



HAL
open science

Analyse de la dynamique de l'eau dans le sol et élaboration d'indicateurs pour l'optimisation de l'irrigation en Agriculture de Conservation des sols

Anthony Lanos

► **To cite this version:**

Anthony Lanos. Analyse de la dynamique de l'eau dans le sol et élaboration d'indicateurs pour l'optimisation de l'irrigation en Agriculture de Conservation des sols. Sciences et techniques de l'agriculture. 2024. hal-04719792

HAL Id: hal-04719792

<https://hal.inrae.fr/hal-04719792v1>

Submitted on 3 Oct 2024

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

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

Mémoire
Présenté pour l'obtention du Master 2
Mention : Eau
Parcours : Eau et Agriculture

**Analyse de la dynamique de l'eau dans le sol et
élaboration d'indicateurs pour l'optimisation de
l'irrigation en Agriculture de Conservation des Sols**

Par Anthony LANOS

Mémoire présenté le : 04/09/2024

Membres du jury :

Gilles BELAUD

**Armand CRABIT
Flavie CERNESSON**

**Organisme d'accueil : INRAE
Montpellier**

**Enseignant tuteur : Armand
CRABIT**

Maître de stage : Claire WITTLING

Résumé & Abstract

Résumé

Face aux défis climatiques et environnementaux, les pratiques agricoles actuelles doivent évoluer. L'Agriculture de Conservation des Sols (ACS) apparaît comme une solution prometteuse en se basant sur trois principes : le non-travail du sol, la rotation de cultures et la couverture permanente du sol. L'étude réalisée dans ce mémoire porte sur l'analyse de la dynamique de l'eau dans le sol en ACS et l'élaboration d'indicateurs pour optimiser l'irrigation en climat méditerranéen. Nous avons utilisé une base de données exhaustive comprenant des mesures de tensiomètres et de sondes d'humidité à intervalles de 20 minutes sur trois campagnes culturales. Nos résultats montrent que la transition vers l'ACS impacte négativement les cultures à court terme que ce soit de manière hydrique ou végétative. Toutefois, si on effectue cette analyse chez des agriculteurs ayant effectué leur transition depuis plusieurs années, nous remarquons que ces effets négatifs se dissipent. Ces résultats démontrent le potentiel de l'ACS à long terme mais que des progrès sont encore à faire à court terme.

Mots clés

Sondes d'humidités, Sondes tensiométriques, Profil hydrique, Agriculture de Conservation des Sols, Gestion de l'Eau, Conditions méditerranéennes

Abstract

Facing climatic and environmental challenges, current agricultural practices need to be adapted. Soil Conservation Agriculture (SCA) appears to be a promising solution, based on three principles: no tillage, crop rotation and permanent soil cover. The present study deals with soil water dynamics analysis under SCA conditions and indicators development for optimizing irrigation in Mediterranean climates. We used an exhaustive database of tensiometer and moisture measurements recorded continuously over three growing seasons. Our results show that the transition to SCA has a short-term significant negative impact on crop growth, in terms of both water and vegetation. However, if we perform this analysis on farmers' field who have been making the transition for several years, we note that these effects dissipate. These results demonstrate the long-term potential of SCA, but there is still progress to be made in short-term.

Key words

Moisture probes, Tensiometric probes, Moisture profile, Soil Conservation Agriculture, , Water management, Climate change, Mediterranean conditions

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier le Directeur Monsieur Sylvain Labbé, Directeur du Centre INRAE de Montpellier, pour m'avoir reçu au sein de l'INRAE Montpellier et de me permettre de travailler dans les meilleures conditions possibles.

Dans un second temps, je tiens également à remercier Marcel Kuper, Directeur de l'UMR-GEAU de Montpellier de m'avoir permis de rejoindre cette unité dynamique et conviviale.

Ensuite je voudrais adresser toute ma gratitude à ma maitre de stage, Madame Claire WITTLING (INRAE-GEAU), pour sa confiance, sa disponibilité, et surtout l'autonomie qu'elle m'a offerte pendant ce stage.

Je tiens à remercier vivement Juan-David DOMINGUEZ BOHROQUEZ pour ses précieux conseils et son accompagnement tout au long de mon stage. Sa générosité à partager ses travaux de thèse a été d'une grande aide pour la réalisation de ce travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Cyril Dejean (INRAE-GEAU) et Jean-Marie Lopez (CIRAD-GEAU) pour leurs appuis techniques et scientifiques tout au long de mon stage. Leur expertise tant au niveau de la connaissance agronomique que de la métrologie a grandement contribué à la réussite de mon projet.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance à Marine MUFFAT-JEANDET et Gaël HERMET, techniciens de la plateforme où ont été réalisées les mesures de mon stage. Leur précieuse aide dans la compréhension des données ont grandement contribué à la réussite de ce travail. Je tiens également à les remercier pour m'avoir donné l'opportunité de participer aux sorties sur le terrain qui ont été très enrichissantes pour moi.

Table des matières

Résumé & Abstract	1
Remerciements.....	2
Avant-Propos.....	5
Glossaire.....	6
Sigles et acronymes.....	7
1. Introduction.....	8
2. Présentation des sites d'études.....	9
2.1. Le dispositif expérimental de Lavalette 2021-2022-2023	9
2.1.1. Caractéristiques climatiques et pédologiques	9
2.1.2. Le parcellaire expérimental (1,50 ha)	10
2.2. Les dispositifs en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA).....	11
2.3. L'instrumentation pour le suivi de l'eau dans le sol en été	11
2.4. L'instrumentation pour le suivi du développement végétatif des cultures.....	13
2.5. Cultures et Jeu de données	13
3. Etat des lieux et correction du jeu de données	14
3.1. Dépouillement du jeu de données	14
3.1.1. Plage d'humidité relevée par la sonde FDR.....	14
3.1.2. Réactivité des sondes aux irrigations	15
3.1.3. Valeurs aberrantes d'humidité et de tension en eau du sol.....	16
3.2. Calage des sondes FDR.....	16
4. Méthodologie pour la mise en place des indicateurs pour l'optimisation de l'irrigation entre les différentes modalités expérimentales	21
4.1. Etat de l'art	21
4.1.1. Estimation de l'ETR et de l'ETR cumulée	21
4.1.2. Détermination et utilisation du stock en eau du sol.....	22
4.1.3. Détermination de la date de début de stress hydrique	23
4.2. Les indicateurs utilisés.....	24
4.2.1. Estimation de l'ETR du couvert d'hiver 2021 à 2023.....	24
4.2.2. Détermination de la vitesse d'assèchement du sol sous la culture	26
4.2.3. Estimation de la consommation en eau de la culture de maïs de 2023	27
5. Résultats & Discussions	28
5.1. Effet du couvert d'hiver sur l'utilisation de l'eau en surface	28
5.2. Estimation de l'ETR du couvert d'hiver	29
5.2.1. Valeurs obtenues avec la sonde FDR.....	29
5.2.2. Valeurs obtenues avec la sonde neutronique	29

5.3. Vitesse d'assèchement du sol sous la culture commerciale ou d'été	30
5.3.1. Site de Lavalette	30
5.3.2. Agriculteurs PACA.....	35
6. Amélioration de la gestion de l'irrigation et du suivi métrologique	39
7. Conclusion.....	41
8. Références bibliographiques.....	42
Annexe A : Cultures & Données présentes sur le site de Lavalette	43
Annexe B : Calibration de la sonde neutronique.....	44
Annexe C : Historique des différentes bandes d'ACS_15 pour maïs 2023	45

Avant-Propos

J'ai réalisé mon stage d'une durée de 6 mois, du 19 février 2024 au 16 août 2024, au sein de l'Unité Mixte de Recherche (UMR) pour la Gestion de l'Eau, des Acteurs et des Usages (G-Eau) basée à l'Institut National de la Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement (INRAE) située sur le site de Lavalette à Montpellier.

L'UMR G-Eau est une unité de recherche composée de 90 chercheurs et ingénieurs permanents. L'UMR accueille une cinquantaine de doctorants et post doctorants. Les travaux de recherche portent sur la gestion intégrée et adaptative de l'eau, comprenant l'analyse des hydrosystèmes, la gouvernance et le développement d'outils pour les politiques publiques. La formation d'étudiants fait partie du mandat de l'UMR.

L'INRAE est un institut de recherche de premier plan qui se concentre sur l'agriculture, l'alimentation et l'environnement. Grâce à la recherche, l'innovation et l'appui aux politiques publiques, il contribue à proposer de nouvelles orientations favorisant le développement de systèmes agricoles et alimentaires durables.

Le stage est encadré par Madame Claire WITTLING, ingénieure de recherche de l'INRAE et de l'UMR G-EAU, et Monsieur Juan-David DOMINGUEZ-BOHORQUEZ, doctorant CIFRE réalisant sa thèse avec l'INRAE et la Société du Canal de Provence (SCP).

Glossaire

Principe de Sonde FDR : Une sonde utilisant le principe de Frequency Domain Reflectometry (FDR) permet de déterminer l'humidité du sol. Pour cela, elle va mesurer la permittivité diélectrique du sol.

La sonde est constituée de deux tiges en acier inoxydable de 30 cm, connectées à une « tête » contenant un circuit imprimé (*CS650 - Sonde réflectométrique de teneur en eau du sol (30 cm)*, 2015).

Pour effectuer une mesure, la sonde émet des signaux électromagnétiques à une certaine fréquence le long des tiges. Les signaux vont se propager à travers le sol et vont être réfléchis par les molécules d'eau par conséquent la fréquence initiale va être modifiée.

A partir de ce changement de fréquence et d'une équation de calibration, l'appareil va déterminer l'humidité volumique.

Principe de Sonde Neutronique : Une sonde neutronique est une sonde de mesure d'humidité du sol à différentes profondeurs.

La sonde est composée d'une source radioactive de neutrons rapide et d'un détecteur de neutrons lents (*Sonde à neutrons (HU) - Wikhydro, 2023*).

Pour effectuer une mesure, la sonde est insérée dans un tube à différentes profondeurs. La source émet des neutrons rapides qui vont se propager dans le sol. En entrant en contact avec les noyaux d'hydrogènes contenus dans les molécules d'eau les neutrons vont être freinés. Le nombre de neutrons lents vont ensuite être quantifiés par le détecteur et ainsi l'humidité neutronique va pouvoir être déterminés.

Principe de Sonde capacitive Sentek : Une sonde capacitive mesure la même variable que la sonde FDR, c'est-à-dire la permittivité diélectrique du sol. Mais son protocole n'est pas le même (*Agralis, 2023*).

La sonde capacitive fait passer un courant électrique d'une certaine tension entre deux plaques d'un condensateur à une certaine profondeur de sol. L'eau étant un matériau conducteur, plus il y a de l'eau dans le sol, plus le courant électrique de sortie stocké dans le condensateur sera le même que celui envoyé en entrée.

Sigles et acronymes

- Agriculture de conservation des sols : (ACS)
- Agriculteur en ACS depuis 10 ans : (ACS_10)
- Agriculteur en ACS depuis 15 ans : (ACS_15)
- Agriculteur en conventionnel : (LAB)
- Argile : (Ar)
- Capacité au Champ : (CC)
- Densité Apparente : (Da)
- Drainage : (D)
- Evapotranspiration Maximale : (ETM)
- Evapotranspiration Potentielle : (ETP)
- Evapotranspiration Réelle : (ETR)
- Frequency Domain Reflectometry : (FDR)
- Indicateur de sécheresse : (IS)
- Infiltration : (Inf)
- Irrigation : (Irr)
- Irrigation en Goutte-à-goutte enterré : (GGE)
- Irrigation par aspersion : (ASP)
- Labour conventionnel : (LAB)
- Limon : (Li)
- Pluviométrie : (R)
- Point de flétrissement permanent : (PFP)
- Provence-Alpes-Côte d'Azur : (PACA)
- Ruissèlement : (R)
- Sable : (Sa)
- Système pluvial : (PLU)

1. Introduction

Les pratiques agricoles intensives depuis le début de la mécanisation ont profondément dégradé les systèmes de production. Réduction de la biodiversité, érosion et appauvrissement des sols ne sont que quelques-unes des conséquences néfastes observées. Par ailleurs, le changement climatique impose de repenser ces pratiques. Les sécheresses deviennent plus intenses et précoces, les événements pluvieux extrêmes se multiplient, et les notions de saisons et de normales saisonnières sont perturbées. Le milieu méditerranéen est tout particulièrement exposé à ces événements extrêmes avec les épisodes de canicule en saison estivale et les épisodes cévenoles de pluie torrentielle en saison automnale.

Face à ces défis, l'agriculture doit évoluer vers des pratiques qui favorisent une meilleure gestion de l'eau et une préservation accrue des écosystèmes. L'agriculture de conservation des sols (ACS) se présente comme une solution prometteuse, reposant sur trois principes : le non-travail du sol, une couverture permanente du sol, et une rotation diversifiée des cultures (Jayaraman *et al.*, 2021). Cependant, l'abandon des pratiques conventionnelles soulève des questions sur les répercussions possibles en termes de rendement, d'utilisation de l'eau par les plantes, et de leur développement à court et moyen terme.

La thèse de Monsieur Juan-David Dominguez-Bohorquez tente de répondre à certaines de ces questions. Mon stage se focalisera sur l'aspect hydrique, avec pour objectif de répondre à la question suivante : quels sont les effets de l'ACS dans sa phase initiale (dite de transition) sur la dynamique de l'eau dans des parcelles irriguées en climat méditerranéen ?

Pour ce faire, je présenterai d'abord le matériel et les sites d'étude, puis un état des lieux et une correction des données, avant d'établir des indicateurs pertinents pour quantifier les effets susmentionnés. Je conclurai par une analyse des résultats obtenus et proposerai des améliorations potentielles pour la gestion de la plateforme expérimentale de Lavalette (INRAE-Montpellier) dont est issue une grande partie des données analysées.

2. Présentation des sites d'études

2.1. Le dispositif expérimental de Lavalette 2021-2022-2023

2.1.1. Caractéristiques climatiques et pédologiques

La plateforme de Lavalette est localisée dans le lit majeur du fleuve du Lez. Le sol possède une texture évoluant de limono-sableuse à limono-argilo-sableuse suivant l'axe nord-sud nous éloignant du Lez. Les caractéristiques texturales et hydrodynamiques sont présentées dans le tableau 1 et sont extraites de la thèse de Monsieur Rami ALBASHA (ALBASHA, 2015).

Profondeur [mm]	Texture ⁽¹⁾						$D_a^{(2)}$ [gr cm ⁻³]	Propriétés hydrodynamiques ⁽³⁾		
	Argile (%)		Limon (%)		Sable (%)			θ_r	θ_s	k_s
	Nord	Sud	Nord	Sud	Nord	Sud		[-]	[-]	[cm j ⁻¹]
0 - 30	18	22	42	49	40	29	1.6			
30 - 60	18	24	44	49	38	27	1.6	0.02	0.36	40.5
60 - 90	20		47		33		1.5	0.05	0.38	12.0
90 - 120	20		55		25		1.4			
120 - 150	27	24	48	44	25	32	1.3	0.095	0.41	6.2

(1) Selon Ruelle (1995).
 (2) Document interne non publié.
 (3) Selon Mubarak (2009).

Tableau 1 : Texture et propriétés hydrodynamiques du sol de Lavalette ,(ALBASHA, 2015)

Les conditions climatiques du site sont de type méditerranéen : hiver doux et été très chaud, précipitation annuelle aux alentours de 600 mm (630 mm sur la période 1991-2020), très forte irrégularité des pluies et épisodes de Cévenoles en automne, voire hiver ou printemps avec le changement climatique. Tout au long des 3 saisons culturales, les conditions climatiques de développement des cultures ont été évaluées sur la base des températures et humidités de l'air (moyennes journalières), du rayonnement global (cumuls journaliers) et de la vitesse du vent (moyennes journalières) relevés par la station météo présente sur la plateforme. Les données climatiques ont ainsi été utilisées pour calculer un indicateur de sécheresse (IS), défini comme le rapport entre l'évapotranspiration de référence (ET_o) et la pluie (P) cumulées sur la période étudiée. Ensuite, une classification des années climatiques a été réalisée en se basant sur les valeurs de IS puis de définir l'année comme humide, normale ou sèche en comparant la valeur de l'indicateur à celles issues d'une analyse fréquentielle de IS effectuée sur 34 années (série 1990-2023). Ainsi, la campagne 2021 a été classée comme « humide », et les campagnes 2022

et 2023 ont été classées comme « normales » (Dominguez-Bohorquez *et al.*, 2024).

2.1.2. Le parcellaire expérimental (1,50 ha)

Le dispositif expérimental de Lavalette est un dispositif qui a fait sa transition du labour conventionnel vers l'ACS tout récemment. Par conséquent, cela permettrait de voir des effets à court terme de cette transition.

Un dispositif expérimental d'une surface de 1,50 ha a été mis en place sur le site de Lavalette (Figure 1).

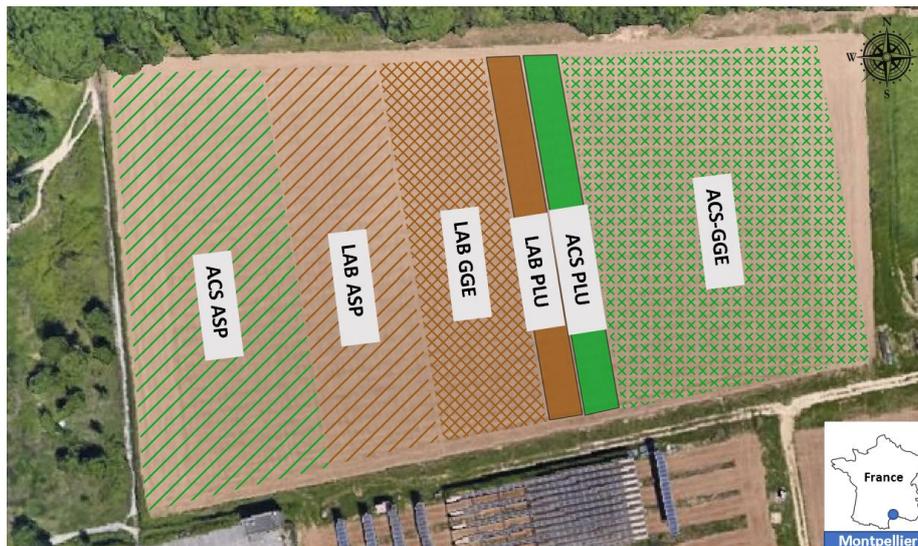


Figure 1 : Dispositif expérimental de Lavalette-Montpellier (sources : Juan-David Dominguez)

Le dispositif est composé de deux modalités d'irrigation l'aspersion (ASP), le goutte-à-goutte enterré (GGE) et d'une modalité non irriguée, le pluvial (PLU) représentant le témoin du dispositif. Chacune de ces modalités est divisée en 2 sous modalités de travail du sol avec une zone en non labour, avec rotation des cultures et couverture permanente du sol représentant l'ACS et une zone conduite selon des pratiques conventionnelles c'est-à-dire labourée (LAB), sans rotation culturale et avec un sol pouvant être laissé à nu une partie de l'année s'il n'y a pas de cultures commerciales de prévu.

La durée de la thèse s'étend sur 3 ans, avec une instrumentation spécifique adaptée aux saisons estivales et hivernales. Au printemps, des grandes cultures sont semées (maïs en 2021, sorgho en 2022 et soja en 2023) et en hiver les sols des parcelles conduites en labour conventionnel restent à nu contrairement à celles en ACS qui ont un couvert d'hiver féverole, un mélange de moutarde, de vesce et de phacélie, un mélange de féverole et d'avoine pour 2021, 2022 et 2023 respectivement.

Sur le site de Lavalette, la transition du LAB vers l'ACS s'est opérée récemment soit en 2018 suite à la pose du GGE. Par conséquent, les effets de l'ACS sur la dynamique de l'eau dans le sol seront des effets de court terme (peu marqués) contrairement à ceux des 2 sites d'étude situés en région PACA présentés ci-après.

2.2. Les dispositifs en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA)

Afin d'observer des effets à moyen-long terme après l'adoption de l'ACS en conditions méditerranéennes, des parcelles d'agriculteurs de région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) ont été instrumentées. Il y a au total trois agriculteurs. L'un d'entre eux pratique l'ACS depuis 15 ans, un autre depuis 10 ans et le dernier est en labour conventionnel et il représente le témoin.

Ils ont été respectivement nommés ACS_15, ACS_10 et LAB. L'analyse des données de l'eau dans le sol a été effectuée pour les campagnes culturales de 2022 (blé d'hiver) et 2023 (maïs).

Le tableau 1 indique les pourcentages d'argiles (Ar), de limon (Li) et de sable (Sa) ainsi que les valeurs moyennes de densité apparente (Da) de l'horizon (0-120 cm) des sols des parcelles étudiées.

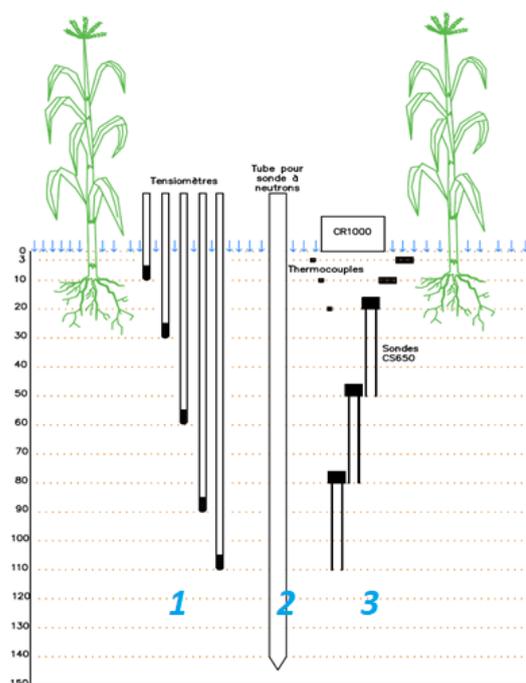
Tableau 1 : Caractéristiques des sols des agriculteurs de région PACA

PARCELLE	AR (%)	LI (%)	SA (%)	DA (-)
ACS_15_BLE	21	65	14	1,40
ACS_15_MAÏS	27	61	12	1,40
ACS_10	31	56	13	1,25
LAB	24	62	15	1,40

2.3. L'instrumentation pour le suivi de l'eau dans le sol en été

Pour réaliser le suivi hydrique des traitements, différentes sondes ont été installées à différentes profondeurs dans le sol, comme illustré sur la figure n°2 :

Labour en aspersion



ACS en aspersion

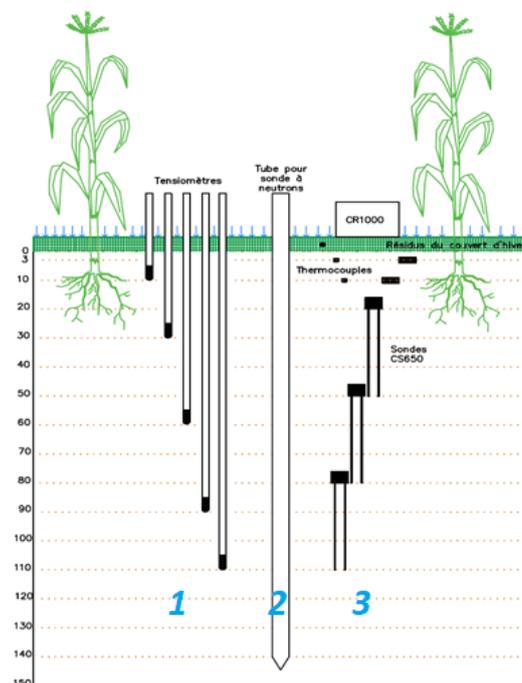


Figure 2 : Exemple d'installation des dispositifs de mesure pour le suivi du statut hydrique du sol dans les parcelles de maïs, Juan-David Dominguez

Trois types de sondes sont présentes durant la phase estivale :

1. Les tensiomètres Watermark (1), installés à des profondeurs de 10, 30, 60, 90 et 110 cm. Ils mesurent la tension de l'eau dans le sol et les données sont stockées automatiquement toutes les 20 minutes dans une centrale d'acquisition (CR1000 sur le schéma).
2. L'humidimètre neutronique CPN 503 DR (2) est utilisée pour effectuer des relevés ponctuels d'humidité volumique du sol tout au long de la campagne (une fois par semaine si possible). La sonde est insérée dans un tube en aluminium enfoncé dans le sol et les relevés sont effectués tous les 10 cm jusqu'à une profondeur maximale qui peut aller à 2 m.
3. Les sondes de type Frequency Domain Reflectometry (FDR) CS 650 Campbell Scientific (3) effectuent des relevés d'humidités volumiques du sol et, comme pour les données tensiométriques, les données sont stockées automatiquement toutes les 20 minutes dans une centrale d'acquisition.
4. Les sondes de la marque Sentek effectuent des relevés d'humidités volumiques automatiquement toutes les 20 minutes à la profondeur 5, 15, 25, 35, 55 et 75 cm. Ces sondes sont installées uniquement chez les agriculteurs.

Remarques :

- Durant l'hiver, seules des sondes FDR ont été installées à 0-30 cm et à 30-60 cm dans les parcelles ACS PLUV et LAB PLUV pour le suivi de l'humidité du sol et *in fine* de la consommation du blé.
- L'humidimètre neutronique n'a pas pu être utilisée entre juillet 2021 et août 2022 à cause d'une défaillance de l'électronique sur le comptage.
- L'instrumentation a été identique sur les 3 parcelles d'agriculteur.

2.4. L'instrumentation pour le suivi du développement végétatif des cultures

Suivre le développement foliaire des différentes cultures est crucial pour comprendre l'évolution de l'humidité du sol. En effet, c'est au niveau des feuilles, et en particulier des stomates, qu'a lieu la transpiration de la plante qui pour compenser la perte d'eau devra aller la puiser dans le sol avec son système racinaire. Pour des mêmes conditions d'humidité de sol et de climat (ETP), l'extraction de l'eau par la culture sera d'autant plus importante que sa surface foliaire sera élevée. Pour caractériser le développement foliaire, l'indice foliaire (IF), qui représente la surface de feuilles par m² de sol, a été mesuré au cours des différentes campagnes. L'IF peut expliquer jusqu'à 85 % de la variabilité de la consommation hydrique de la culture (ETR), l'ETR mensuel (Sun *et al.*, 2011). Les mesures ont été réalisées à l'aide de l'appareil Licor 2200.

2.5. Cultures et Jeu de données

Au cours de la thèse, différentes cultures commerciales ont été pratiquées afin de respecter le principe de la rotation culturale. De plus, il y a eu une variation du couvert d'hiver cultivé d'une année à l'autre. Étant donné que le dispositif expérimental varie selon que nous sommes en été ou en hiver, il est crucial de noter les périodes correspondant à la culture d'hiver et celles correspondant à la culture d'été. Elles sont reportées en annexe A.

3. Etat des lieux et correction du jeu de données

Le jeu de données collectées sur les 3 années est assez volumineux soit 6 séries temporelles d'humidité et 6 de tensiométrie pour chaque été, ainsi que de 2 séries temporelles d'humidité pour chaque hiver sur le site de Lavalette. Au total, cela représente un jeu de données de 42 séries temporelles sur les 3 années. Aussi, il est essentiel de procéder à une évaluation globale de la qualité des données afin de vérifier leur fiabilité et, si nécessaire, d'effectuer des ajustements appropriés.

3.1. Dépouillement du jeu de données

3.1.1. Plage d'humidité relevée par la sonde FDR

La 1^{ère} étape dans le dépouillement du jeu de données est de voir si la plage de valeur annoncée est logique.

Un défaut majeur observé sur les sondes FDR avec la calibration du constructeur, est leur tendance à surestimer le taux d'humidité du sol. Pour le sol de Lavalette, l'humidité volumique au point de flétrissement permanent (PFP) a été estimée à $0,12 \text{ cm}^3$ d'eau par cm^3 de sol et celle à la capacité au champ (CC) à $0,31 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Les valeurs des humidités au PFP et à la CC ont été déterminées sous chambre à pression. Par conséquent, la grande majorité des valeurs d'humidités volumiques devrait se situer entre le PFP et la CC. Cependant, ce n'est pas le cas pour de nombreuses séries temporelles, comme illustré par la figure n°3.

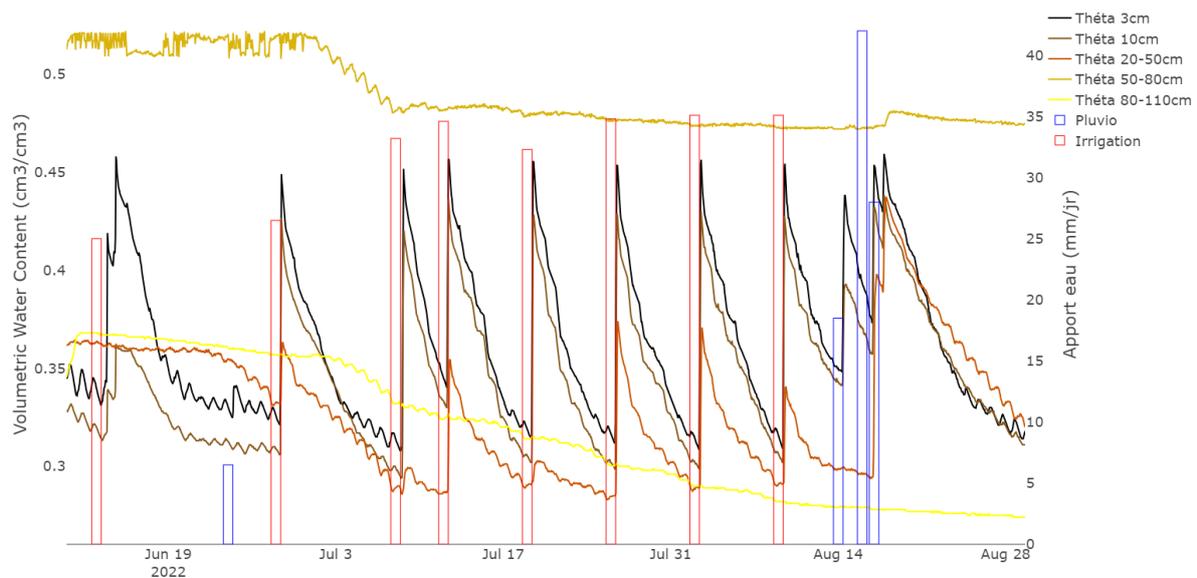


Figure 3 : Chronique d'humidité pour le système Labour Aspersion 2022, Anthony Lanos

La figure représente l'évolution de l'humidité durant l'été 2022 sur le traitement LAB-ASP pour les différentes profondeurs de sonde. Etant donné que l'été 2022 a été relativement chaud et sec (voir § 2.1.1), nous devrions avoir des humidités proches du PFP avec des pics d'humectation au moment des irrigations. Cependant, on peut observer que les humidités de surface à 3 et 10 cm se sont maintenues entre 0,30 et 0,45 cm³/cm³ tout au long de la campagne expérimentale de 2022 donc bien supérieures à l'humidité à la CC Par conséquent, une correction s'avère nécessaire. Celle-ci est réalisée en comparant les valeurs d'humidité relevées par les sondes FDR à celles déterminées avec la sonde à neutron qui a fait l'objet d'une calibration de très bonne qualité pour le sol de Lavalette (annexe B) et, conséquemment, d'obtenir des mesures d'une bonne justesse.

3.1.2. Réactivité des sondes aux irrigations

La 2nde étape du dépouillement du jeu de données est de confirmer si la sonde réagit bien aux évènements d'humectation du sol grâce aux irrigations et aux pluies, et de vérifier que la variation soit proportionnelle à la quantité d'eau apportée.

Là encore des incohérences apparaissent, que ce soit au niveau des sondes CS 650 ou des tensiomètres. Par exemple, certaines sondes dont celles situées en surface (03 et 10 cm) ne réagissaient pas lors des phases d'humectation induites par les irrigations. La figure n°4 illustre ce phénomène.

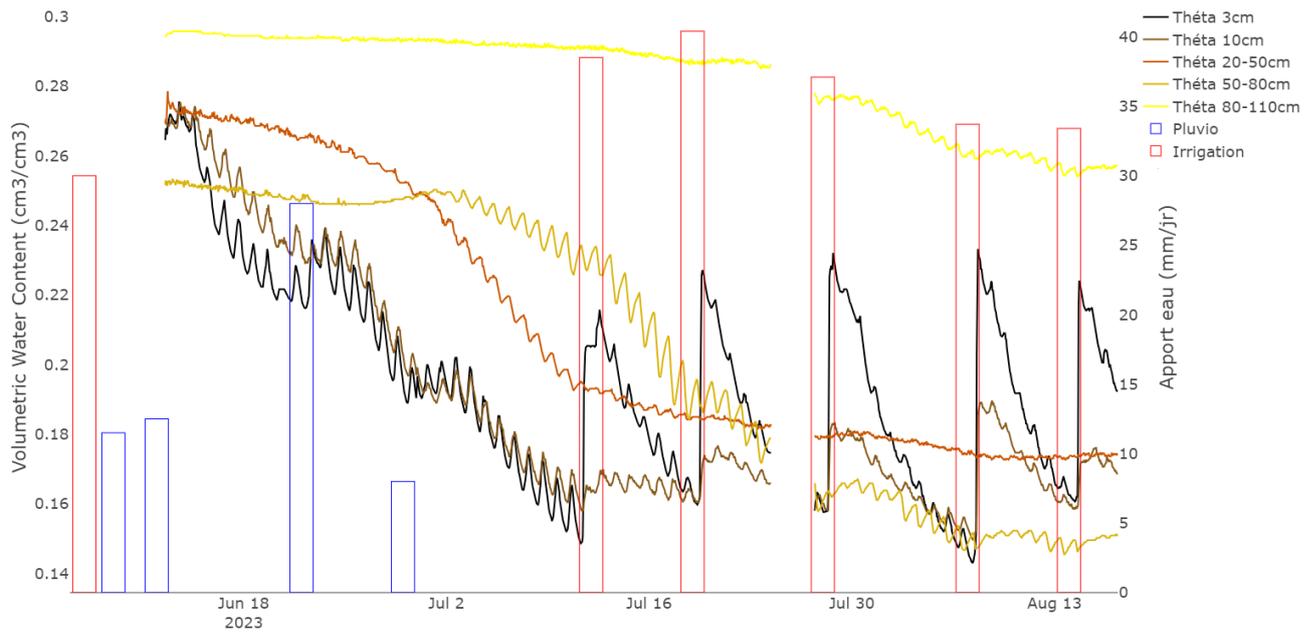


Figure 4 : Chronique d'humidité pour le système Labour Aspersion 2023, Anthony Lanos

Les apports d'irrigation par aspersion, représentés en rouge sur le graphique, correspondaient à des quantités d'eau de 30 à 40 mm à chaque fois. Par conséquent, nous nous attendions à observer une augmentation significative de l'humidité, en particulier pour les sondes de surface situées à 3 et 10 cm de profondeur, qui auraient dû atteindre la capacité au champ ($0,31 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). Cependant, cela n'a pas été le cas, comme le montre une légère augmentation de l'humidité à 3 cm, atteignant $0,22 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, et une quasi-absence de réaction de la sonde à 10 cm pendant toute la campagne.

Ces observations nous ont conduit à travailler sur des périodes présentant des données jugées fiables pour développer nos analyses et déterminer nos indicateurs.

3.1.3. Valeurs aberrantes d'humidité et de tension en eau du sol

Enfin, nous avons également observé que certaines sondes d'humidité et tensiométriques présentaient des anomalies de fonctionnement. Pendant certains laps de temps, les sondes affichaient des valeurs d'humidité négatives ou des valeurs excessivement élevées. Par conséquent, ces valeurs aberrantes ont été retirées du jeu de données.

3.2. Calage des sondes FDR

Les sondes FDR d'humidité volumique présentent un avantage indéniable avec leur capacité à effectuer des mesures en continu à intervalles courts, soit toutes les 20 minutes. Cependant, les Campbell CS

650 utilisées ici ne sont pas parfaitement adaptées aux conditions pédologiques des parcelles étudiées. En effet, le fabricant (Campbell Scientific) garantit la qualité des données relevées par ces sondes dans un sol sableux, ayant une densité inférieure à $1,5 \text{ g/cm}^3$ et une porosité inférieure à 0,6 (Campbell Scientific, 2021). Il recommande donc d'effectuer une opération de calibration des sondes pour les sols à texture fine (limon-argile). Or, le sol de la parcelle est plutôt limoneux-argileux à texture fine, et des mesures de densité apparente ont révélé que par endroits, celle-ci atteint $1,7 \text{ g/cm}^3$.

La calibration des sondes CS650 a donc été réalisée à posteriori en établissant une relation entre les valeurs d'humidité relevées par les CS650 et celles relevées par la sonde à neutron aux mêmes profondeurs de sol et aux mêmes moments (dates et heures). Il convient de noter que la sonde neutron a été endommagée au début de la campagne 2021 et n'a été opérationnelle qu'à la fin du mois d'août 2022, entraînant ainsi un manque significatif de données.

Malgré cet incident, un ensemble de données conséquent est disponible. Pour établir la correction nous commençons par représenter les valeurs affichées par la sonde neutron en fonction de celles affichées par la sonde FDR, afin d'observer toute relation potentielle. La relation établie est de type linéaire avec un coefficient de régression élevé indiquant une régression de bonne qualité (Figure n°5).

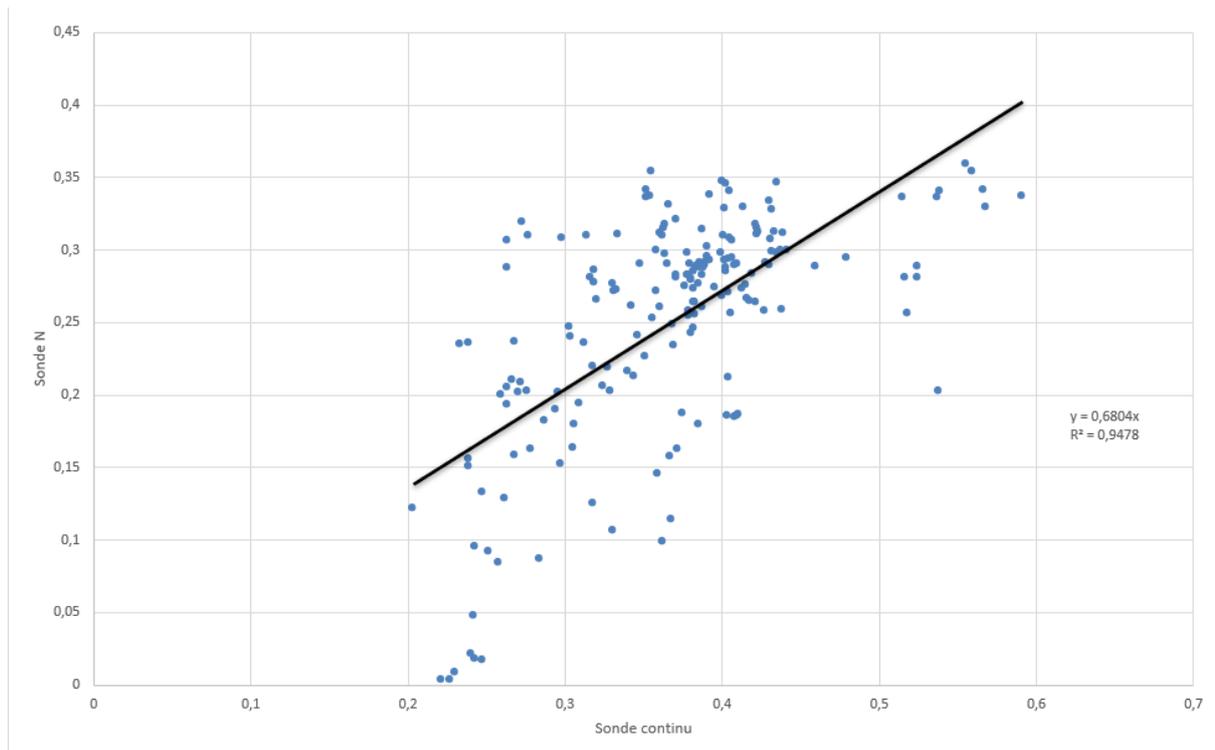


Figure 5 : Valeurs d'humidité volumique (cm^3/cm^3) relevées par la sonde Neutron en fonction de celles relevées par la FDR

Après l'observation du nuage de points, deux approches sont envisageables :

1. Établir une relation linéaire : Cette méthode présente l'avantage de ne pas altérer les chroniques d'humidité établies car elle applique une correction uniforme sur l'ensemble des données. En optant pour une relation linéaire, nous pourrions explorer des aspects tels que la vitesse d'humectation sans pour autant perturber l'évolution des chroniques.
2. Établir une relation non-linéaire : Cette approche pourrait offrir une meilleure précision en termes de valeurs absolues d'humidité, compte tenu de la dispersion du nuage de points. Cependant, elle impliquerait une perte d'information au niveau des chroniques d'humidité.

L'approche linéaire a été privilégiée par M. Dominguez et ses encadrants. Cette décision a été prise en raison du coefficient de détermination (R^2) très élevé, atteignant 0,95, ce qui indique une bonne adéquation entre le modèle linéaire et les données observées.

Cependant, l'analyse statistique des résidus souligne une erreur relative importante du modèle pour des valeurs d'humidité volumiques élevées. Les

résultats de l'analyse statistiques des résidus du modèle linéaire sont présentés et expliqués ci-après.

Tableau 2 : Statistiques de la régression linéaire simple

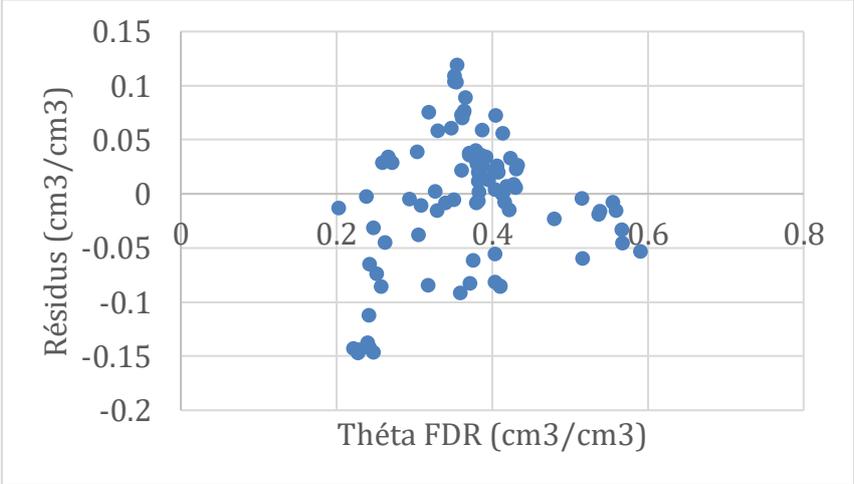


Figure 6 : Distribution des résidus du modèle de type régression linéaire

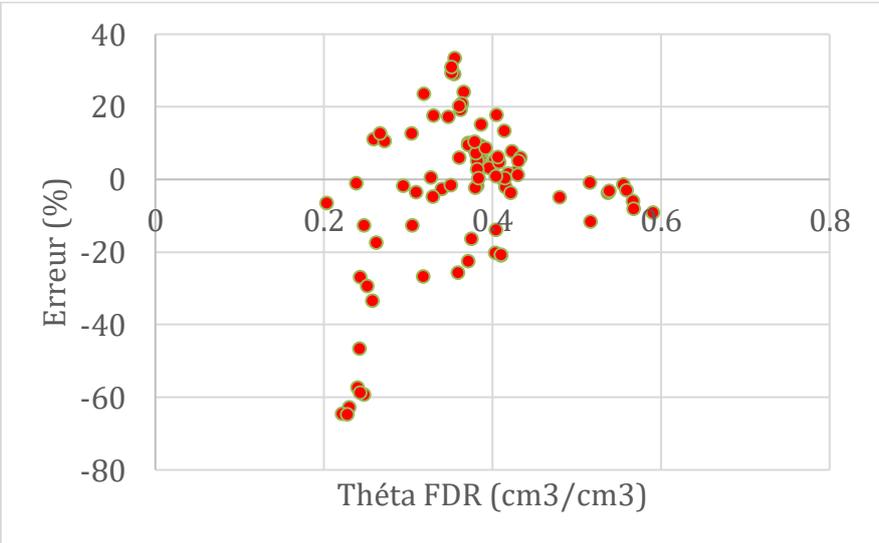


Figure 7 : Pourcentage d'erreur du modèle de type régression linéaire

Tout d'abord, l'analyse confirme un coefficient R^2 d'environ 0,94 (Tableau 2). La figure n°6 représente les résidus du modèle de type régression

linéaire en fonction des valeurs de la sonde FDR, tandis que la figure n°7 représente le pourcentage d'erreur déterminé à partir des résidus du modèle de régression de type linéaire. Pour calculer le pourcentage d'erreur, la relation suivante est utilisée :

$$\text{Erreur relative (\%)} = \frac{\text{Résidus} - \text{Valeurs FDR}}{\text{Valeurs FDR}} * 100 \quad (1)$$

Les résidus sont définis comme la différence entre les valeurs mesurées par la sonde FDR et celles mesurées par la sonde neutron dont les valeurs sont considérées comme valeurs de référence.

Trois plages distinctes sont isolées dans le graphique : une première entre 0,2 et 0,30 cm³/cm³, une autre entre 0,30 et 0,45 cm³/cm³, et une dernière pour les valeurs comprises entre 0,45 et 0,60 cm³/cm³.

Pour les valeurs entre 0,45 et 0,60 cm³/cm³, le pourcentage d'erreur se situe entre 0 et 10 %, ce qui est jugé acceptable. Cependant, pour les valeurs entre 0,30 et 0,45 cm³/cm³, le pourcentage d'erreur varie entre +30 et -25 %, représentant une erreur totale de 55 %. Dans la plage de 0,20 à 0,30 cm³/cm³, la droite de régression a tendance à surestimer les valeurs, avec un pourcentage d'erreur compris entre 0 et -60 %.

D'un point de vue statistique, la droite de régression établie présente donc des limites. En outre, le domaine de validité s'applique aux humidités FDR supérieures à 0,20 cm³/cm³ car aucune donnée d'humidité inférieure à cette valeur a été relevée par la sonde en fin de campagne 2022 et tout au long de celle de 2023. Malgré cela, il a été décidé de l'appliquer à l'ensemble des données afin de se situer dans une gamme d'humidité plus réaliste.

4. Méthodologie pour la mise en place des indicateurs pour l'optimisation de l'irrigation entre les différentes modalités expérimentales

4.1. Etat de l'art

4.1.1. Estimation de l'ETR et de l'ETR cumulée

La détermination de l'évapotranspiration réelle (ETR) est essentielle pour évaluer les conditions d'alimentation hydrique d'une culture. Cette consommation d'eau, souvent exprimée en mm/jour, varie principalement en fonction de la plante, du stade de développement végétatif, de l'état sanitaire de la culture et des conditions azotées et d'humidité du sol. Si les valeurs d'évapotranspiration maximale (ETM) correspondantes aux besoins en eau de la culture en situation optimale de développement sont bien documentées et référencées, à contrario, celles de l'ETR le sont beaucoup moins. Elles représentent les pertes réelles en eau par évaporation du sol et par transpiration de la culture dans des conditions agroenvironnementales, non systématiquement optimales, d'un lieu et d'une année, ce qui donne un intérêt majeur à sa détermination.

Une méthode pour déterminer l'ETR repose sur l'équation du bilan hydrique, présentée ci-dessous (Fares and Alva, 2000) :

$$P + Irr = R + Inf + ETR + D + \Delta S \quad (2)$$

On peut alors isoler l'ETR :

$$ETR = (P + Irr) - (R + Inf + D) + \Delta S \quad (3)$$

Tous les termes de cette équation peuvent être déterminés dans notre étude :

- Précipitations (P) : La quantité d'eau de pluie est mesurée par une station météorologique située sur le site de Lavalette.
- Irrigation (Irr) : Les apports d'eau par irrigation sont connus grâce à un calendrier mis à jour régulièrement et grâce aux relevés effectués sur compteur d'eau ou sur pluviomètres installées sur les parcelles.
- Ruissellement (R) et Infiltration (Inf) : La répartition entre ruissellement et infiltration peut être déterminée à l'aide d'un coefficient d'infiltration global.
- Drainage (D) : L'estimation du drainage peut être faite à l'aide de l'équation suivante (Fares and Alva, 2000):

$$D = k(\theta) * \frac{\Delta(h + z)}{\Delta z} * \Delta t \quad (4)$$

Avec $k(\theta)$ la conductivité hydraulique ($m.j^{-1}$) à l'humidité θ (cm^3/cm^3), Δt correspond à l'intervalle de temps prise pour calculer le drainage, Δh correspond au potentiel de succion qui peut être défini par la force développée par le sol pour aspirer l'eau sur une profondeur Δz .

Les pertes d'eau par ruissèlement et par drainage sont fortement influencées par les conditions pédoclimatiques. Etant donné que notre dispositif expérimental est limono-argileux à texture fine avec une pente nulle, il semble que ces deux paramètres devraient être négligeables.

4.1.2. Détermination et utilisation du stock en eau du sol

La Réserve Utile en eau du sol (RU) correspond à la quantité d'eau maximale disponible (entre l'humidité à la capacité au champ et celle au point de flétrissement permanent) pour la végétation. Il est possible de la déterminer grâce à l'équation suivante :

$$RU = e * da * (\theta_{CC} - \theta_{PFP}) * \frac{100 - C}{100} \quad (\text{en mm}) \quad (5)$$

Avec da la densité apparente du sol, θ_{CC} l'humidité volumique du sol à la capacité aux champ, θ_{PFP} l'humidité volumique au point de flétrissement de permanent et C le pourcentage d'élément grossier dans le sol.

L'avantage de cette approche est son aspect quantitatif, représenté en hauteur d'eau (en mm) plutôt qu'en pourcentage (volume d'eau par volume de sol). Cette mesure peut s'avérer pertinente pour notre étude, étant donné les différentes pratiques d'irrigation et d'opérations culturales appliquées. La première représentation à considérer est l'allure globale, comme illustré dans la figure n°8.

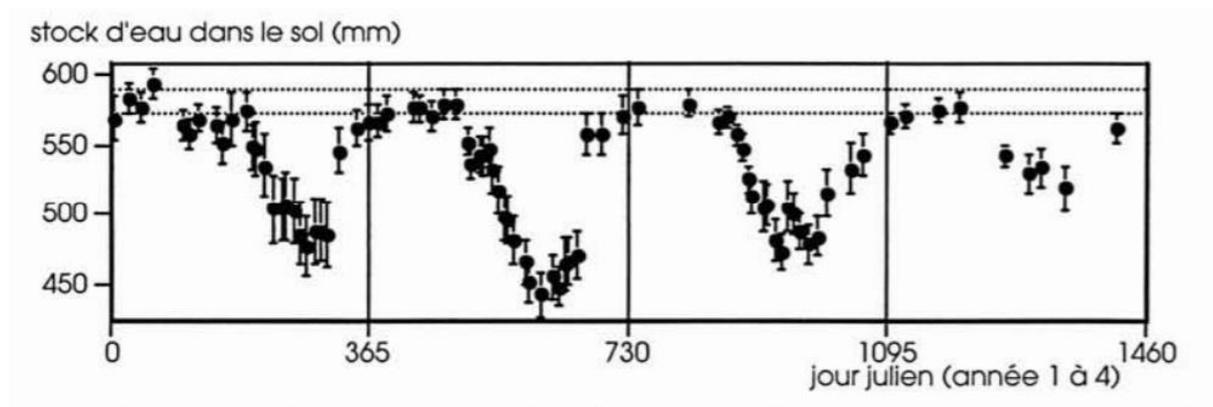


Figure 8 : Exemple de représentation de la variation du stock d'eau du sol, (Bréda, Lefèvre and Badeau, 2002)

Il pourrait être pertinent de suivre les évolutions du stock en pour chaque pratique d'irrigation appliquée en ACS et en labour afin de pouvoir les comparer.

4.1.3. Détermination de la date de début de stress hydrique

Une méthode permettant d'estimer le début du stress hydrique est basée sur le suivi du stock d'eau dans le sol. En traçant l'évolution du stock en eau (Soil Water Content, SWC), sur la figure n°9, on peut observer qu'après une irrigation estivale par exemple, il se produit une première phase de consommation d'eau significative, suivie d'une diminution de celle-ci. En traçant les tangentes de ces deux phases de consommation, l'intersection entre les deux droites représente le "Breaking Point", qui correspond au début de contrainte hydrique pour la plante (Figure 9).

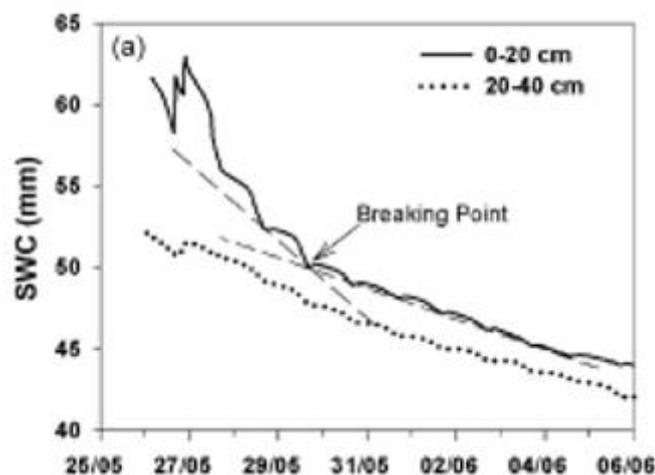


Figure 9 : Détermination du Breaking Point, (Thompson et al., 2007)

Après avoir décrit quelques indicateurs de la littérature, il est nécessaire à présent de sélectionner des indicateurs pertinents pour caractériser les consommations en eau d'une culture au cours de son cycle cultural compte tenu du type de données disponibles, et applicables à l'ensemble du jeu de données pendant la durée de mon stage. Les indicateurs choisis sont expliqués ci-après.

4.2. Les indicateurs utilisés

4.2.1. Estimation de l'ETR du couvert d'hiver 2021 à 2023

4.2.1.1. Estimation d'un coefficient d'infiltration

Afin de se rapprocher le plus possible de l'ETR du couvert végétal, il est nécessaire de déterminer la quantité de pluie effectivement infiltrée plutôt que celle tombée (P_{totale}). Pour ce faire, nous allons sélectionner tous les événements pluvieux durant la période hivernale, dont les précipitations sont supérieures à 5 mm (moins de 5 mm la pluie n'est pas considérée comme efficace sur la variation de stock). Ensuite, nous calculerons la variation du stock d'eau dans le sol avant et après chaque épisode pluvieux (ΔS_{pluie}), puis nous diviserons cette variation par la quantité de pluie tombée P en mm.

Nous utiliserons la relation (9) et la relation ci-dessous :

$$Ci = \frac{\Delta S_{\text{pluie}}}{P} \quad (10)$$

Cela nous permettra également de voir s'il y a une différence d'infiltration entre sol nu et un sol avec une couverture végétale.

4.2.1.2. Estimation de l'ETR du couvert d'hiver avec les sondes FDR

Pour estimer l'ETR du couvert d'hiver, un code R utilisant le package « shiny » a été développé.

Calcul de la pente

Instructions

Entrez les jours juliens de début et de fin dans les cases ci-dessous.

Jour Julien de début :

Jour Julien de fin :

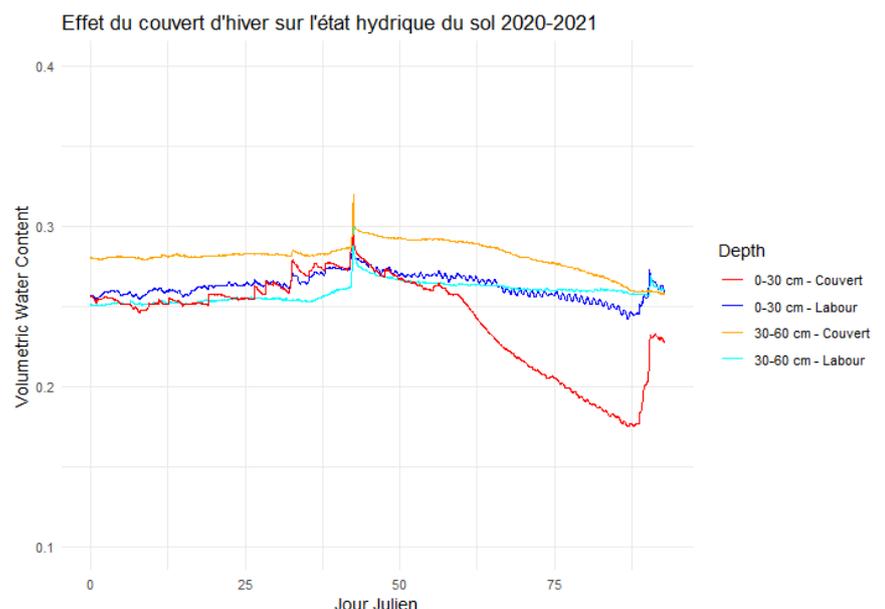


Figure 10 : Exemple de calcul de pente d'humidité sous R, Anthony Lanos

Afin de suivre l'évolution de l'humidité du couvert d'hiver en ACS et du sol nu en LAB, nous utilisons les jours juliens comme référence temporelle. Cette méthode est nécessaire car le logiciel R ne permet pas de faire des calculs avec des dates classiques.

Le code développé permet d'estimer une pente moyenne entre deux jours juliens spécifiés par l'utilisateur. Cette pente moyenne représente le taux de variation de l'humidité du sol entre ces deux points du graphique (Figure 10). Pour ma part, j'ai choisi des dates où la variation d'humidité était évidente comme indiqué, par exemple, par la courbe rouge sur la figure n°10 à partir du jour julien 50.

La pente de décroissance de l'humidité du sol entre deux épisodes de pluie correspond à la perte d'eau subie par la parcelle. Si nous faisons l'hypothèse que les flux de drainage et les flux horizontaux sont inexistant, la perte d'eau entre 2 dates où il n'a pas eu de pluie ni d'arrosage, est assimilable à l'évaporation du sol et à la transpiration de la culture.

L'objectif de cette analyse est de comparer les pertes d'eau entre un sol nu et un sol avec une couverture végétale, afin de distinguer l'évaporation d'un sol nu de la combinaison de l'évaporation et de la transpiration d'un sol couvert de plantes.

Ainsi, la perte d'eau peut être estimée à l'aide de la relation suivante :

$$\Delta S = Pente (\% . jr^{-1}) * nb_{jrs} * d_a * \Delta_z \quad (6)$$

La pente et le nombre de jours sont connus grâce au code, la profondeur correspond à 30 cm. La densité apparente (d_a) est connue grâce aux prélèvements du sol réalisé durant la campagne. Les résultats sont répertoriés dans le tableau 3 ci-dessous.

Tableau 3 : Relevés de densité apparente

Couverture végétale hivernale		Sol nu	
Profondeur (cm)	Da (-)	Profondeur (cm)	Da (-)
0-10	1,51	0-10	1,48
10-20	1,66	10-20	1,70
20-30	1,69	20-30	1,74
30-40	1,71	30-40	1,72

40-50	1,64	40-50	1,77
50-60	1,71	50-60	1,67

En soit la perte d'eau ainsi déterminée ne correspond pas exactement à l'évapotranspiration. Car comme mentionné plus haut dans le texte, le code a déterminé une pente linéaire moyenne. Par conséquent, s'il y a eu des précipitations elles devraient être prises en compte dans le calcul.

Ainsi pour une estimation plus représentative de l'ETR cela donne :

$$\Delta S_{couvert} \leq ETR_{couvert} \leq \Delta S_{couvert} + P_{totale} \quad (7)$$

Afin de réduire l'étendue de résultats possibles, un coefficient d'infiltration global (C_i) sera déterminé afin de pouvoir écrire :

$$ETR_{couvert} = \Delta S_{couvert} + C_i * P_{totale} \quad (8)$$

4.2.1.3. Estimation avec les données de la sonde neutronique

Si les profils d'humidité relevés tout au long de la campagne indiquent l'absence de variation d'humidité du sol à partir d'une certaine profondeur (les profils se rejoignent) et sous hypothèse de plan de flux nuls pour cette profondeur indiquant qu'il n'y a pas de drainage ni de remontée d'eau par capillarité, alors il est également possible d'estimer l'ETR grâce à la sonde à humidité neutronique. Nous utiliserons la différence d'humidité entre le début et la fin de la campagne culturale afin de calculer la variation de stock :

$$\Delta S = \Delta \theta * d_a * \Delta_z \quad (9)$$

Nous utiliserons ensuite l'équation (8) pour déterminer l'ETR.

4.2.2. Détermination de la vitesse d'assèchement du sol sous la culture

Des différences de développement de cultures et de rendements ont été recensées entre celles conduites en ACS et celles en LAB. Que ce soit en termes d'IF et de hauteur de cultures, au vu des différences de développement, nous devrions avoir en toute logique une différence en termes de consommation d'eau. C'est ce que nous allons essayer de voir en déterminant la vitesse d'assèchement du sol à différentes profondeurs en termes d'humidité volumique mais aussi de tension en eau du sol.

Pour se faire, nous allons déterminer une pente en utilisant le même principe que décrit au § 4.2.1. Nous nous placerons juste après une

irrigation ou une pluie assez importante (> 20 mm) pour déterminer la pente moyenne sur les 3 jours juste après celles-ci.

Cette pente obtenue sera considérée comme une mesure de la vitesse d'assèchement du sol pour la culture et sera calculée à partir des données des sondes FDR et des tensiomètres.

4.2.3. Estimation de la consommation en eau de la culture de maïs de 2023

L'estimation de la vitesse d'assèchement est réalisée uniquement après un apport d'eau conséquent, ce qui permet d'évaluer la consommation en eau dans des conditions de confort hydrique. Pour obtenir une estimation de la consommation globale en eau, il est nécessaire d'étendre l'analyse sur l'ensemble de la campagne.

Cette estimation est réalisable grâce aux humidités déterminées avec la sonde neutronique utilisée durant la campagne maïs-2023. De nombreux relevés ont été effectués, en moyenne un par semaine. En disposant de profils hydriques hebdomadaires, il est possible de visualiser l'évolution de l'assèchement du sol induit par l'extraction racinaire et, si les profils hydriques sont similaires à une certaine profondeur (et sous hypothèse de plan de flux nul), d'estimer la profondeur racinaire maximale de la culture et *in fine* d'estimer l'ETR (équation 8).

En choisissant deux dates clés, le semis et la récolte, et en utilisant l'équation (8), nous estimerons la perte de stock en eau du sol durant la campagne culturale. En ajoutant les apports d'eau par irrigation et les précipitations, nous pourrions obtenir une estimation de l'ETR.

5. Résultats & Discussions

5.1. Effet du couvert d'hiver sur l'utilisation de l'eau en surface

Le tableau 4 ci-dessous présente les données pour différents événements pluvieux hivernaux aux cours des trois années. Il montre la lame d'eau précipitée en millimètres, mesurée par la station météo de la plateforme, ainsi que la variation de stock en eau du sol mesurée par les sondes FDR aux profondeurs 0-30 et 30-60 cm. Il indique également le pourcentage de l'augmentation du stock d'eau par rapport à la pluie tombée pour les parcelles en sol nu et couvert. Ce pourcentage est assimilé au coefficient d'infiltration de la pluie dans le sol.

Tableau 4 : Détermination du ΔS et C_i au moment de pluies hivernales

Lame d'eau précipitée (mm)	LAB-Sol nu		ACS-Couverts	
	ΔS (mm)	C_i	ΔS (mm)	C_i
7,5	7,3	97	12	160
9	10	111	8,7	97
20	18,5	92	18,3	91
24	25,3	105	26	108
32	13,5	42	21,2	66
32,5	17,7	54	12,5	38
130	32,6	25	52,5	40

Deux tendances se dégagent de ces données. La première se manifeste lorsque la pluie est inférieure à 30 mm : dans ce cas, la totalité de l'eau précipitée est infiltrée, que ce soit sur sol nu ou sur couverture végétale. La seconde tendance apparaît lorsque la pluie dépasse les 30 mm : des pertes commencent à se produire. Il semble que la couverture végétale permette une meilleure infiltration que le sol nu, avec une augmentation de l'ordre de 10 à 20 %. Mais, étant donné le peu de données à plus de 30 mm, cela ne peut rester que des hypothèses.

Ces résultats sont cohérents avec la nature du sol de Lavalette, qui est de texture limono-argileuse à texture fine et sensible au flaquage. Une couverture végétale pourrait limiter cet effet grâce au feuillage, qui réduit

la vitesse d'impact des gouttes de pluie, et au réseau racinaire, qui favoriserait l'infiltration en créant de la macroporosité.

Ces observations restent des hypothèses en raison du nombre limité de données disponibles.

5.2. Estimation de l'ETR du couvert d'hiver

5.2.1. Valeurs obtenues avec la sonde FDR

Le tableau 5 montre les valeurs d'évaporation sol nu et d'ETR des couverts obtenus avec la sonde FDR pour les parcelles en sol nu et couvertes pour les trois hivers. La plage de temps d'étude ainsi que la pluie tombée au cours de celle-ci sont également reportées.

Tableau 5 : ETR du couvert d'hiver et ES du sol nu obtenu avec la sonde FDR

Hiver	Evaporation Sol nu LAB (mm/j)	ETR Couvert ACS (mm/j)	Plage de temps	Pluie totale durant la plage de temps (mm)
2020 - 2021	1,04	1,9	23/02 - 10/04	12
2021 - 2022	2,33	3,8	28/12 - 08/05	219
2022 - 2023	1,07	1,25	03/01 - 08/05	83,5

5.2.2. Valeurs obtenues avec la sonde neutronique

Le tableau 6 présente les valeurs d'ETR obtenues avec la sonde neutronique pour les parcelles en sol nu et couvertes pour les trois hivers. La plage de temps d'étude ainsi que la pluie tombée au cours de celle-ci sont également reportées. Pour rappel, la sonde est tombée en panne au cours de l'été 2021 et n'a pu être utilisable que pour l'hiver 2022-2023.

Tableau 6 : ETR du couvert d'hiver et ES du sol nu obtenu avec la sonde neutronique

Hiver	Evaporation Sol nu LAB (mm/jr)	ETR Couvert ACS (mm/jr)	Plage de temps	Pluie (mm)
2020 - 2021	0,47	1,07	23/02 - 10/04	12
2022 - 2023	1,66	1,46	03/01 - 08/05	83,5

Les valeurs moyennes d'ETR obtenues l'ont été pour des périodes végétatives très probablement différentes : plus la destruction des couverts est faite tardivement au printemps, plus les plantes profitent de température pour accroître leur biomasse (degré jour) ce qui impacte la consommation en eau.

Les résultats démontrent que cette consommation supplémentaire par le couvert végétal impacte l'état hydrique du sol pour la culture d'été suivante en ACS, rendant le sol plus sec. Ainsi, si les pluies sont absentes sur la période qui sépare la destruction des couverts et le semis des cultures de rente, comme cela est fortement probable sous climat méditerranéen, l'agriculteur devra irriguer sa parcelle afin de remplir le réservoir hydrique et humecter le lit de semence. En revanche, le sol labouré sera plus humide au moment du semis.

5.3. Vitesse d'assèchement du sol sous la culture commerciale ou d'été

5.3.1. Site de Lavalette

5.3.1.1. Comparaison entre ACS et LAB

Etant donné le nombre très important de données traitées, je vais concentrer mes analyses uniquement sur des cas spécifiques. Le premier cas choisi est celui de la comparaison de l'assèchement du sol entre LAB et ACS en situation d'irrigation en ASP sur culture de maïs (2021) et de sorgho (2022). Les figures 11 et 12 ci-dessous représentent l'évolution de cet assèchement du sol avec les sondes FDR pour les années 2021 et 2022 au regard de l'évolution des surfaces foliaires représentées par les valeurs IF.

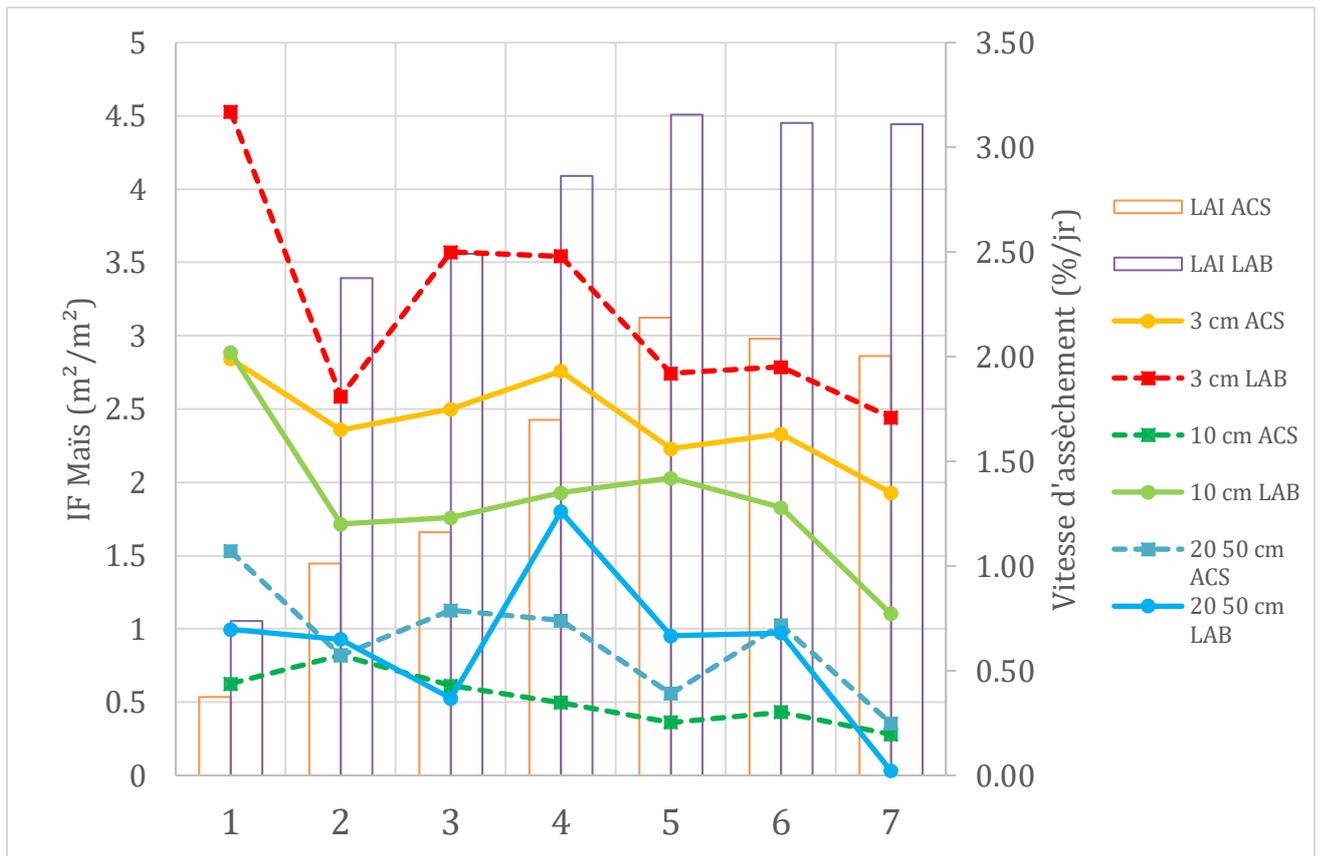


Figure 11 : Evolution de la vitesse d'assèchement en ASP pour ACS et LAB pour maïs 2021

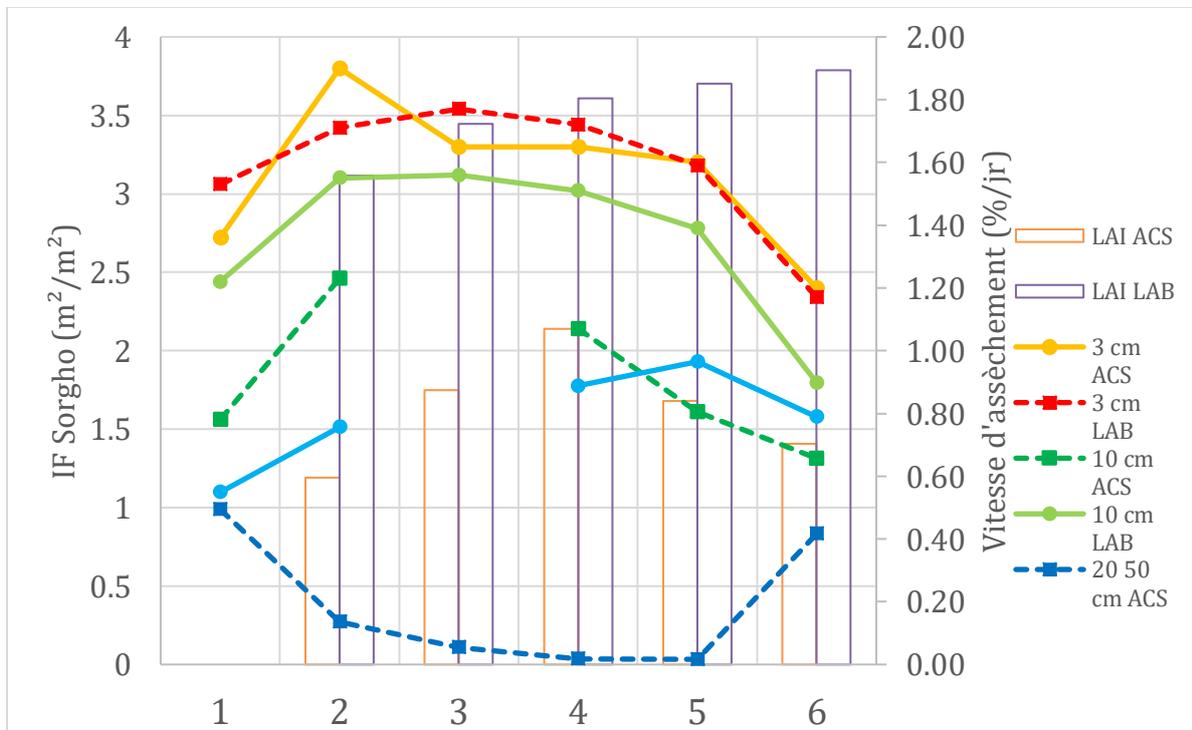


Figure 12 : Evolution de la vitesse d'assèchement en ASP pour ACS et LAB pour sorgho 2022

L'axe des abscisses présente le nombre des irrigations successives effectuées pendant le cycle cultural. Plus ce nombre est élevé, plus nous avançons dans la campagne. L'évolution de l'indice foliaire (IF) est également tracée pour les deux traitements. Nous remarquons un IF plus élevé sur LAB en comparaison d'ACS pour les 2 années, d'environ 1,5 à 2 m²/m² pour l'année 2021 et de 2 m²/m² pour l'année 2022. Ces différences de développement végétatif des cultures d'été pourraient s'expliquer en grande partie par les différences de sol avec pour LAB un sol travaillé facilitant le développement racinaire et à contrario pour ACS un sol compacté comme l'ont montré les analyses de pénétromètre effectuées dans le cadre de la thèse de Juan David Dominguez Bohorquez.

La figure n°11 montre qu'à 3 cm, l'assèchement est supérieur pour LAB, cet écart augmentant à 10 cm de profondeur. Toutefois, les vitesses d'assèchement sont égales sur l'horizon 20 – 50 cm. Ces observations à 3 et 10 cm de profondeur sont logiques compte tenu de la différence d'IF entre les deux modalités et du fait que les cultures en ACS sont semées sur des résidus de cultures, ce qui réduit l'évaporation.

Cependant, les résultats enregistrés pour l'horizon 20 – 50 cm soulèvent des questions. En effet, si le maïs indique un IF plus élevé en LAB, il devrait avoir une densité racinaire plus élevée et donc prélever plus d'eau (ALBASHA, 2015).

La figure n°12 révèle un assèchement similaire à 3 cm, mais plus on se situe en profondeur dans le sol, plus LAB s'assèche rapidement par rapport à ACS. Les observations suivent une logique inverse par rapport à l'année 2021.

Ces différences peuvent peut-être s'expliquer par le fait que l'année 2021 a été une année « humide » sur la période d'avril à octobre. Les pluies importantes ont rempli le sol de l'ACS et compensé la consommation du couvert d'hiver, permettant aux racines de bien se développer. En revanche, l'année 2022 a été une année plus sèche. La différence de stock de départ en eau du sol pour l'ACS a entraîné une difficulté pour la plante à se développer.

5.3.1.2. Comparaison entre ASP et GGE

Le second cas choisi est celui de la comparaison de la vitesse d'assèchement entre ASP et GGE pour les 2 modalités de travail du sol (LAB et ACS). Comme je me suis positionné après une irrigation et que la gaine du goutteur est placée à 40 cm de profondeur, nous ne pourrions comparer

les deux modalités d'irrigation que sur l'horizon 20 – 50 cm. La figure n°13 montre l'évolution de cet assèchement pour l'année 2021 en situation ACS pour la culture de maïs pour la sonde FDR. Ensuite, la figure n°14 montre l'évolution de cet assèchement pour l'année 2022 en LAB pour la culture de sorgho pour la sonde FDR.

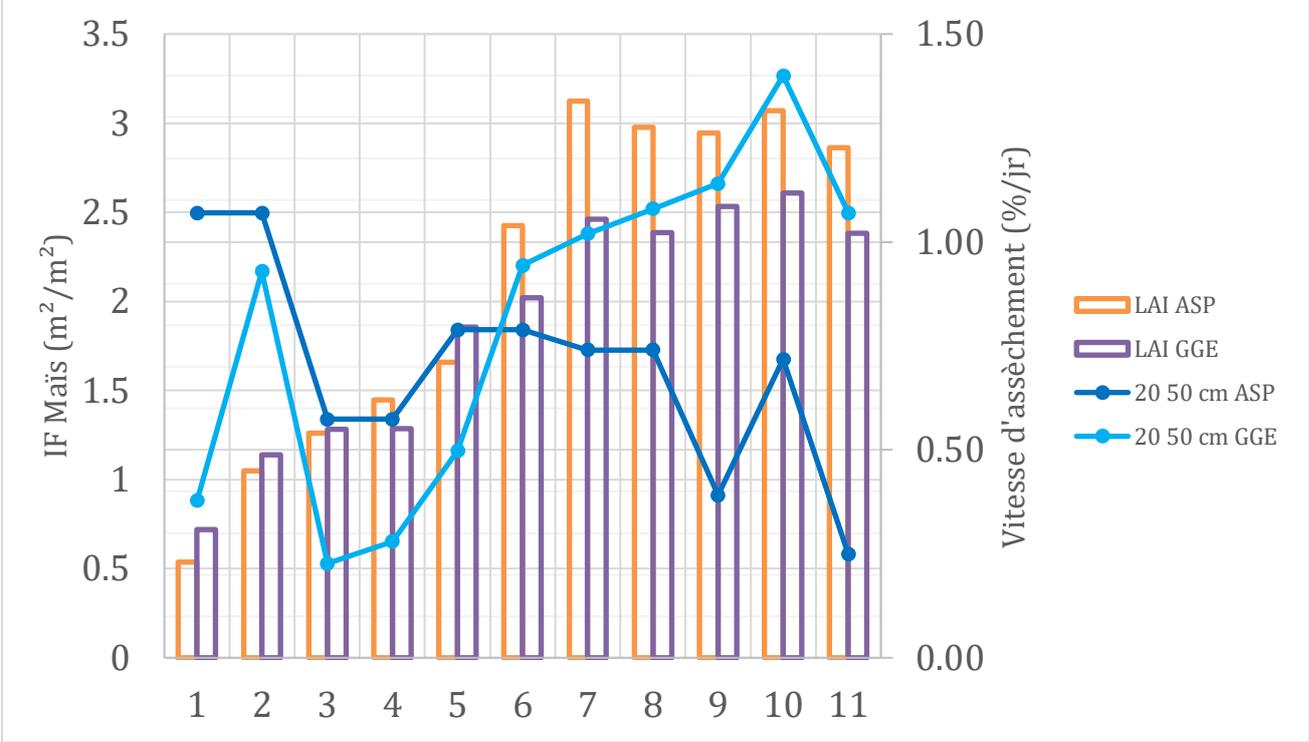


Figure 13 : Evolution de la vitesse d'assèchement en ASP et GGE pour l'ACS pour 2021

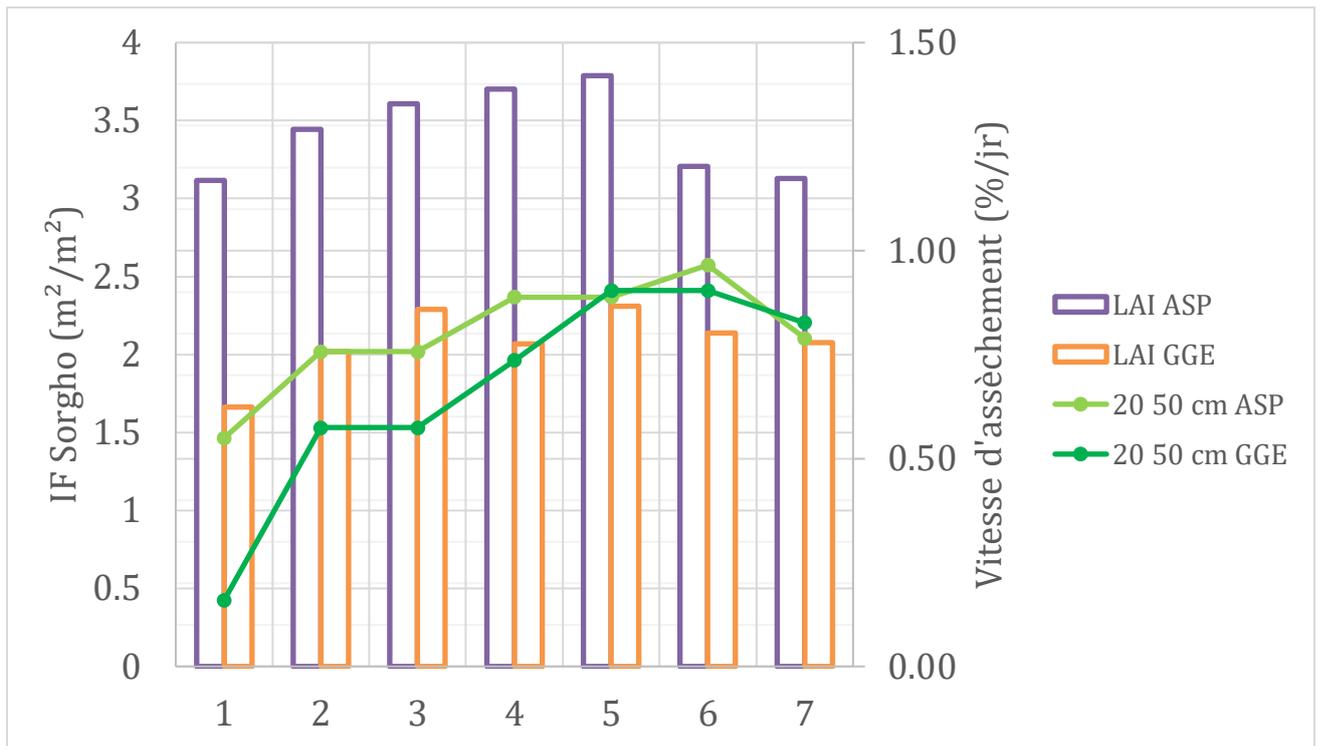


Figure 14 : Evolution de la vitesse d'assèchement en ASP et GGE pour le LAB pour 2022

L'évolution de IF est également indiquée pour les deux modalités d'irrigation et de travail du sol. Nous remarquons un IF plus élevé pour la modalité en aspersion pour les deux années, d'environ 0,5 de plus pour l'année 2021 à la fin de la campagne et de 1,5 à 2 de plus pour l'année 2022.

La figure 13 montre que l'assèchement est plus rapide pour ASP au début de la campagne, mais cette tendance s'inverse progressivement au fur et à mesure que la campagne avance. De même, la figure 14 indique un assèchement initialement supérieur pour ASP, bien que le GGE tende à rattraper son retard sans le dépasser.

Ces observations suggèrent que la culture irriguée en GGE présente un retard de développement par rapport à ASP. Lors d'une année humide, ce retard peut être comblé, mais en cas d'une année plus sèche, les plantes conduites en ACS-GGE rencontrent plus de difficultés à se développer. L'enfouissement profond de la gaine du GGE à 40 cm semble poser problème, car les premières irrigations n'atteignent pas efficacement les graines semées à la surface du sol. Ce retard de croissance est rattrapé une fois que les racines atteignent la profondeur de 40 cm.

5.3.2. Agriculteurs PACA

5.3.2.1. Blé d'hiver 2022

Concernant les agriculteurs de la région PACA, nous nous concentrons sur l'année 2022, en examinant plus particulièrement leur blé d'hiver. Bien qu'il y ait des erreurs dans le jeu de données, limitant ainsi les possibilités d'analyse, nous pouvons tout de même comparer les traitements ACS_15 et LAB. La figure n°15 montre l'évolution de l'assèchement des tensiomètres pour les deux agriculteurs.

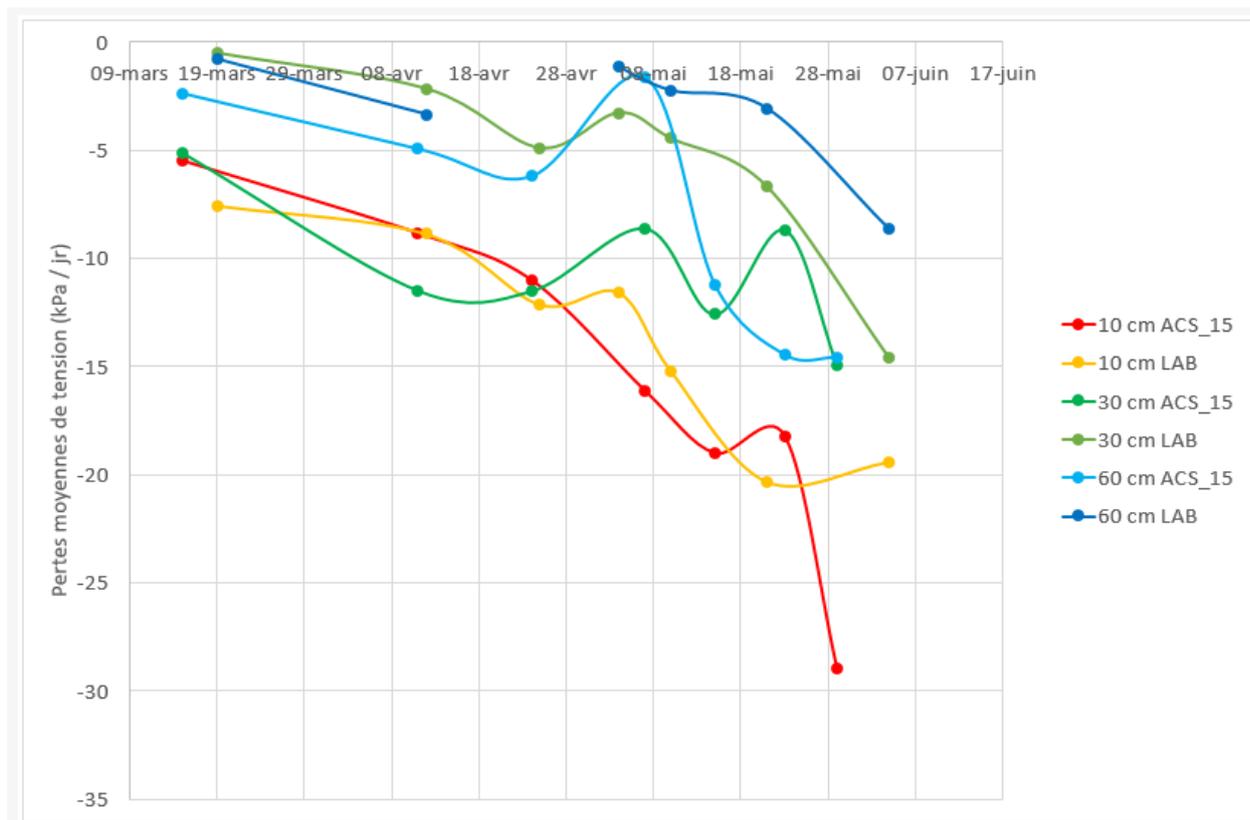


Figure 15 : Evolution de la pertes moyennes de tension en eau du sol sur un blé d'hiver en 2022

Initialement, l'assèchement du sol à 10 cm de profondeur est similaire sur les 2 parcelles. Cependant, plus la profondeur de l'horizon devient importante plus la perte de tension en eau du sol devient élevée en ACS_15 par rapport à LAB.

Contrairement aux cultures de Lavalette, il semble que le sorgho cultivé en ACS se soit enraciné et développé aussi bien, voire mieux, que celui en LAB, malgré un calendrier d'irrigation et des conditions climatiques similaires. En supposant qu'une consommation d'eau plus élevée est indicative d'un meilleur développement végétal, nous pouvons affirmer que l'ACS a permis un enracinement efficace de la culture. Après une période de transition à

long terme, le retard de développement initialement observé en ACS semble s'être estompé, suggérant que les cultures en ACS peuvent atteindre un niveau de performance comparable à celles en LAB.

5.3.2.2. Maïs de 2023

Pour l'année 2023, nous nous concentrons uniquement sur la culture de maïs de la parcelle ACS_15. Pour cette année, la parcelle a été subdivisée en plusieurs bandes avec des historiques de cultures différents (voir annexe C). De plus, d'autres types de sondes, les sondes Sentek (voir Glossaire), ont été installées à des profondeurs de 5, 15, 25, 35, 55 et 75 cm. L'objectif ici est de comparer les indicateurs obtenus par les sondes FDR avec celles des sondes Sentek.

5.3.2.2.1. Données d'humidité des sondes FDR

Les résultats obtenus avec la sonde FDR sont illustrés sur la figure n°16.

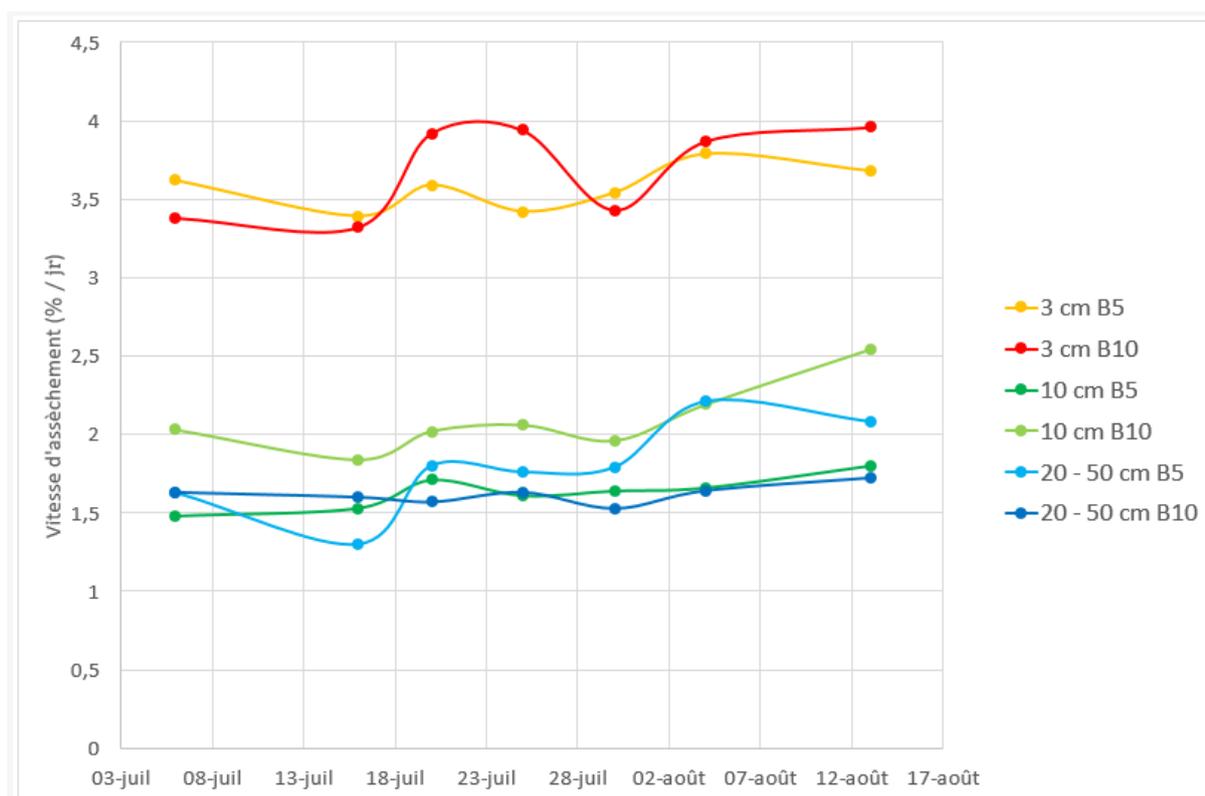


Figure 16 : Evolution de la vitesse d'assèchement pour les bandes équipées de FDR

Nous observons d'abord que les ordres de grandeur des vitesses d'assèchement sont équivalents lorsque nous comparons les mêmes

profondeurs, indiquant que la différence d'historique de cultures ne change pas drastiquement le développement du maïs.

Ensuite, nous remarquons que l'assèchement à la surface est supérieur de 50 à 100 % comparé à 10 cm et à 20-50 cm de profondeur. Cela semble cohérent car, plus on se rapproche de la surface, plus la densité racinaire augmente et plus la composante d'évaporation intervient.

Cependant, il est également notable que l'assèchement à 10 cm est similaire à celui observé à 20-50 cm pour les deux bandes. Cela suggère que la consommation d'eau est la même à 10 cm qu'à 50 cm, ce qui semble illogique. Avant de tirer des conclusions définitives, nous examinerons les données fournies par les sondes Sentek.

5.3.2.2.2. Sondes capacitives Sentek

Les résultats obtenus avec les sondes Sentek sont illustrés sur la figure n°17. L'objectif avec ces sondes, étant donné que je ne compare pas les mêmes bandes, je m'intéresse plutôt à regarder la pertinence entre les sondes et qualifier les tendances pour chacune.

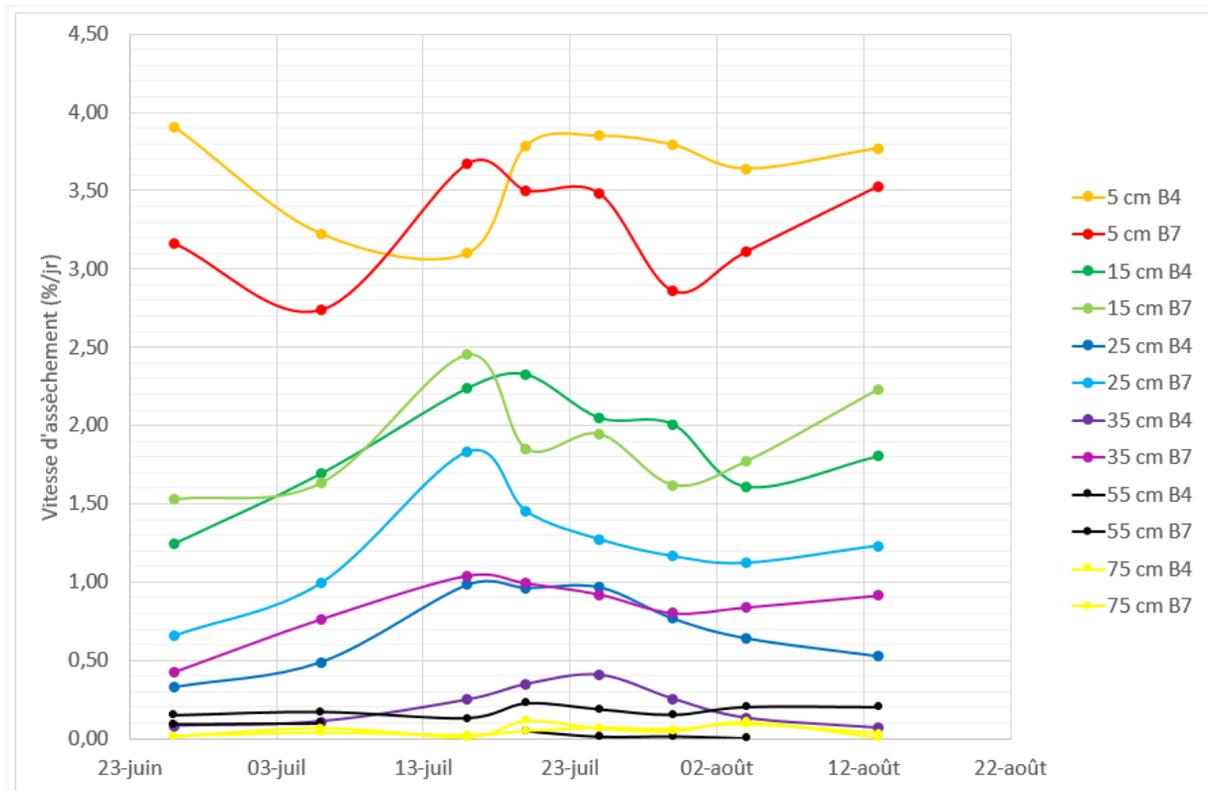


Figure 17 : Evolution de la vitesse d'assèchement pour les bandes équipées de Sentek

Nous observons que plus on avance en profondeur dans le sol, moins il y a de consommation d'eau, avec la sonde placée en surface indiquant une consommation maximale. Cependant, les vitesses d'assèchement à 55 et 75 cm sont presque nulles, suggérant que les racines du maïs atteignent rarement ces profondeurs.

Cela est logique, car l'agriculteur irrigue par aspersion et apporte des doses hebdomadaires d'environ 35 à 40 mm, maintenant ainsi la plante en confort hydrique. Une irrigation avec cette lame d'eau a peu de chance de descendre aussi profondément, ce qui empêche le développement du système racinaire vers le bas puisque l'eau est disponible en quantité suffisante à la surface. L'installation de tensiomètres à différentes profondeurs aurait permis de confirmer les interprétations.

Nous remarquons également qu'à partir de 25 cm de profondeur, un écart commence à se créer entre les bandes B7 et B4, B7 consommant plus que B4. Cette observation est encore plus prononcée à 35 cm de profondeur. Il semblerait donc que l'historique des cultures ait influencé le développement racinaire du maïs.

6. Amélioration de la gestion de l'irrigation et du suivi métrologique

Une autre mission importante de mon stage était, après avoir constaté des imperfections, de proposer des pistes d'amélioration pour la poursuite des essais, tant au niveau de la gestion de l'irrigation qu'au niveau de la métrologie.

Pour l'ACS en ASP, l'irrigation simule une pluie ; cependant, il y a quelques centimètres de paillis sur le sol contrairement au LAB. Le paillis absorbe une partie de l'eau, rendant moins d'eau accessible pour l'extraction racinaire. Cela peut en partie expliquer la différence de développement entre les deux modalités. Je recommande donc un apport supplémentaire de quelques millimètres pour l'ACS. Par exemple pour une irrigation de 30 mm en LAB, une dose de 35 mm pourrait être appliquée en ACS pour un paillis de surface relativement épais. Le surplus de dose pourra être réduit au fur et à mesure de la dégradation du paillis.

De manière générale en ASP, j'encourage à irriguer la nuit si possible, ou sinon durant des journées sans vent pour gagner en efficacité et plus particulièrement en uniformité spatiale de l'arrosage.

Pour l'irrigation en GGE, plusieurs améliorations sont possibles. Premièrement, nous avons constaté une différence significative de développement des plantes entre 2021 et 2022, due aux conditions pluviométriques plus favorables en 2021, avec des pluies en début de campagne. Les gaines étant à 40 cm de profondeur, les premières irrigations sont peu efficaces car la graine est proche de la surface et non humectée par le bulbe induit par le goutteur. Je recommande donc de faire une irrigation de levée par aspersion et/ou de remonter les gaines à 10-15 cm de la surface. A cette profondeur, elles ne devraient pas être endommagées si des opérations de techniques de culture simplifiées ou de travail superficiel du sol sur quelques centimètres de profondeur, devaient être effectuées.

Pour le GGE, de manière plus générale, j'encourage à irriguer en fonction des relevés des profils hydriques et/ou des valeurs tensiométriques. J'ai remarqué des irrigations peu efficaces lorsque le sol était déjà à une humidité proche de la capacité au champ, entraînant une perte d'eau par drainage. Concernant les profils hydriques, s'ils sont effectués avec les sondes FDR, je propose que celles-ci soient préalablement calibrées en fonction du type de sol dans lesquelles elles sont utilisées comme le recommandent les fournisseurs.

Tout au long de la thèse, une prolifération abondante des adventices en ACS a été observée. Cette biomasse supplémentaire gêne le développement de la culture en créant une compétition hydrique et azotée dans le sol. Je recommande un contrôle strict des adventices en utilisant soit des couverts végétaux dans le rang, comme le trèfle ou la vesce qui réduisent la levée des adventices, soit une désherbineuse qui détruit les adventices mécaniquement en inter-rang et chimiquement sous le rang via l'application d'un herbicide autorisé.

7. Conclusion

Ce mémoire avait pour ambition de comparer les effets des pratiques d'Agriculture de Conservation des Sols (ACS) à celles des pratiques conventionnelles, en analysant la dynamique de l'eau dans des parcelles irriguées conduites en ACS de transition. Pour ce faire, des données tensiométriques et hydriques ont été recueillies sur trois campagnes culturales estivales et hivernales.

Dans un premier temps, il a été nécessaire de dépouiller le jeu de données et de calibrer a posteriori les sondes pour obtenir une gamme d'humidité plus représentative de la réalité. Deux indicateurs principaux ont été choisis : l'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) du couvert d'hiver et la vitesse d'assèchement du sol pour la culture d'été.

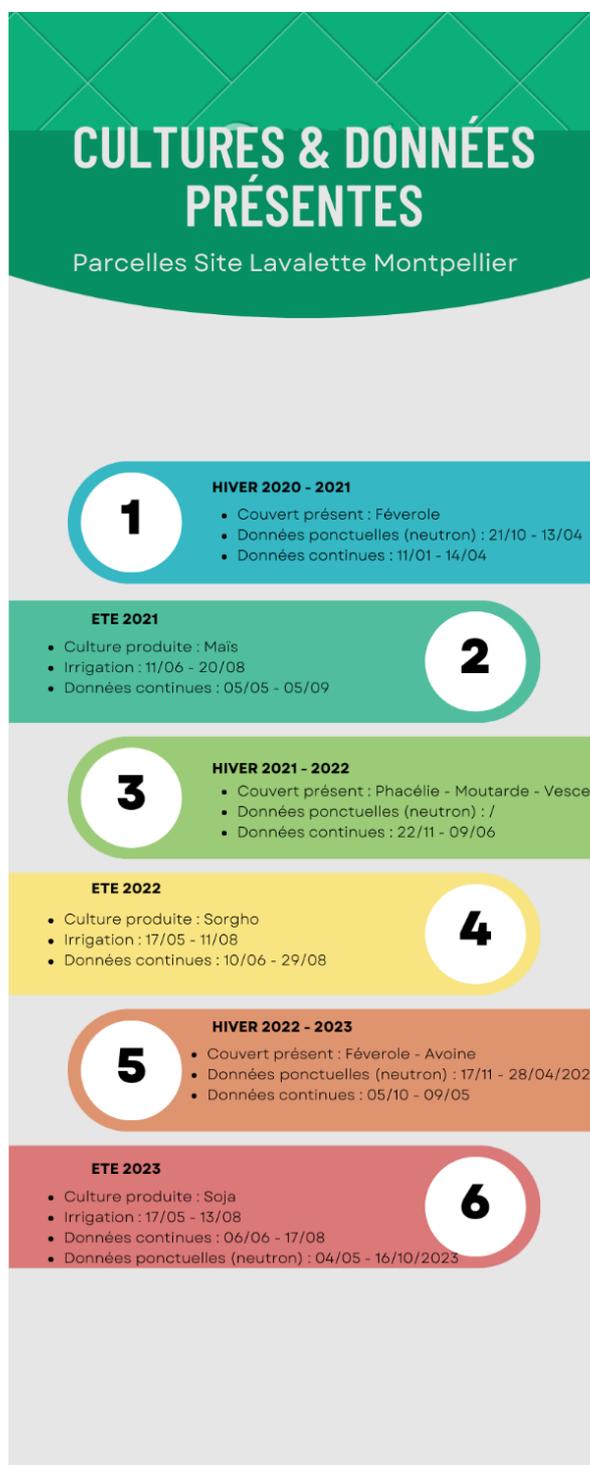
L'analyse de l'ETR du couvert d'hiver a révélé qu'un sol couvert consomme plus d'eau qu'un sol nu. Cette différence dépend de la date de destruction du couvert et de la pluviométrie hivernale, affectant ainsi l'état hydrique du sol pour la culture suivante. Pour la culture d'été, les résultats montrent que le développement en ACS est significativement inférieur à celui en conventionnelle, en raison du compactage du sol et des conditions hydriques. Les conditions climatiques jouent également un rôle crucial. Cependant, ces effets négatifs semblent s'atténuer avec l'adaptation des pratiques culturales et des stratégies d'irrigation.

Bien que ce travail se soit principalement concentré sur l'ACS de transition, les résultats suggèrent qu'il serait pertinent de mener une étude approfondie sur l'ACS avec un suivi métrologique plus poussé et des pratiques culturales spécifiques à l'ACS (date de semis, irrigation de levée, etc.).

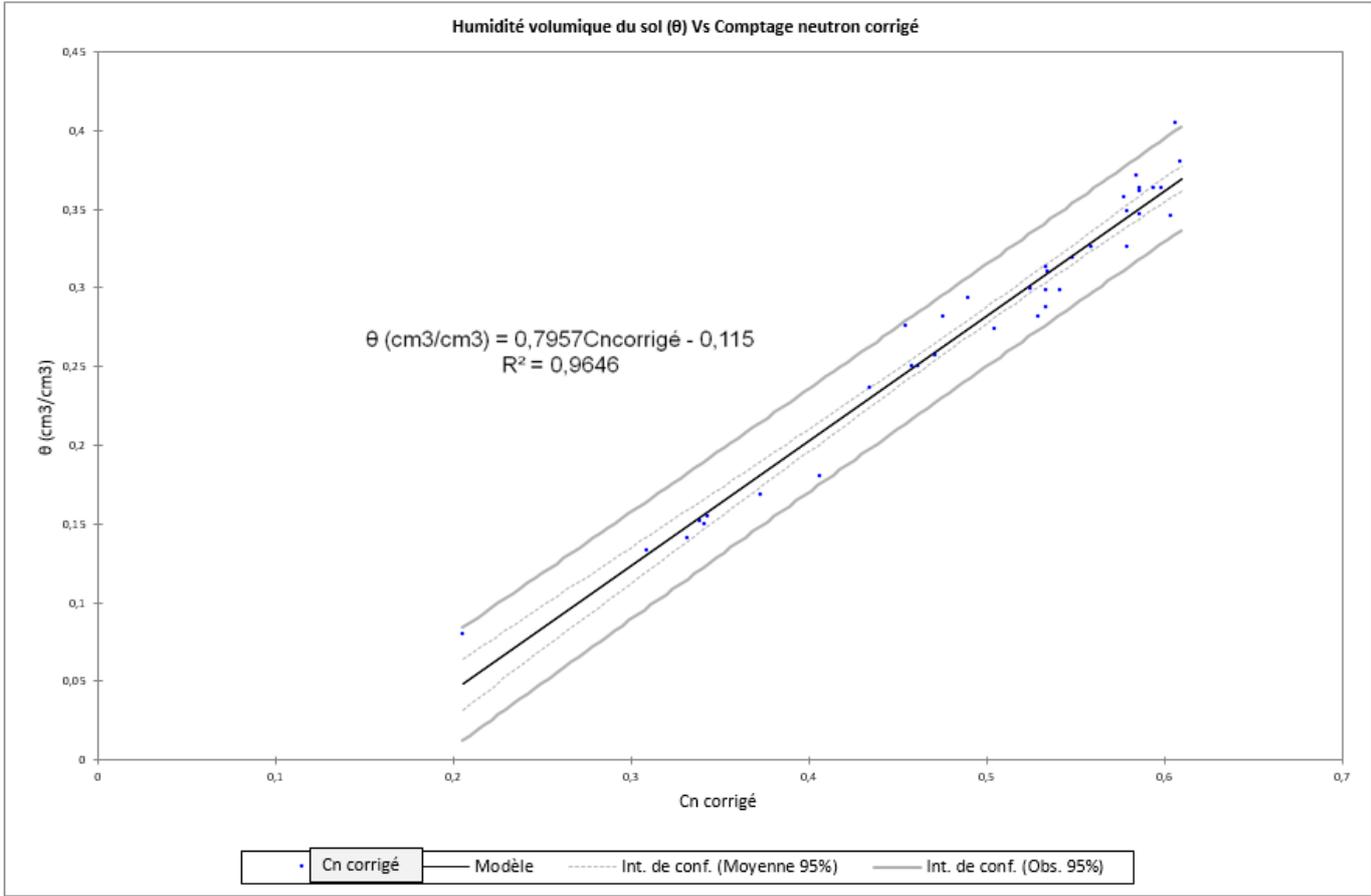
8. Références bibliographiques

- Agralis (2023) 'Comment fonctionnent les sondes capacitives Sentek ? Agralis', *Agralis Services*, 13 February. Available at: <https://agralis-services.fr/fonctionnement-sonde-capacitive-sentek/> (Accessed: 24 July 2024).
- ALBASHA, R. (2015) *Evaluation de la productivité de l'eau d'irrigation par la modélisation : le cas du maïs sous goutte-à-goutte enterré en sol limoneux profond*. Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement.
- Bréda, N., Lefèvre, Y. and Badeau, V. (2002) 'Réservoir en eau des sols forestiers tempérés : spécificité et difficultés d'évaluation', *La Houille Blanche*, 88(3), pp. 24–32. Available at: <https://doi.org/10.1051/lhb/2002038>.
- Campbell Scientific (2021) 'Product Manual : CS 650 & CS 655 Water Content Reflectometers', in, p. 55.
- CS650 - Sonde réflectométrique de teneur en eau du sol (30 cm) (2015). Available at: <https://www.campbellsci.fr/cs650> (Accessed: 24 July 2024).
- Dominguez-Bohorquez, J.-D. *et al.* (2024) 'Early-Stage Impacts of Conservation Agriculture on Soil Hydrodynamic Properties and Crop Performance in Mediterranean Irrigated Systems'. Montpellier, France.
- Fares, A. and Alva, A.K. (2000) 'Soil Water Components Based on Capacitance Probes in a Sandy Soil', *Soil Science Society of America Journal*, 64(1), pp. 311–318. Available at: <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.641311x>.
- Jayaraman, S. *et al.* (2021) 'Conservation Agriculture: Issues, Prospects, and Challenges in Rainfed Regions of India', in S. Jayaraman *et al.* (eds) *Conservation Agriculture: A Sustainable Approach for Soil Health and Food Security : Conservation Agriculture for Sustainable Agriculture*. Singapore: Springer, pp. 1–21. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-16-0827-8_1.
- Sonde à neutrons (HU) - Wikhydro (2023). Available at: [http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Sonde_%C3%A0_neutrons_\(HU\)](http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Sonde_%C3%A0_neutrons_(HU)) (Accessed: 24 July 2024).
- Sun, G. *et al.* (2011) 'A general predictive model for estimating monthly ecosystem evapotranspiration', *Ecohydrology*, 4. Available at: <https://doi.org/10.1002/eco.194>.
- Thompson, R.B. *et al.* (2007) 'Determination of lower limits for irrigation management using in situ assessments of apparent crop water uptake made with volumetric soil water content sensors', *Agricultural Water Management*, 92(1–2), pp. 13–28. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.04.009>.

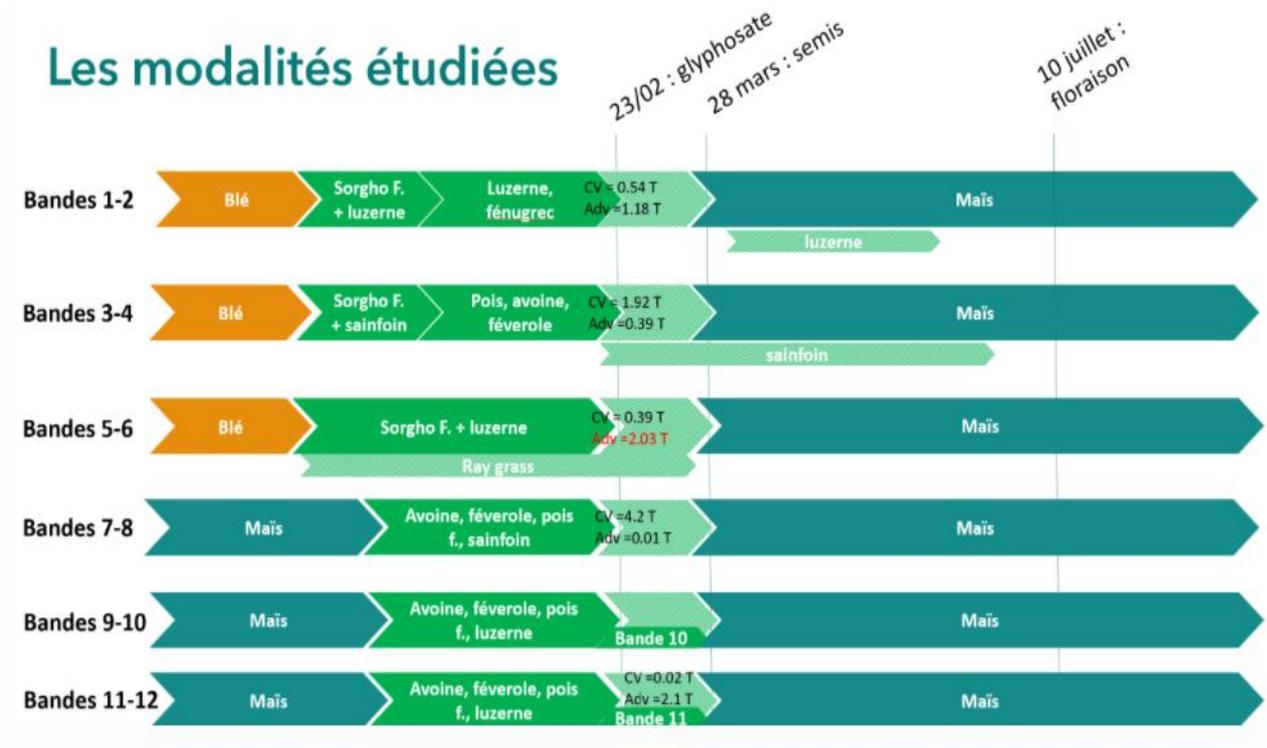
Annexe A : Cultures & Données présentes sur le site de Lavalette



Annexe B : Calibration de la sonde neutronique



Annexe C : Historique des différentes bandes d'ACS_15 pour maïs 2023



Résumé

Face aux défis climatiques et environnementaux, les pratiques agricoles actuelles doivent évoluer. L'ACS apparaît comme une solution prometteuse en se basant sur trois principes : le non-travail du sol, la rotation de cultures et la couverture permanente du sol. L'étude réalisée dans ce mémoire porte sur l'analyse de la dynamique de l'eau dans le sol en ACS et l'élaboration d'indicateurs pour optimiser l'irrigation en climat méditerranéen. Nous avons utilisé une base de données exhaustive comprenant des mesures de tensiomètres et de sondes d'humidité à intervalles de 20 minutes sur trois campagnes culturales. Nos résultats montrent que la transition vers l'ACS impacte significativement les cultures à court terme que ce soit de manière hydrique ou végétative. Toutefois, si on effectue cette analyse chez des agriculteurs ayant effectué leur transition depuis plusieurs années, nous remarquons que ces effets se dissipent. Ces résultats démontrent le potentiel de l'ACS à long terme mais que des progrès sont encore à faire à court terme.

Mots clés

Sondes d'humidités, Sondes tensiométriques, Profil hydrique, Agriculture, Pratiques culturales, Gestion de l'Eau, Changement Climatique

Pour citer cet ouvrage : Lanos, Anthony, (2024). Analyse de la dynamique de l'eau dans le sol et élaboration d'indicateurs pour l'optimisation de l'irrigation en Agriculture de Conservation des Sols. Mémoire de stage M2, Master Eau, spécialité Eau et Agriculture, AgroParisTech/Institut Agro Montpellier/Univ. Montpellier. Nombre de pages.

2 Place Pierre Viala, Campus La Gaillarde, 34000 Montpellier