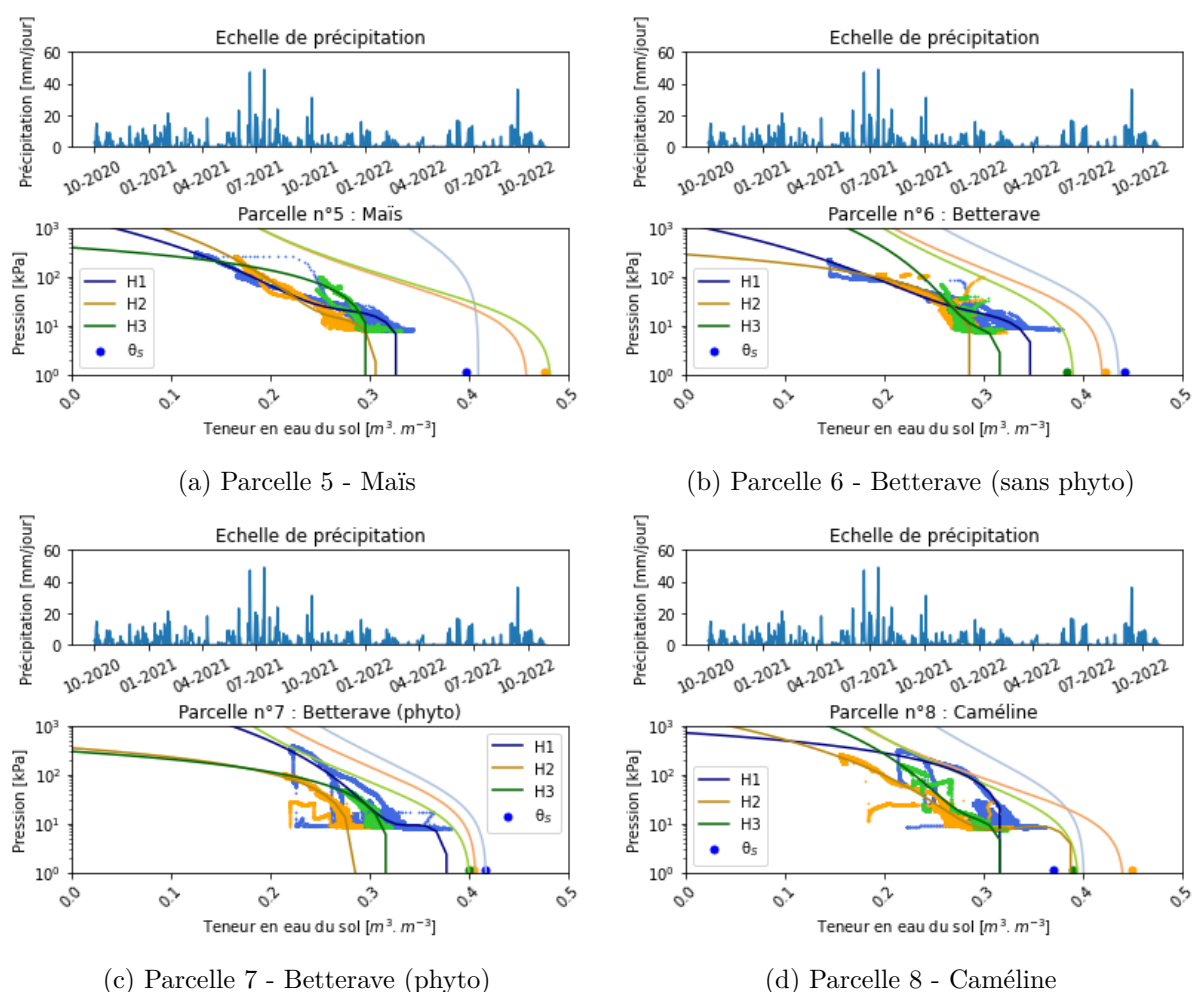


FIGURE 3.2 – Évolution des données continues du 01/11/20 jusqu'au 01/11/22

3.2.2 Par évènement

Des capsules vidéos accessibles via les QR-codes (Figure 3.3) ou via les liens suivants :

- Parcelle 5 : https://www.qrbrowser.com/upload/1672904927_p5-0.4sec.mp4
- Parcelle 6 : https://www.qrbrowser.com/upload/1672905015_p6_corr-0.4sec.mp4
- Parcelle 7 : https://www.qrbrowser.com/upload/1672905053_p7.mp4
- Parcelle 8 : https://www.qrbrowser.com/upload/1672905103_p8_corr0.4sec.mp4



(a) Parcelle 5 - Maïs



(b) Parcelle 6 - Betterave (sans phyto)



(c) Parcelle 7 - Betterave (phyto)



(d) Parcelle 8 - Caméline

FIGURE 3.3 – QR code d'accès aux capsules vidéos

Les première et dernière images correspondent au graphique de l'entièreté de la période analysée. Entre celles-ci défilent toutes les séquences se référant aux calendriers des événements susceptibles de modifier la structure du sol (Annexe 7.4).

L'intérêt de ces animations est de pouvoir suivre l'évolution globale de la teneur en eau des parcelles au cours du temps.

Séquences particulières La Figure 3.4 présente des séquences des capsules vidéos extraites à une même période pour permettre la comparaison.

Chaque ligne de la figure représente respectivement un évènement d'avril 2021, une période d'octobre à novembre 2021 et une dernière période couvrant de septembre à novembre 2022.

Elles montrent une variabilité grande entre les parcelles pour des conditions climatiques identiques.

Les séquences courtes du mois d'avril montrent une collection de mesures sur une période de 10 jours. Les mesures de l'horizon de surface de la parcelle 6 affichent un effet d'hystérèse léger. Les parcelles 7 et 8 ont un profil très horizontal à la limite des -9 kPa et la parcelle 5 présente des valeurs regroupées.

Les séquences des mois d'octobre et novembre 2021 présentent une évolution variée des horizons supérieurs. Elle montre un regroupement de ces valeurs pour les parcelles 5 et 8, une position relativement linéaire pour la parcelle 6 et une évolution graduelle pour la parcelle 7 et une position relativement statique du dernier horizon toutes parcelles confondues.

La dernière série de séquences met en figure les deux derniers mois étudiés. Chaque parcelle présente pour cette même séquence, une évolution singulière de ses données de rétention.

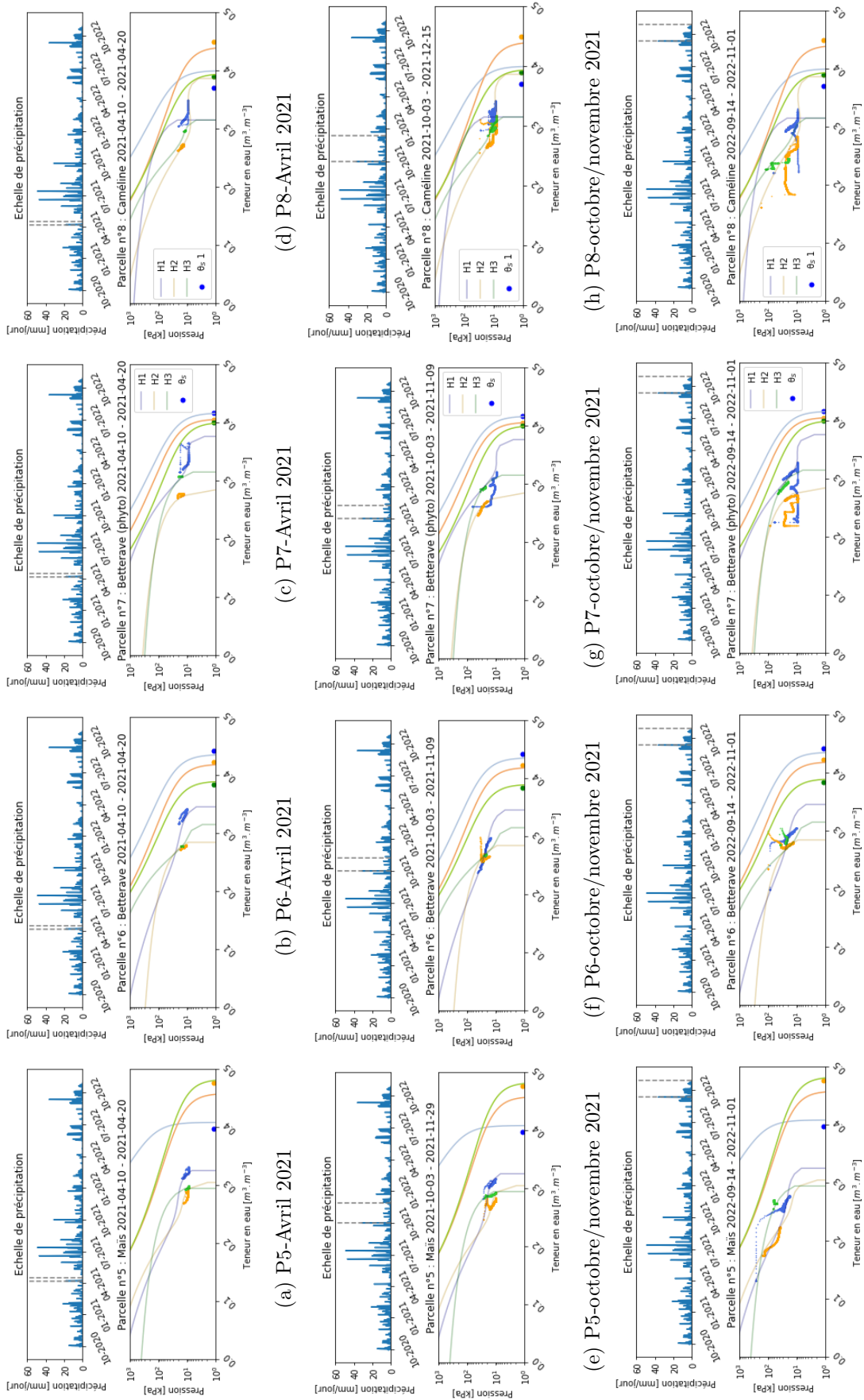


FIGURE 3.4 – Séquences particulières de chaque parcelle (avril 2021, octobre-novembre 2021 et septembre-novembre 2022)

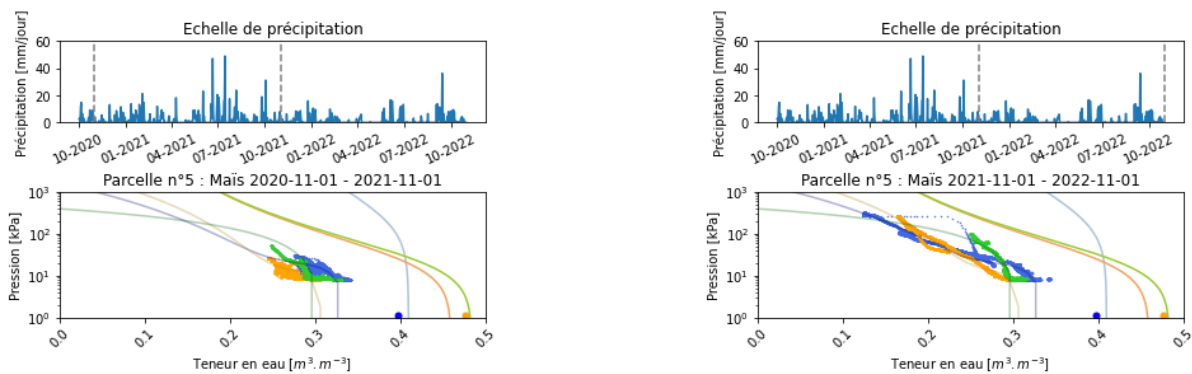
3.2.3 Par année

Le jeu de données a également été séparé en deux sets distincts couvrant du 1^{er} novembre 2020 au 1^{er} novembre 2021, et du 1^{er} novembre 2021 au 1^{er} novembre 2022.

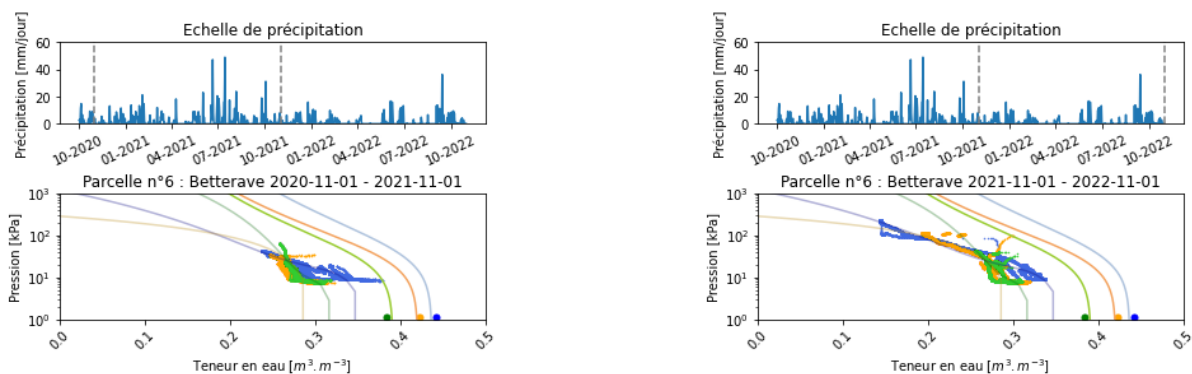
Le premier set correspond donc à une année humide (comme l'atteste le cadran de pluviométrie) et le second set, à une année plus sèche.

Les panels de gauche de la Figure 3.5 représentent l'année 2020-2021. Les valeurs de rétention de terrain sont comprises entre 0.25 et 0.4 m³/m³. Quant à la gamme observée pour l'année 2021-2022 (panel de droite des mêmes figures), elle est beaucoup plus proche des valeurs de 0.1 m³/m³.

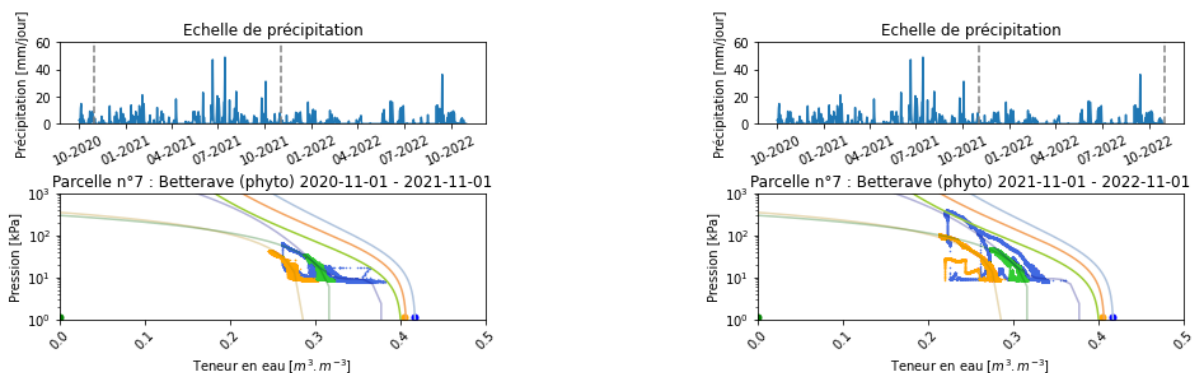
En 2021-2022, les mesures des parcelles 5 et 6 évolue rapidement vers des teneurs en eau faibles. À l'inverse, les parcelles 7 et 8 couvrent une gamme de valeur de rétention plus grande pour une gamme de tension similaire.



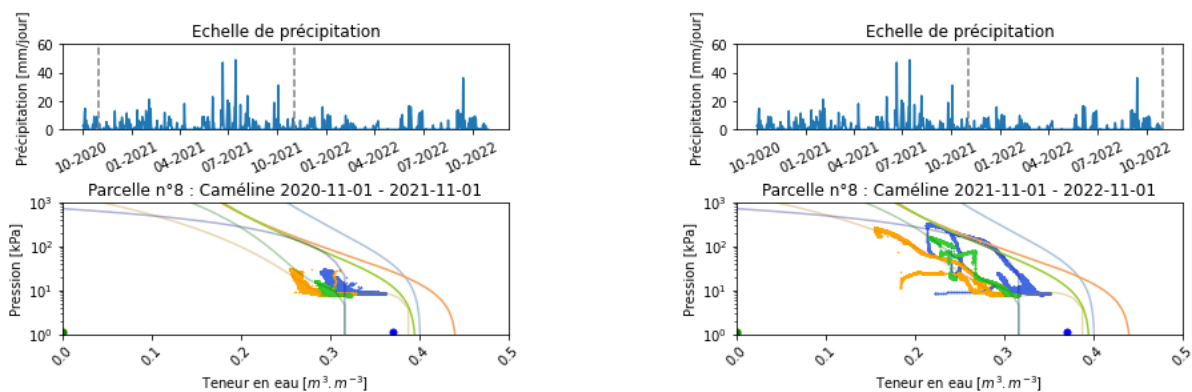
(a) Parcelle 5 - Maïs



(b) Parcelle 6 - Betterave



(c) Parcelle 7 - Betterave (phyto)



(d) Parcelle 8 - Caméline

FIGURE 3.5 – Comparaison des différentes méthodes d'acquisition de CRE

3.3 Comparaison des différentes méthodes d'acquisition de CRE

La Figure 3.6 représente :

- les CRE théoriques obtenues par EU-HYDI en bleu clair ;
- les CRE ajustées sur l'ensemble des données de terrain en bleu foncé ;
- les θ_s déterminées au laboratoire en noir ;
- les CRE obtenues au laboratoire sur base des échantillons et de l'appareil Ku-pF, en variation de bleu vif. Les courbes nommées par "Labo 1", "Labo 2" ou "Labo 3" se réfèrent aux échantillons prélevés à l'emplacement 1, 2 ou 3 du plan d'échantillonnage (Section 2.3, Figure 2.1).

Dans chacune des situations, de mêmes constats peuvent être établis :

- la CRE théorique présente des teneurs en eau plus importantes ;
- la CRE définie *in situ* couvre une gamme plus étendue de teneurs en eau, atteignant des valeurs plus faibles ;
- les CRE déterminées en laboratoire semblent être représentées sur un intervalle de teneurs en eau intermédiaire aux amplitudes des courbes ci-dessus. Elles atteignent une limite à l'approche de tension de 100 kPa liée aux contraintes matérielles.

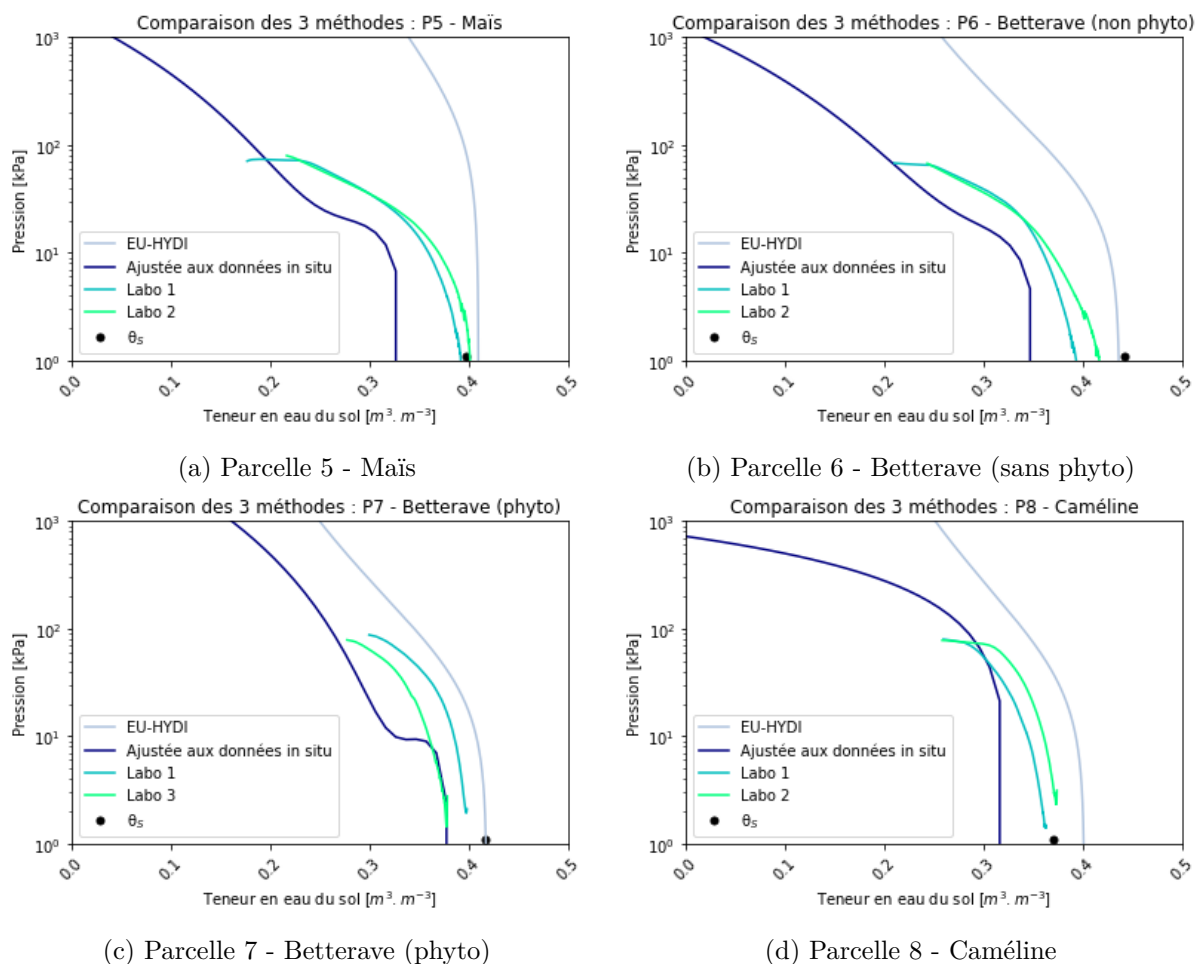


FIGURE 3.6 – Comparaison des méthodes d'acquisition pour l'horizon de surface de chaque parcelle

Les amplitudes présentées dans la Table 3.1 quantifient le schéma évolutif des CRE. Un profil de rétention vertical s'exprime par un Δ faible et met en avant une tendance moindre à la rétention.

Dans le cas présent, les résultats des parcelles 5, 6 et 7 suivent la même tendance :

- le différence de teneur en eau entre celle à la saturation et celle à une pression de 67.4 kPa (Δ) des courbes théoriques est le plus faible ;
- le Δ le plus élevé correspond au Δ des courbes ajustées sur l'ensemble des données de terrain ;
- le Δ des résultats de laboratoire adopte des valeurs intermédiaires.

La parcelle 8 donne des résultats différents. Le Δ de sa CRE ajustée est le plus faible suivi du Δ de la courbe théorique et, lui-même, plus faible que les Δ des courbes de laboratoire.

TABLE 3.1 – Valeurs de Δ permettant la comparaison des différentes méthodes de détermination

Parcelle	Méthode	$\theta_{67.4}$	θ_s	Δ
5 - Maïs	EU-HYDI	0.40	0.41	0.01
	Ajustée sur l'entièreté des données de terrain	0.20	0.33	0.13
	1 ^{er} échantillon de laboratoire	0.21	0.40	0.19
	2 ^{ième} échantillon de laboratoire	0.24	0.40	0.16
6 - Betterave (sans phyto)	EU-HYDI	0.38	0.44	0.06
	Ajustée sur l'entièreté des données de terrain	0.21	0.36	0.15
	1 ^{er} échantillon de laboratoire	0.21	0.44	0.23
	2 ^{ième} échantillon de laboratoire	0.24	0.42	0.18
7 - Betterave (phyto)	EU-HYDI	0.36	0.42	0.06
	Ajustée sur l'entièreté des données de terrain	0.27	0.38	0.11
	1 ^{er} échantillon de laboratoire	0.33	0.40	0.07
	2 ^{ième} échantillon de laboratoire	0.30	0.38	0.08
8 - Caméline	EU-HYDI	0.35	0.40	0.05
	Ajustée sur l'entièreté des données de terrain	0.30	0.33	0.03
	1 ^{er} échantillon de laboratoire	0.29	0.37	0.08
	2 ^{ième} échantillon de laboratoire	0.31	0.37	0.06

Chapitre 4

Discussion

4.1 Fonctions hydrodynamiques théoriques

Les résultats obtenus dans cette section sont globalement cohérents avec la littérature exposée dans les Sections 1.2 et 2.4.

En effet, la constance des CRE HYPRES et ROSETTA 1 sur l'entièreté des horizons, à l'exception des deux premiers de la parcelle 5, s'explique par la classification texturale. Les classes texturales de la FAO, classes de référence d'HYPRES, considèrent tous les horizons comme du "medium fine". Les classes texturales de l'USDA, quant à elles, considèrent les horizons supérieurs de la parcelle 5 comme du "Silt" et les autres comme du "Silt Loam". Cette différence graphique importante met en avant l'importance du choix du référentiel. Les standards n'étant pas similaires d'une institution à une autre ou d'un pays à l'autre (NEMES & RAWLS, 2006), une attention particulière doit être portée à la théorie intrinsèque de chacune des méthodes.

Outre l'origine du référentiel, les données requises en entrée des FPT influencent les CRE obtenues. Pour rappel, les facteurs susceptibles d'être considérés sont la classe texturale (HYPRES et ROSETTA 1), la granulométrie (ROSETTA 2 et 3), la densité apparente (ROSETTA 3) et la teneur en carbone organique (EU-HYDI). Dans l'étude ici présente, même si les textures théoriques (FAO et USDA) sont fort similaires, la densité apparente et la teneur en carbone organique des sols confèrent un "relief" à ces données. Les informations transmises par ces facteurs sont corrélées à l'organisation même des particules dans le sol (au niveau de la structure du sol, de la porosité, des types d'agrégats...). Comme tous ces facteurs ont un impact important sur la capacité de rétention en eau du sol (CASINI et al., 2012, TIAN et al., 2021), ils se traduisent par de fortes variations dans l'estimation des CRE.

Le profil de la CRE EU-HYDI de l'horizon 1 de la parcelle 5 (Figure ??) a une tendance plus verticale que les autres CRE déterminées pour cet horizon ou pour tout autre horizon. Ce résultat s'explique par un paramètre de forme α de valeur 10 fois moindre que celles évaluées pour les autres horizons. Cet indicateur influence directement l'allure de la CRE. Ce résultat résulte de la forte teneur en carbone organique de l'horizon. Ce type de profil, qui montre de grandes teneurs en eau pour des tensions de plus en plus fortes, se traduit par une plus grande rétention en eau du sol.

La base de données EU-HYDI a été choisie comme référence théorique pour la suite des analyses. Elle est, d'une part, plus récente et géographiquement déterminée pour l'Europe Centrale (TÓTH et al., 2015). D'autre part, elle prend en compte un plus grand nombre de facteurs

impactant fortement les comportements hydrologiques des sols. En effet, la densité apparente fait état du statut de compaction et par conséquent, de la diminution de la macro-porosité du sol. Cette diminution, comme observée par RICHARD et al. (2001) et CASINI et al. (2012), entraîne une perte de la capacité de rétention. D'autre part, ANKENBAUER et LOHEIDE (2017) ont démontré qu'une augmentation de la teneur en carbone organique dans les sols augmente la capacité de rétention de ceux-ci.

4.2 Données continues

4.2.1 Courbes ajustées sur l'entièreté des données continues

Les données continues récoltées sur le terrain permettent de couvrir une large gamme de pression allant de -9 kPa à -2000 kPa (Section 2.1). La borne supérieure de cette gamme n'est jamais atteinte. Par contre, la limite inférieure de -9 kPa crée un plateau important visible sur les différents horizons de chaque parcelle.

Cette limite a plusieurs conséquences non négligeables sur l'analyse et l'interprétation des informations récoltées.

Dans un premier temps, elle limite la visibilité sur la réaction *in situ* du sol pour des teneurs en eau se rapprochant de la saturation.

Dans un second temps, lors de la création de CRE ajustées sur l'entièreté des valeurs de terrain, l'ajustement sur la gamme indéterminée est extrapolé par le modèle lui-même. Ceci explique les résultats obtenus par le Δ de la courbe de rétention ajustée de la parcelle 8. Celle-ci est la seule courbe de l'horizon de surface estimée par un polynôme du premier degré (Table 2.4). Pour empêcher ce genre de comportements, d'autres visions pourraient être envisagées telles que forcer le modèle à s'approcher à la verticale des dernières informations disponibles ou encore, fixer la valeur de saturation à une mesure de saturation déterminée en laboratoire.

Malgré les différentes possibilités, la pertinence de ces choix reste discutable. En effet, la réalité de terrain étant inaccessible, il n'est pas possible d'anticiper la réaction du sol dans une situation de saturation ni de savoir si cet état sera atteint dans un environnement ouvert.

D'autre part, l'ajustement réalisé dans ce travail se fait sur l'entièreté des données récoltées pour une période de 2 ans. Ce choix a été posé pour rester le plus représentatif possible. Il est à souligner que l'effet d'hystérèse entraîne une réflexion sur la justesse de ce choix. En effet, la situation climatique non comparable entre 2020-2021 et 2021-2022 engendre un jeu de données qui atteint deux extrêmes en matière de rétention : l'approche de la saturation avec des teneurs en eau supérieure à $0.38 \text{ m}^3/\text{m}^3$ et des états de sécheresse où elle peut devenir inférieure à $0.15 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Dans l'analyse ici-présente, tous les effets externes tels que le phénomène d'hystérèse, l'impact des pratiques agricoles ou l'évolution de la structure du sol ont été lissés par la méthode d'ajustement. Différents ajustements selon l'orientation des analyses pourraient être envisagés. Par exemple, pour mettre en évidence le phénomène d'hystérèse, différents ajustements sur des séquences d'assèchement ou d'humidification des différents horizons pourraient être réalisés et ensuite comparés. De cette manière, la variation temporelle des CRE serait analysable et quan-

tifiable par des tracés linéaires selon un facteur spécifique.

4.2.2 Évolution des données continues sur les séquences évènementielles

Les capsules vidéos présentent les informations de terrain sur des périodes limitées par divers évènements susceptibles de modifier la structure du sol. Ces capsules vidéos prouvent la variation temporelle des courbes de rétention. Si les courbes étaient statiques, comme l'assume BORDONI et al. (2017), le graphique des vidéos devrait se superposer parfaitement sur une courbe unique.

Le choix de la valeur de pluie limite est arbitrairement posé à 10 mm/jour. Si cette quantité de pluie est déversée de manière diffuse sur la période d'une journée, elle représente moins de 0.5 mm/h. Ce qui est inférieur à une pluie faible diffuse selon Météo France. Par contre, si celle-ci se déverse sur une période d'une heure (10 mm/h) alors la pluie est catégorisée comme intense.

Les informations météorologiques n'ayant pas été traitées sur un pas de temps inférieur à la journée, la limite de 10 mm/jour a été arbitrairement posée.

Il serait, cependant, judicieux de potentiellement travailler les données climatiques à une échelle temporelle plus réduite. Sur un pas de temps plus court, la lecture des évènements climatiques est plus précise.

Il pourrait aussi être envisagé d'adapter les limites selon les périodes. Dans les clips vidéos, certaines coupures semblent superflues de par leur proximité avec d'autres évènements. Dès lors, des périodes aussi courtes qu'une journée sont mises en graphique. Pour limiter ceci, une solution envisageable serait de créer une limite plus haute lors des mois plus humides ou d'empêcher la succession d'évènements trop proches les uns des autres.

La Figure 3.4 présente des séquences d'avril 2021, d'octobre à novembre 2021 et de septembre à novembre 2022. Elle montre des dynamiques de rétention en eau des sols radicalement différente entre quatre parcelles mitoyennes de granulométrie semblable. Cette représentation permet de visualiser en un clin d'oeil l'impact des techniques agricoles mises en place.

4.2.3 Évolution des données continues sur l'année

La séparation des informations par année permet de mettre en avant certaines tendances occultées par le spectre utilisé pour observer ces données, exposées dans les paragraphes précédents (Sections 4.2.1 et 4.2.2).

Le choix de la séparation de novembre 2020 à novembre 2021 et de novembre 2021 à novembre 2022 est une décision arbitraire basée sur la longueur du set de données accessible. Une séparation suivant le calendrier grégorien, du 1^{er} janvier au 31 décembre n'aurait pas d'intérêt spécifique et n'a donc pas été envisagée. Une séparation saisonnière pourrait aussi être envisagée pour visualiser à une échelle intermédiaire les effets de la pluviométrie.

En présentant les résultats sur une échelle de temps annuelle, il est possible de distinguer une année largement plus humide (2020-2021) et une année plus sèche (2021-2022). En effet, en 2020-2021, les teneurs en eau sont comprises entre 0.25 et 0.4 m³/m³ et ne dépassent

jamais une tension de 100 kPa.

Les teneurs en eau et les potentiels matriciels des parcelles 6 et 7 couvrent une gamme de mesures visiblement plus grande que les parcelles 5 et 8. Ceci s'interprète comme une saturation plus forte du sol qui s'assèche aussi plus rapidement.

Ceci peut être lié à une particularité culturale de betteraves. Pour confirmer cette hypothèse, une étude approfondie du bilan hydrique des cultures pourrait être menée. Ceci peut aussi être interprété comme l'effet de la compaction induite par le poids important des machines de récolte des betteraves. Cet effet est d'ailleurs observable dans les séquences plus courtes présentées dans les vidéos.

Lors de la seconde année, 2021-2022, les teneurs en eau couvrent des gammes de valeur plus larges approchant parfois presque $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ et des pressions hautes. Cette année a la particularité de suivre la même culture, le froment, toutes parcelles confondues. Ceci à l'intérêt de mettre en avant la réaction d'un sol globalement similaire face aux différents itinéraires techniques.

Sur cette année en particulier, les données des parcelles 5 et 6 couvrent la large gamme de teneur en eau suivant un profil singulier. Aucune hystérèse n'apparaît, mais le bruit et la superposition des données des trois horizons peuvent obstruer la vision de ces particularités. La séparation des trois graphiques permettrait potentiellement de visualiser ces phénomènes. Dans le cas présent, les graphiques ont été présentés sous la forme suivante pour, d'une part, condenser les informations et, d'autre part, comparer l'évolution des trois horizons.

Les parcelles 7 et 8 (Section 3.2.3) présentent des profils plus erratiques. Ce comportement semble être influencé par deux tendances différentes.

La parcelle 7 a subi une forte compaction lors de la récolte des betteraves, à l'instar de la parcelle 6. À la différence de celle-ci, l'utilisation de produits de phytoremédiation a pu dénaturer le biome du sol. De cette manière, l'absence de vers de terre, de micro-organismes et de déchets racinaires (liés à la présence de mauvaises herbes), ralentirait la restructuration du sol. Ce phénomène expliquerait ici le comportement des CRE observées aux différents horizons de la parcelle 7.

La parcelle 8 montre des CRE plus variées qui s'expliquent par l'absence de forte perturbation du sol pendant la saison 2020-2021 où de la caméline était cultivée. En effet, les machines plus légères, les actions agricoles moins fréquentes et moins intrusives permettent aux micro-organismes et biome en général de se développer plus promptement.

De manière générale, tous les graphiques mettent en avant des dynamiques de variation très importantes pour l'horizon de surface, intermédiaire pour le second horizon et faible pour l'horizon le plus profond. Le horizon de surface est le premier soumis aux perturbations et le plus impacté par celles-ci. Les mesures *in situ* relatives aux trois horizons étant disponibles, il pourrait être intéressant de quantifier l'impact et/ou le temps de réaction des différents horizons à certains événements (YANG et al., 2022).

4.3 Comparaison des trois méthodes

Pour rappel, la comparaison des différentes méthodes d'acquisition de CRE concernent la CRE théorique d'EU-HYDI, la CRE ajustée sur l'entièreté des données *in situ* ainsi que les

CRE de laboratoire pour le premier horizon de chaque parcelle.

La décision a été de ne travailler que sur les informations du premier horizon. En effet, il est le premier affecté par les averses et les perturbations diverses, le plus accessible et le plus fréquemment étudié (MINASNY et FIELD, 2005; MINASNY et FIELD, 2005; HUANG et al., 2021). Les résultats développés ici ont donc un intérêt au-delà du contexte particulier de cette étude.

La tendance générale des résultats place la CRE théorique EU-HYDI dans un champ de teneur en eau supérieure aux informations déterminées par les autres méthodes. Cette observation s'explique en partie par la méthode initiale de détermination des FPT. La base de données employée provient de courbes réalisées en laboratoire par la méthode de Richard ou des bacs de sable (TÓTH et al., 2015). Ces méthodes ont tendance à révéler des CRE avec des θ_s plus saturées que les méthodologies par évaporation MES, employées dans ce travail. L'observation faite confirme cette tendance.

Comme discuté plus haut, les courbes établies par les données de terrain ont été ajustées par un polynôme d'ordre 3. Ce degré a été choisi lorsque la CR ajustée était monotone décroissante. Dans le cas contraire, un polynôme de degré 1 a été employé. La courbe ajustée de la parcelle 8 a été déterminée par une fonction du premier degré et présente donc une allure plus abrupte à l'approche de la valeur de saturation. Ce choix technique entraîne une amplitude d'évolution des courbes (c'est-à-dire Δ) de l'ordre de $0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Cet exemple montre la faiblesse de la méthode. D'une part, l'indicateur ne regarde qu'une gamme de tension limitée entre 0 et -67.4 kPa. D'autre part, l'ajustement polynomial de degré 1 atteint une valeur de teneur en eau proche de la saturation très rapidement. La valeur de Δ est donc, dans ce cas-ci, non représentative.

Bien que les Δ varient pour une parcelle donnée, les Δ des CRE ajustées et ceux des CRE de laboratoire sont les proches l'une de l'autre. Cette proximité de valeur exprime une tendance d'évolution similaire.

La gamme de rétention couverte par la CRE déterminée au laboratoire est, dans les quatre situations étudiées, compris entre, la CRE ajustée aux données de terrain et la CRE théorique d'EU-HYDI. Il faut malgré tout considérer le fait que la CRE réalisée en laboratoire correspond à un statut spécifique. En effet, elle n'est que le reflet de la structure du sol effective le jour du prélèvement. Elle est également dépendante de la variabilité spatiale. Pour amoindrir cette dernière, la moyenne de plusieurs répétitions peut être réalisée.

Des informations *in situ* pour des valeurs de pression supérieure à -9 kPa sont manquantes. Cela induit une indétermination qui ne permet pas d'affirmer la cohérence réelle des données déterminées de manière expérimentale. L'incertitude quant à la possibilité d'atteindre une saturation complète reste et les informations de laboratoire déterminées par les MES permettent de combler ce manque sans pour autant atteindre systématiquement l'extrême théorique.

4.4 Rendements agronomiques

Pour rappel, les rendements agronomiques des parcelles ont été déterminés par l'équipe de l'essai *EcoFoodSystem* et sont regroupés en Section 2.8.

Les rendements couvrent les deux années actuelles d'exploitation :

- la première année, les cultures implantées dépendaient du système de rotation exploité ;
- la seconde année toutes les parcelles étaient sous une culture de froment d'hiver.

Dans un but analytique de comparaison entre différentes pratiques culturales, l'implantation d'une culture similaire est un atout. Ceci aurait permis de conclure de manière plus décisive l'effet de cette seule pratique.

Dans la situation de l'année 2020-2021, trop de facteurs différents peuvent intervenir et influencer les résultats agronomiques.

L'année 2021-2022 et son couvert identique permettent de tracer des tendances entre les rendements de froment d'hiver et l'impact des pratiques agricoles sur celles-ci. Les facteurs de biais étant plus faibles, les rendements hydriques des parcelles peuvent y être comparés. En effet, le rendement de froment le plus important est observé pour les parcelles pour lesquelles une rotation alternative (agroécologique et végétalienne) est mise en place. Ceci peut s'expliquer par des biais agronomiques tels qu'un biome plus actif.

Par ailleurs, le lien avec les dynamiques hydrologiques est difficilement analysable, car les informations synthétiques de stocks hydriques par parcelle ne sont pas accessibles. De manière globale et avec les résultats préliminaires ici regroupés, il semblerait que la parcelle 8 (végétalienne) présente des capacités de rétention plus grandes de par sa gamme de teneur en eau plus élevée. Son allure "en cloche" lui confère une rétention maintenue élevée pour des tensions qui augmentent. La parcelle 7 (hors sol sans phyto) procède une large gamme de teneur en eau, mais son profil erratique ne permet pas d'affirmer que cela résultera en une bonne rétention. Les parcelles 5 et 6 (agroécologique et hors sol sans phyto) ont, quant à elles, des profils de teneurs en eau plus déportés sur la gauche, dans des gammes de teneur en eau plus faibles.

Dans l'objectif de déterminer le meilleur compromis entre une culture rentable avec un rendement moyen et une gestion des stocks hydriques acceptable, il serait intéressant déterminer le bilan hydrique de chaque parcelle.

Chapitre 5

Conclusion et perspectives

Le travail réalisé s'inscrit dans un projet plus vaste traitant de l'intérêt et de la résilience de systèmes de rotations innovants (végétalien, agroécologique et hors sol) ainsi que de l'impact de ces différents itinéraires agricoles sur l'environnement. L'étude ici présentée s'est orientée sur l'impact de ces méthodes agronomiques sur les paramètres hydrologiques des sols. Les objectifs poursuivis étaient donc multiples.

Le but de cette étude était dans un premier temps de qualifier la variabilité des propriétés hydrologiques entre trois modes de détermination : théorique, expérimentale et *in situ*. Dans un second temps, il s'agissait d'étudier l'influence des événements agronomiques et climatiques sur les dynamiques de rétention en eau des sols. Pour finir, le dernier objectif était de déterminer la potentielle relation entre les performances agronomiques des différents systèmes étudiés et leurs réactions hydrologiques.

La rétention en eau du sol peut être caractérisée par le biais de diverses méthodes. Pour commencer, a été établie une première comparaison des méthodes théoriques les plus employées dans le monde. Les FPT ROSETTA 1, 2 et 3 ont été analysées ainsi qu'HYPRES et EU-HYDI.

Pour les FPT de classe (HYPRES et ROSETTA 1), la classe texturale est définie différemment en fonction du référentiel employé (respectivement la FAO et l'USDA). Cela engendre des résultats très distincts pour un même sol.

Les FPT continues sont basées sur la granulométrie (ROSETTA 2, 3 et EU-HYDI), sur la granulométrie et la densité apparente (ROSETTA 3 et EU-HYDI) et sur ces facteurs et la teneur en carbone organique (EU-HYDI). Pour celles-ci, il semblerait que l'adaptation de la CRE soit proportionnelle au nombre de variables prises en compte. Les CRE EU-HYDI montrent une forte sensibilité à la teneur en carbone des sols.

La seconde comparaison opérée met en relation les CRE EU-HYDI, les CRE expérimentales et les CRE de terrain. Les résultats issus de cette analyse mettent en exergue la surestimation générale de la CRE théorique, l'incapacité technique de visualiser la dynamique des sols en dessous de la valeur seuil de -9 kPa et la position intermédiaire des informations expérimentales.

Pour confirmer cette tendance, certaines améliorations peuvent être apportées à la méthodologie appliquée. Il serait, par exemple, intéressant de traiter en laboratoire l'ensemble des échantillons prélevés en structure conservée. De ce fait, une moyenne pourrait être obtenue des informations récoltées par parcelle ce qui lisserait la variabilité spatiale des échantillons. Une

autre possibilité est de séparer les informations relatives à chaque horizon pour permettre une vision plus précises des informations.

Le phénomène d'hystérèse, l'impact des pratiques agricoles ou encore l'évolution de la structure du sol sont tous des facteurs externes lissés par les courbes ajustées sur les données de terrain. Pour palier à cet effet, il serait aussi judicieux d'envisager une détermination des CRE ajustées sur des séquences spécifiques à chaque facteur pour en visualiser son impact. Pour exemple, pour visualiser l'impact du phénomène d'hystérèse, les données relatives à des périodes d'humidification ou d'assèchement continues pourraient être ajustées séparément avant d'être comparées.

Ensuite, une corrélation entre la dynamique d'évolution des CRE et des événements agronomiques et climatiques a été observée. Dans un premier temps, il a été constaté qu'à l'échelle annuelle, la pluviométrie totale impactait fortement le profil de rétention des sols. En effet, les mesures de rétention relevées pour l'année 2020-2021, considérée comme une année pluvieuse, stagnent dans des gammes de teneur en eau proches de la saturation. À l'inverse, l'année 2021-2022 est une année sèche et montre une évolution de la CRE dans des gammes plus grandes.

Dans un second temps, les impacts des événements agronomiques et du système de rotation suivi semblent perdurer dans le temps. En effet, les parcelles réagissent de manière singulière sous un couvert végétal similaire.

Les parcelles 5 (agroécologique) et 6 (hors-sol sans phyto) présentent des profils de rétention plus progressifs que les autres parcelles. Ils évoluent plus rapidement dans des gammes de faibles teneurs allant jusqu'à des valeurs proches de $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Les horizons de la parcelle 7 (hors-sol phyto) présentent un profil plus erratique de leur dynamique de rétention. Celui-ci progresse dans des limites de teneur en eau plus grandes ($0.2 - 0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$). Ce serait dû à l'action des machines agricoles ainsi qu'à l'absence d'adventices.

Le profil de rétention de la parcelle 8 (végétalisée) est étendu sur des valeurs de teneur en eau plus élevées. Son allure "en cloche" lui confère une rétention maintenue élevée pour des tensions qui augmentent. Cette allure serait due aux perturbations agricoles modérées subies durant l'année précédente. Ainsi, le biome plus actif et le sol moins compacté permettraient alors une meilleure répartition du profil de rétention en eau.

La parcelle 7 (hors sol phyto) couvre une gamme de teneur en eau similaire à la parcelle 8 mais présente un profil erratique qui rend ardu son interprétation.

Ces analyses pourraient être affinées notamment par l'emploi d'un calendrier de ruptures événementielles plus adapté. Il serait, en effet, judicieux de travailler les données climatiques à une échelle temporelle plus réduite. Sur un pas de temps plus court, la lecture des événements climatiques est plus précise. Il pourrait être alors envisagé de sélectionner des pluies supérieures à 10 mm/h et non, 10 mm/jour . De cette manière, les événements pluviométriques sélectionnés feront référence, avec certitude, à des averses.

Une autre méthode de sélection d'évènement serait de créer une limite plus haute lors des mois plus humides ou d'empêcher la succession d'évènements trop proches les uns des autres.

Pour confirmer ces hypothèses, il serait pertinent de les comparer avec les futures données obtenues. De ce fait, des tendances de rétention pourraient, ou non, être confirmées.

Pour finir, l'établissement d'une relation entre les performances agronomiques des parcelles et leur dynamique de rétention en eau a été amorcé dans ce travail.

Les résultats préliminaires montrent que la parcelle 8 (végétalienne) présente des capacités de rétention plus grandes.

Les rendements agricoles les plus importants ont été répertoriés sur les parcelles proposant un système de rotation végétalien et agroécologique. Les résultats hydrodynamiques, quant à eux, montrent une rétention plus importante des sols soumis aux rotations végétalienne et hors sol phyto. Ces résultats préliminaires ne permettent pas de dégager des conclusions claires sur le sujet.

Pour qualifier la réaction hydrique des sols, il pourrait être envisagé d'étudier la réaction des parcelles face à une pluie faible, moyenne et forte. De ce fait, la dynamique hydrique des parcelles pourra être déterminée et analysée au regard des rendements agronomiques. Cette modélisation évaluerait d'une part la variabilité de la capacité de rétention d'un sol soumis à des événements externes. D'autre part, elle permettrait de mettre en avant les propriétés de résilience de chaque parcelle selon différents types d'évènements pluvieux. De cette manière, les indicateurs de stress hydriques tels que le nombre de jours sous la réserve facilement utilisable (RFU), la sévérité et la durée des stress hydriques, les dates d'occurrence de ces stress, etc. seraient à disposition et pourraient être mis en parallèle du calendrier agronomique.

Chapitre 6

Bibliographie

- AL MAJOU, H., BRUAND, A., DUVAL, O., & COUSIN, I. (2007). Variation of the water-retention properties of soils : validity of class-pedotransfer functions. *Comptes Rendus Geoscience*, 339(9), 632-639. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.07.005>
- ALVAREZ, R., & STEINBACH, H. S. (2009). A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the argentine pampas. *Soil and Tillage Research*, 104(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.02.005>
- AMORIM, R. S. S., ALBUQUERQUE, J. A., COUTO, E. G., KUNZ, M., RODRIGUES, M. F., SILVA, L. d. C. M. d., & REICHERT, J. M. (2022). Water retention and availability in brazilian cerrado (neotropical savanna) soils under agricultural use : pedotransfer functions and decision trees. *Soil and Tillage Research*, 224, 105485. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105485>
- ANKENBAUER, K., & LOHEIDE, S., II. (2017). The effects of soil organic matter on soil water retention and plant water use in a meadow of the Sierra Nevada, CA. *Hydrological Processes*, 31(4), 891-901. <https://doi.org/10.1002/hyp.11070>
- ARHEIMER, B., ANDRÉASSON, J., FOGELBERG, S., JOHNSON, H., PERS, C., & PERSSON, K. (2005). Climate change impact on water quality : Model results from southern Sweden. *Ambio*, 34(7), 559-566. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-34.7.559>
- ASSOULINE, S., & OR, D. (2013). Conceptual and Parametric Representation of Soil Hydraulic Properties : A Review. *Vadose Zone Journal*, 12(4), vzj2013.07.0121. <https://doi.org/10.2136/vzj2013.07.0121>
- BITTELLI, M., & FLURY, M. (2009). Errors in water retention curves determined with pressure plates. *Soil Science Society of America Journal*, 73(5), 1453-1460. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0082>
- BORDONI, M., BITTELLI, M., VALENTINO, R., CHERSICH, S., & MEISINA, C. (2017). Improving the estimation of complete field soil water characteristic curves through field monitoring data. *Journal of Hydrology*, 552, 283-305. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.004>
- BROOKS, R. H., & COREY, A. T. (1964). Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Paper*, 27.
- CAMPBELL, C. S., COBOS, D. R., RIVERA, L. D., DUNNE, K. M., & CAMPBELL, G. S. (2012). Constructing fast, accurate soil water characteristic curves by combining the wind/schindler and vapor pressure techniques. In C. MANCUSO, C. JOMMI & F. D'ONZA (Éd.), *Unsaturated soils : research and applications* (p. 55-62). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31116-1_8

- CAMPBELL, G. S., & GEE, G. W. (1986). Water potential : miscellaneous methods. In *Methods of soil analysis* (p. 619-633). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c25>
- CASINI, F., VAUNAT, J., ROMERO, E., & DESIDERI, A. (2012). Consequences on water retention properties of double-porosity features in a compacted silt. *Acta Geotechnica*, 7(2), 139-150. <https://doi.org/10.1007/s11440-012-0159-6>
- CASSINARI, C., MANFREDI, P., GIUPPONI, L., TREVISAN, M., & PICCINI, C. (2015). Relationship between hydraulic properties and plant coverage of the closed-landfill soils in Piacenza (Po Valley, Italy). *Solid Earth*, 6(3), 929-943. <https://doi.org/10.5194/se-6-929-2015>
- DASHTAKI, S., HOMAEI, M., & KHODAVERDILOO, H. (2010). Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. *Soil Use and Management*, 26(1), 68-74. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00254.x>
- GAISER, T., GRAEF, F., & CORDEIRO, J. C. (2000). Water retention characteristics of soils with contrasting clay mineral composition in semi-arid tropical regions. *Soil Research*, 38(3), 523-536. <https://doi.org/10.1071/sr99001>
- GERIS, J., VERROT, L., GAO, L., PENG, X., OYESIKU-BLAKEMORE, J., SMITH, J. U., HODSON, M. E., MCKENZIE, B. M., ZHANG, G., & HALLETT, P. D. (2021). Importance of short-term temporal variability in soil physical properties for soil water modelling under different tillage practices. *Soil and Tillage Research*, 213, 105132. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105132>
- GUARRACINO, L. (2007). Estimation of saturated hydraulic conductivity k_s from the van genuchten shape parameter. *Water Resources Research*, 43(11). <https://doi.org/10.1029/2006WR005766>
- HUANG, X., WANG, H., ZHANG, M., HORN, R., & REN, T. (2021). Soil water retention dynamics in a mollisol during a maize growing season under contrasting tillage systems. *Soil and Tillage Research*, 209, 104953. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104953>
- IYAMA, I. (2016). Differences between field-monitored and laboratory-measured soil moisture characteristics. *Soil Science and Plant Nutrition*, 62(5), 416-422. <https://doi.org/10.1080/00380768.2016.1242367>
- JABRO, J. D., EVANS, R. G., KIM, Y., & IVERSEN, W. M. (2009). Estimating in situ soil-water retention and field water capacity in two contrasting soil textures. *Irrigation Science*, 27(3), 223-229. <https://doi.org/10.1007/s00271-008-0137-9>
- KLUTE, A. (1986). Water retention : laboratory methods. In *Methods of soil analysis* (p. 635-662). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c26>
- LEHNER, B., DÖLL, P., ALCAMO, J., HENRICH, T., & KASPAR, F. (2006). Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe : a continental, integrated analysis. *Climatic Change*, 75(3), 273-299. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-6338-4>
- LINNEROOTH-BAYER, J., DUBEL, A., SENDZIMIR, J., & HOCHRAINER-STIGLER, S. (2015). Challenges for mainstreaming climate change into EU flood and drought policy : water retention measures in the Warta river basin, Poland. *Regional Environmental Change*, 15(6), 1011-1023. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0643-7>
- LIPIEC, J., & HATANO, R. (2003). Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, 116(1), 107-136. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00097-1)
- LU, N., GODT, J., & WU, D. (2010). A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil. *Water Resour. Res.*, 46(5).
- LU, N., & GODT, J. W. (2013). *Hillslope hydrology and stability*. Cambridge University Press.

- MCBRATNEY, A. B., MINASNY, B., CATTLE, S. R., & VERVOORT, R. W. (2002). From pedo-transfer functions to soil inference systems. *Geoderma*, 109(1), 41-73. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00139-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00139-8)
- MINASNY, B., & FIELD, D. J. (2005). Estimating soil hydraulic properties and their uncertainty : the use of stochastic simulation in the inverse modelling of the evaporation method. *Geoderma*, 126(3), 277-290. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.09.015>
- MUALEM, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513-522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
- NEBEL, Á. L. C., TIMM, L. C., CORNELIS, W., GABRIELS, D., REICHARDT, K., AQUINO, L. S., PAULETTO, E. A., & REINERT, D. J. (2010). Pedotransfer functions related to spatial variability of water retention attributes for lowland soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34, 669-680. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300008>
- NEMES, A., & RAWLS, W. J. (2006). Evaluation of different representations of the particle-size distribution to predict soil water retention. *Geoderma*, 132(1), 47-58. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.04.018>
- NGO-CONG, D., ANTILLE, D., TH. VAN GENUCHTEN, M., NGUYEN, H., TEKESTE, M., BAILLIE, C., & GODWIN, R. (2021). A modeling framework to quantify the effects of compaction on soil water retention and infiltration. *Soil Science Society of America Journal*, 85(6), 1931-1945. <https://doi.org/10.1002/saj2.20328>
- PARK, Y., KIM, Y., PARK, S.-K., SHIN, W.-J., & LEE, K.-S. (2018). Water quality impacts of irrigation return flow on stream and groundwater in an intensive agricultural watershed. *Science of The Total Environment*, 630, 859-868. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.113>
- PETERS, A., & DURNER, W. (2006). Improved estimation of soil water retention characteristics from hydrostatic column experiments. *Water Resources Research*, 42(11). <https://doi.org/10.1029/2006WR004952>
- PETERS, A., & DURNER, W. (2008). Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties. *Journal of Hydrology*, 356(1), 147-162. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.04.016>
- PIMENTEL, D. (1996). Green revolution agriculture and chemical hazards. *Science of The Total Environment*, 188, S86-S98. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(96\)05280-1](https://doi.org/10.1016/0048-9697(96)05280-1)
- RADCLIFFE, D. E., & SIMUNEK, J. (2010). *Soil Physics with HYDRUS / Modeling and Applications* (1st Edition). CRC Press.
- RICHARD, G., COUSIN, I., SILLON, J., BRUAND, A., & GUÉRIF, J. (2001). Effect of compaction on the porosity of a silty soil : Influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 52(1), 49-58. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00357.x>
- ROBINSON, R., & SUTHERLAND, W. (2002). Post-war changes in arable farming and biodiversity in Great Britain. *Journal of Applied Ecology*, 39(1), 157-176. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2002.00695.x>
- SCHAAP, M. G., & LEIJ, F. J. (2000). Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the mualem-van genuchten model. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), 843-851. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.643843x>
- SCHAAP, M. G., LEIJ, F. J., & van GENUCHTEN, M. T. (2001). Rosetta : a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251(3), 163-176. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00466-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00466-8)
- SCHINDLER, U., & MÜLLER, L. (2006). Simplifying the evaporation method for quantifying soil hydraulic properties. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 169(5), 623-629. <https://doi.org/10.1002/jpln.200521895>

- SZPAKOWSKA, B., ŚWIERK, D., DUDZIŃSKA, A., PAJCHROWSKA, M., & GOŁDYN, R. (2022). The influence of land use in the catchment area of small waterbodies on the quality of water and plant species composition. *Scientific Reports*, 12(1), 7265. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11115-w>
- TIAN, Z., CHEN, J., CAI, C., GAO, W., REN, T., HEITMAN, J. L., & HORTON, R. (2021). New pedotransfer functions for soil water retention curves that better account for bulk density effects. *Soil and Tillage Research*, 205, 104812. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104812>
- TÓTH, B., WEYNANTS, M., NEMES, A., MAKÓ, A., BILAS, G., & TÓTH, G. (2015). New generation of hydraulic pedotransfer functions for europe. *European Journal of Soil Science*, 66(1), 226-238. <https://doi.org/10.1111/ejss.12192>
- van GENUCHTEN, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- VRYZAS, Z. (2018). Pesticide fate in soil-sediment-water environment in relation to contamination preventing actions. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 4, 5-9. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.03.001>
- WEYNANTS, M., MONTANARELLA, L., TOTH, G., ARNOLDUSSEN, A., ANAYA ROMERO, M., BILAS, G., BORRESEN, T., CORNELIS, W., DAROUSSIN, J., GONÇALVES, M. D. C., HAUGEN, L.-E., HENNINGS, V., HOUSKOVA, B., IOVINO, M., JAVAUX, M., KEAY, C. A., KÄTTERER, T., KVAERNO, S., LAKTIKOVA, T., ... WOESTEN, H. (2013). *European Hydrogeological Data Inventory (EU-HYDI)*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2788/5936>
- WHITEHEAD, P., WILBY, R., BATTARBEE, R., KERNAN, M., & WADE, A. (2009). A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrological Sciences Journal*, 54(1), 101-123. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.1.101>
- WILLETT, W., ROCKSTRÖM, J., LOKEN, B., SPRINGMANN, M., LANG, T., VERMEULEN, S., GARNETT, T., TILMAN, D., DECLERCK, F., WOOD, A., JONELL, M., CLARK, M., GORDON, L. J., FANZO, J., HAWKES, C., ZURAYK, R., RIVERA, J. A., DE VRIES, W., MAJELE SIBANDA, L., ... MURRAY, C. J. L. (2019). Food in the anthropocene : the EAT-lancet commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170), 447-492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)
- WÖSTEN, J. H. M., LILLY, A., NEMES, A., & LE BAS, C. (1999). Development and use of a database of hydraulic properties of european soils. *Geoderma*, 90(3), 169-185. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00132-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00132-3)
- YANG, P., DONG, W., HEINEN, M., QIN, W., & OENEMA, O. (2022). Soil Compaction Prevention, Amelioration and Alleviation Measures Are Effective in Mechanized and Smallholder Agriculture : A Meta-Analysis. *Land*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/land11050645>

Chapitre 7

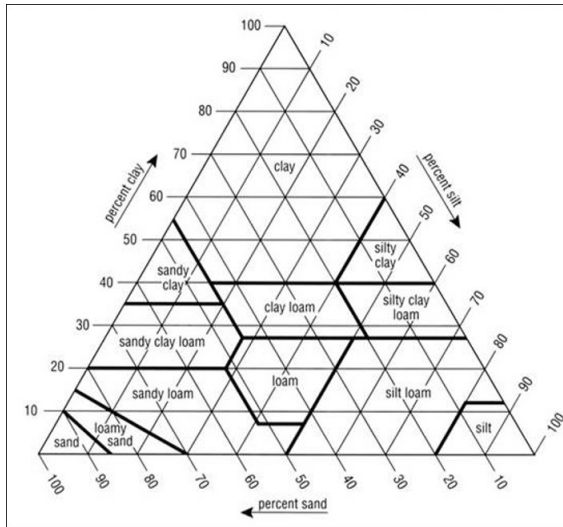
Annexes

7.1 Annexe 1

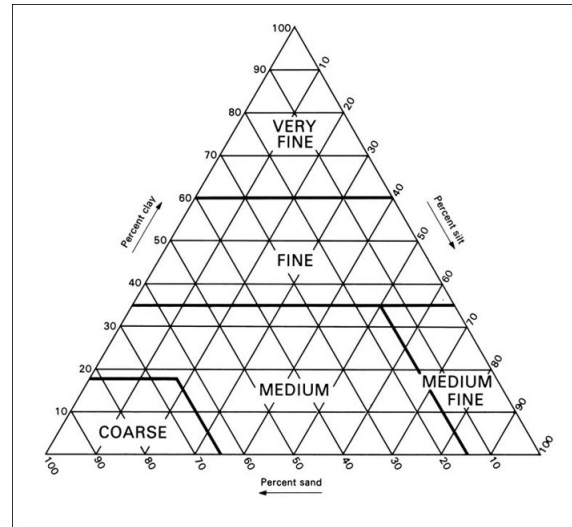


FIGURE 7.1 – Méthode de prélèvement des échantillons en structure conservée

7.2 Annexe 2



(a) Triangle textural de l'USDA



(b) Triangle textural de la FAO

FIGURE 7.2 – Différence entre les triangles texturaux de la FAO et de l'USDA

7.3 Annexe 3

TABLE 7.1 – EU-HYDI : FPT 21

Propriété hydraulique du sol prédites	Type de modèle	Modèle de prédiction
Courbe de rétention en eau du sol $(\theta_r / \text{cm}^3 \text{ cm}^{-3},$ $\theta_s / \text{cm}^3 \text{ cm}^{-3},$ $\log_{10}(\alpha) / \log_{10}(\text{cm}^{-1}),$ $\log_{10}(n-1) / -$ Paramètre du modèle VG)	Arbre de régression (pour θ_r)	Rule 1 IF $Sa \geq 2.00$ $\theta_r = 0.041$
	et Régression linéaire (pour $\theta_s,$ $\log_{10}(\alpha)$ et $\log_{10}(n-1)$)	Rule 2 IF $Sa < 2.00$ $\theta_r = 0.179$ $\theta_s = 0.83080 - 0.28217 * BD + 0.0002728 * Cl + 0.000187 * Si$ $\log_{10}(\alpha) = -0.43348 - 0.41729 * BD - 0.04762 * OC + 0.21810 * T/S - 0.01581 * Cl - 0.01207 * Si$ $\log_{10}(n-1) = 0.22236 - 0.30189 * BD - 0.05558 * T/S - 0.005306 * Cl - 0.003084 * Si - 0.01072 * OC$

Où Sa est la teneur en sable (50-2000 μm) (%); Si , teneur en limon (2-50 μm) (%); Cl , la teneur en argile (0-2 μm) (%); BD , la densité apparente (g/cm^3); OC , la teneur en carbone organique (%) et T/S , la distinction entre topsoil et subsoil (TÓTH et al., 2015).

7.4 Annexe 4

TABLE 7.2 – Calendrier événementiel de la parcelle 5.

Parcelle	Date	Type	Précision technique ou mm/jour
	2020-12-01 09 :00 :00	Pluvio	13.1
	2020-12-23 09 :00 :00	Pluvio	11.6
	2021-01-12 09 :00 :00	Pluvio	13.7
	2021-01-28 09 :00 :00	Pluvio	13.3
	2021-01-29 09 :00 :00	Pluvio	10.8
	2021-02-03 09 :00 :00	Pluvio	21.2
	2021-02-06 09 :00 :00	Pluvio	14.6
	2021-03-04 09 :00 :00	Pluvio	11.9
	2021-04-10 09 :00 :00	Pluvio	18.2
5	2021-04-20 09 :00 :00	Agro	Gestion interculture / Labour / Préparation du sol
5	2021-04-22 09 :00 :00	Agro	Préparation du sol
5	2021-05-11 09 :00 :00	Agro	Fumure
5	2021-05-12 09 :00 :00	Agro	Semis maïs
	2021-06-02 09 :00 :00	Pluvio	23
5	2021-06-15 09 :00 :00	Agro	Houe Rotative
	2021-06-18 09 :00 :00	Pluvio	13.8
	2021-06-19 09 :00 :00	Pluvio	10.7
	2021-06-21 09 :00 :00	Pluvio	47.2
5	2021-06-26 09 :00 :00	Agro	Bineuse
	2021-06-29 09 :00 :00	Pluvio	11.2
	2021-06-30 09 :00 :00	Pluvio	20.5
	2021-07-03 09 :00 :00	Pluvio	18.4
	2021-07-04 09 :00 :00	Pluvio	12.3
5	2021-07-07 09 :00 :00	Agro	Bineuse
	2021-07-13 09 :00 :00	Pluvio	15.9
	2021-07-14 09 :00 :00	Pluvio	16.7
	2021-07-15 09 :00 :00	Pluvio	49
	2021-07-24 09 :00 :00	Pluvio	17.4
	2021-08-03 09 :00 :00	Pluvio	11.3
	2021-08-06 09 :00 :00	Pluvio	23.8
	2021-09-25 09 :00 :00	Pluvio	19
	2021-10-03 09 :00 :00	Pluvio	31.2
5	2021-11-29 09 :00 :00	Agro	Récolte
5	2021-12-15 09 :00 :00	Agro	Labour / semis froment d'hiver
	2021-12-25 09 :00 :00	Pluvio	15.9
	2022-01-04 09 :00 :00	Pluvio	10.6
5	2022-03-10 09 :00 :00	Agro	Houe Rotative
5	2022-03-11 09 :00 :00	Agro	Herse
5	2022-03-31 09 :00 :00	Agro	Fertilisation liquide
5	2022-04-20 09 :00 :00	Agro	Herse
5	2022-04-26 09 :00 :00	Agro	Desherbage liquide

5	2022-04-28 09 :00 :00	Agro	Fertilisation liquide
5	2022-05-03 09 :00 :00	Agro	Régulateur
	2022-05-23 09 :00 :00	Pluvio	10.5
	2022-06-05 09 :00 :00	Pluvio	16.7
	2022-06-08 09 :00 :00	Pluvio	16
	2022-06-09 09 :00 :00	Pluvio	10.4
	2022-06-25 09 :00 :00	Pluvio	11.8
	2022-06-30 09 :00 :00	Pluvio	13.3
5	2022-07-27 09 :00 :00	Agro	Récolte
	2022-09-03 09 :00 :00	Pluvio	13.3
	2022-09-05 09 :00 :00	Pluvio	13.6
	2022-09-09 09 :00 :00	Pluvio	11.3
	2022-09-14 09 :00 :00	Pluvio	36.3

TABLE 7.3 – Calendrier événementiel de la parcelle 6.

Parcelle	Date	Type	Précision technique ou mm/jour
	2020-12-01 09 :00 :00	Pluvio	13.1
	2020-12-23 09 :00 :00	Pluvio	11.6
	2021-01-12 09 :00 :00	Pluvio	13.7
	2021-01-28 09 :00 :00	Pluvio	13.3
	2021-01-29 09 :00 :00	Pluvio	10.8
	2021-02-03 09 :00 :00	Pluvio	21.2
	2021-02-06 09 :00 :00	Pluvio	14.6
	2021-03-04 09 :00 :00	Pluvio	11.9
	2021-04-10 09 :00 :00	Pluvio	18.2
6	2021-04-20 09 :00 :00	Agro	Gestion interculture / Labour / Préparation sol
6	2021-04-21 09 :00 :00	Agro	Fumure
6	2021-04-22 09 :00 :00	Agro	Préparation sol / semis
	2021-06-02 09 :00 :00	Pluvio	23
6	2021-06-09 09 :00 :00	Agro	Bineuse
6	2021-06-16 09 :00 :00	Agro	Bineuse
	2021-06-18 09 :00 :00	Pluvio	13.8
	2021-06-19 09 :00 :00	Pluvio	10.7
	2021-06-21 09 :00 :00	Pluvio	47.2
	2021-06-29 09 :00 :00	Pluvio	11.2
	2021-06-30 09 :00 :00	Pluvio	20.5
	2021-07-03 09 :00 :00	Pluvio	18.4
	2021-07-04 09 :00 :00	Pluvio	12.3
	2021-07-13 09 :00 :00	Pluvio	15.9
	2021-07-14 09 :00 :00	Pluvio	16.7
	2021-07-15 09 :00 :00	Pluvio	49
	2021-07-24 09 :00 :00	Pluvio	17.4
	2021-08-03 09 :00 :00	Pluvio	11.3
	2021-08-06 09 :00 :00	Pluvio	23.8
	2021-09-25 09 :00 :00	Pluvio	19
	2021-10-03 09 :00 :00	Pluvio	31.2
6	2021-11-09 09 :00 :00	Agro	Récolte
6	2021-12-15 09 :00 :00	Agro	Labour / semis froment d'hiver
	2021-12-25 09 :00 :00	Pluvio	15.9
	2022-01-04 09 :00 :00	Pluvio	10.6
6	2022-03-10 09 :00 :00	Agro	Houe Rotative
6	2022-03-11 09 :00 :00	Agro	Herse
6	2022-03-31 09 :00 :00	Agro	Fertilisation liquide
6	2022-04-20 09 :00 :00	Agro	Herse
6	2022-04-26 09 :00 :00	Agro	Desherbage liquide
6	2022-04-28 09 :00 :00	Agro	Fertilisation liquide
6	2022-05-03 09 :00 :00	Agro	Régulateur
	2022-05-23 09 :00 :00	Pluvio	10.5
	2022-06-05 09 :00 :00	Pluvio	16.7

	2022-06-08 09 :00 :00	Pluvio	16
	2022-06-09 09 :00 :00	Pluvio	10.4
	2022-06-25 09 :00 :00	Pluvio	11.8
	2022-06-30 09 :00 :00	Pluvio	13.3
6	2022-07-27 09 :00 :00	Agro	Récolte
	2022-09-03 09 :00 :00	Pluvio	13.3
	2022-09-05 09 :00 :00	Pluvio	13.6
	2022-09-09 09 :00 :00	Pluvio	11.3
	2022-09-14 09 :00 :00	Pluvio	36.3
	2022-09-09 09 :00 :00	Pluvio	11.3
	2022-09-14 09 :00 :00	Pluvio	36.3

TABLE 7.4 – Calendrier événementiel de la parcelle 7.

Parcelle	Date	Type	Précision technique ou mm/jour
	2020-12-01 09 :00 :00	Pluvio	13.1
	2020-12-23 09 :00 :00	Pluvio	11.6
	2021-01-12 09 :00 :00	Pluvio	13.7
	2021-01-28 09 :00 :00	Pluvio	13.3
	2021-01-29 09 :00 :00	Pluvio	10.8
	2021-02-03 09 :00 :00	Pluvio	21.2
	2021-02-06 09 :00 :00	Pluvio	14.6
	2021-03-04 09 :00 :00	Pluvio	11.9
	2021-04-10 09 :00 :00	Pluvio	18.2
7	2021-04-20 09 :00 :00	Agro	Gestion interculture / Labour / Préparation sol
7	2021-04-21 09 :00 :00	Agro	Fumure
7	2021-04-22 09 :00 :00	Agro	Préparation sol / semis
7	2021-05-20 09 :00 :00	Agro	Désherbage
7	2021-05-30 09 :00 :00	Agro	Désherbage
	2021-06-02 09 :00 :00	Pluvio	23
7	2021-06-08 09 :00 :00	Agro	Désherbage
7	2021-06-09 09 :00 :00	Agro	Bineuse
	2021-06-18 09 :00 :00	Pluvio	13.8
	2021-06-19 09 :00 :00	Pluvio	10.7
	2021-06-21 09 :00 :00	Pluvio	47.2
	2021-06-29 09 :00 :00	Pluvio	11.2
	2021-06-30 09 :00 :00	Pluvio	20.5
	2021-07-03 09 :00 :00	Pluvio	18.4
	2021-07-04 09 :00 :00	Pluvio	12.3
	2021-07-13 09 :00 :00	Pluvio	15.9
	2021-07-14 09 :00 :00	Pluvio	16.7
	2021-07-15 09 :00 :00	Pluvio	49
	2021-07-24 09 :00 :00	Pluvio	17.4
	2021-08-03 09 :00 :00	Pluvio	11.3
	2021-08-06 09 :00 :00	Pluvio	23.8
	2021-09-25 09 :00 :00	Pluvio	19

	2021-10-03 09 :00 :00	Pluvio	31.2
7	2021-11-09 09 :00 :00	Agro	Récolte
7	2021-12-15 09 :00 :00	Agro	Labour / Semis froment d'hiver
	2021-12-25 09 :00 :00	Pluvio	15.9
	2022-01-04 09 :00 :00	Pluvio	10.6
7	2022-03-10 09 :00 :00	Agro	Houe Rotative
7	2022-03-11 09 :00 :00	Agro	Herse
7	2022-03-31 09 :00 :00	Agro	Fertilisation liquide
7	2022-04-20 09 :00 :00	Agro	Herse
7	2022-04-26 09 :00 :00	Agro	Désherbage liquide
7	2022-04-28 09 :00 :00	Agro	Fertilisation liquide
7	2022-05-03 09 :00 :00	Agro	Régulateur
	2022-05-23 09 :00 :00	Pluvio	10.5
	2022-06-05 09 :00 :00	Pluvio	16.7
	2022-06-08 09 :00 :00	Pluvio	16
	2022-06-09 09 :00 :00	Pluvio	10.4
	2022-06-25 09 :00 :00	Pluvio	11.8
	2022-06-30 09 :00 :00	Pluvio	13.3
7	2022-07-27 09 :00 :00	Agro	Récolte
	2022-09-03 09 :00 :00	Pluvio	13.3
	2022-09-05 09 :00 :00	Pluvio	13.6
	2022-09-09 09 :00 :00	Pluvio	11.3
	2022-09-14 09 :00 :00	Pluvio	36.3

TABLE 7.5 – Calendrier événementiel de la parcelle 8.

Parcelle	Date	Type	Précision technique ou mm/jour
	2020-12-01 09 :00 :00	Pluvio	13.1
	2020-12-23 09 :00 :00	Pluvio	11.6
	2021-01-12 09 :00 :00	Pluvio	13.7
	2021-01-28 09 :00 :00	Pluvio	13.3
	2021-01-29 09 :00 :00	Pluvio	10.8
	2021-02-03 09 :00 :00	Pluvio	21.2
	2021-02-06 09 :00 :00	Pluvio	14.6
	2021-03-04 09 :00 :00	Pluvio	11.9
	2021-04-10 09 :00 :00	Pluvio	18.2
8	2021-04-20 09 :00 :00	Agro	Labour / Préparation sol
8	2021-04-22 09 :00 :00	Agro	Préparation sol
8	2021-04-27 09 :00 :00	Agro	Semis
	2021-06-02 09 :00 :00	Pluvio	23
8	2021-06-15 09 :00 :00	Agro	Houe rotative
	2021-06-18 09 :00 :00	Pluvio	13.8
	2021-06-19 09 :00 :00	Pluvio	10.7
	2021-06-21 09 :00 :00	Pluvio	47.2
	2021-06-29 09 :00 :00	Pluvio	11.2
	2021-06-30 09 :00 :00	Pluvio	20.5
	2021-07-03 09 :00 :00	Pluvio	18.4

	2021-07-04 09 :00 :00	Pluvio	12.3
	2021-07-13 09 :00 :00	Pluvio	15.9
	2021-07-14 09 :00 :00	Pluvio	16.7
	2021-07-15 09 :00 :00	Pluvio	49
	2021-07-24 09 :00 :00	Pluvio	17.4
	2021-08-03 09 :00 :00	Pluvio	11.3
	2021-08-06 09 :00 :00	Pluvio	23.8
8	2021-09-02 09 :00 :00	Agro	Récolte
8	2021-09-03 09 :00 :00	Agro	Broyage de résidus
8	2021-09-06 09 :00 :00	Agro	Déchaumage
8	2021-09-22 09 :00 :00	Agro	Déchaumage
	2021-09-25 09 :00 :00	Pluvio	19
	2021-10-03 09 :00 :00	Pluvio	31.2
8	2021-12-15 09 :00 :00	Agro	Labour + semis froment d'hiver
	2021-12-25 09 :00 :00	Pluvio	15.9
	2022-01-04 09 :00 :00	Pluvio	10.6
8	2022-03-10 09 :00 :00	Agro	Houe Rotative
8	2022-03-11 09 :00 :00	Agro	Herse
8	2022-03-31 09 :00 :00	Agro	Fertilisation liquide
8	2022-04-20 09 :00 :00	Agro	Herse
8	2022-04-26 09 :00 :00	Agro	Desherbage liquide
8	2022-04-28 09 :00 :00	Agro	Fertilisation liquide
8	2022-05-03 09 :00 :00	Agro	Régulateur
	2022-05-23 09 :00 :00	Pluvio	10.5
	2022-06-05 09 :00 :00	Pluvio	16.7
	2022-06-08 09 :00 :00	Pluvio	16
	2022-06-09 09 :00 :00	Pluvio	10.4
	2022-06-25 09 :00 :00	Pluvio	11.8
	2022-06-30 09 :00 :00	Pluvio	13.3
8	2022-07-27 09 :00 :00	Agro	Récolte
	2022-09-03 09 :00 :00	Pluvio	13.3
	2022-09-05 09 :00 :00	Pluvio	13.6
	2022-09-09 09 :00 :00	Pluvio	11.3
	2022-09-14 09 :00 :00	Pluvio	36.3

7.5 Annexe 5

TABLE 7.6 – Paramètres de ROSETTA pour chaque horizon

Parcelle	Horizon	Modèle	θ_r (m ³ /m ³)	θ_s (m ³ /m ³)	α (-)	n (-)	K_s (cm/j.)
5 - Maïs	1	Rosetta 1	0.0501	0.4887	0.0066	1.6769	43.740
	1	Rosetta 2	0.0628	0.4786	0.0065	1.6491	24.630
	1	Rosetta 3	0.0579	0.4027	0.0066	1.6059	15.220
5 - Maïs	2	Rosetta 1	0.0501	0.4887	0.0066	1.6769	43.740
	2	Rosetta 2	0.0639	0.4809	0.0068	1.6415	22.850
	2	Rosetta 3	0.0652	0.4469	0.0057	1.6581	28.450
5 - Maïs	3	Rosetta 1	0.0645	0.4287	0.0051	1.6626	18.260
	3	Rosetta 2	0.0751	0.4593	0.0060	1.6198	13.740
	3	Rosetta 3	0.0765	0.4674	0.0054	1.6504	26.680
6 - Betterave (sans phyto)	1	Rosetta 1	0.0645	0.4387	0.0051	1.6626	18.260
	1	Rosetta 2	0.0680	0.4670	0.0061	1.6426	19.470
	1	Rosetta 3	0.0654	0.4243	0.0057	1.6421	18.310
6 - Betterave (sans phyto)	2	Rosetta 1	0.0645	0.4387	0.0051	1.6626	18.260
	2	Rosetta 2	0.0684	0.4657	0.0060	1.6427	19.150
	2	Rosetta 3	0.0637	0.4105	0.0060	1.6232	14.120
6 - Betterave (sans phyto)	3	Rosetta 1	0.0645	0.4387	0.0051	1.6626	18.260
	3	Rosetta 2	0.0781	0.4660	0.0067	1.5990	11.580
	3	Rosetta 3	0.0685	0.3986	0.0068	1.5550	5.370
7 - Betterave (phyto)	1	Rosetta 1	0.0645	0.4387	0.0051	1.6626	18.260
	1	Rosetta 2	0.0695	0.4664	0.0062	1.6369	18.000
	1	Rosetta 3	0.0644	0.4110	0.0061	1.6173	12.880
7 - Betterave (phyto)	2	Rosetta 1	0.0645	0.4387	0.0051	1.6626	18.260
	2	Rosetta 2	0.0805	0.4666	0.0068	1.5871	10.510
	2	Rosetta 3	0.0732	0.4138	0.0066	1.5694	5.970
7 - Betterave (phyto)	3	Rosetta 1	0.0645	0.4387	0.0051	1.6626	18.260
	3	Rosetta 2	0.0815	0.4663	0.0068	1.5818	10.310
	3	Rosetta 3	0.0734	0.4086	0.0068	1.5562	5.140
8 - Caméline	1	Rosetta 1	0.0645	0.4387	0.0051	1.6626	18.260
	1	Rosetta 2	0.0724	0.4613	0.0060	1.6304	15.690
	1	Rosetta 3	0.0648	0.3972	0.0064	1.5903	8.700
8 - Caméline	2	Rosetta 1	0.0645	0.4387	0.0051	1.6626	18.260
	2	Rosetta 2	0.0802	0.4662	0.0068	1.5888	10.730
	2	Rosetta 3	0.0770	0.4421	0.0062	1.6039	10.550
8 - Caméline	3	Rosetta 1	0.0645	0.4387	0.0051	1.6626	18.260
	3	Rosetta 2	0.0786	0.4665	0.0067	1.5962	11.410
	3	Rosetta 3	0.0696	0.4027	0.0067	1.5633	5.660