



HAL
open science

Projet ESPOL. Synthèse des travaux menés par l'URSOLS

Maud Seger, Isabelle Cousin

► **To cite this version:**

Maud Seger, Isabelle Cousin. Projet ESPOL. Synthèse des travaux menés par l'URSOLS. [Rapport Technique] auto-saisine. 2017, 31 p. <hal-01607394>

HAL Id: hal-01607394

<https://hal.science/hal-01607394v1>

Submitted on 5 Jun 2020

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

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



Distributed under a Creative Commons CC BY-SA 4.0 - Attribution - ShareAlike - International License

Projet ESPOL

Synthèse des travaux menés par l'UR SOLS

Maud SEGER, Isabelle COUSIN

Avec le soutien de Guillaume GIOT, Ghislain GIROT, Christian LE LAY, Pierre
COURTEMANCHE, Didier LALOUA, Olivier JOSIERE

INRA, Centre Val de Loire, UR0272 SOLS, F-45075 Orléans Cedex 2

Juin 2017

Table des matières

1. Introduction.....	3
2. Site d'étude	3
2.1. Site de « Limoron ».....	3
2.2. Site « Les hôtels »	6
2.2.1. Caractérisation du contexte pédologique local.....	6
2.2.2. Caractérisation pédologique de la future zone instrumentée	7
3. Caractérisation <i>in situ</i> du fonctionnement hydrique des sols.....	8
3.1. Instrumentation pour les suivis hydriques temporels des sols.....	8
3.1.1. Instrumentation du site de Limoron	8
3.1.2. Installation d'un observatoire géophysique sur le site des Hôtels	9
3.2. Caractérisation du fonctionnement hydrique des sols lors de la saison 2014-2015	10
3.2.1. Suivi de la teneur en eau des sols par des mesures ponctuelles	10
3.2.2. Suivi du fonctionnement thermo-hydrique des sols par tomographie de résistivité électrique (Station 1).....	12
3.3. Caractérisation du fonctionnement hydrique des sols lors de la saison 2015-2016	12
3.4. Saison 2016-2017 : Premières chroniques temporelles de l'observatoire géophysique.....	15
3.3.1. Chronique de résistivité électrique	15
3.3.2. Chronique de température	17
3.5. Synthèse sur les travaux expérimentaux.....	18
4. Modélisation du fonctionnement hydrique des sols de Villamblain – Etude des transferts préférentiels et des remontées capillaires.....	18
4.1. Présentation du modèle	18
4.1.1. Cadre général	18
4.1.2. Description des processus hydriques dans le modèle STICS.....	18
4.1.3. Mise en œuvre de la simulation sur le site de Villamblain.....	19
4.2. Modélisation simple du bilan hydrique.....	21
4.3. Simulation d'écoulements préférentiels	26
4.4. Simulation des remontées capillaires	26
4.5. Synthèse sur les travaux de modélisation	30
5. Conclusion générale	30
6. Références.....	31
7. Annexes	32

développé repose sur des matériaux calcaires réorganisés par des phénomènes de cryoturbation.

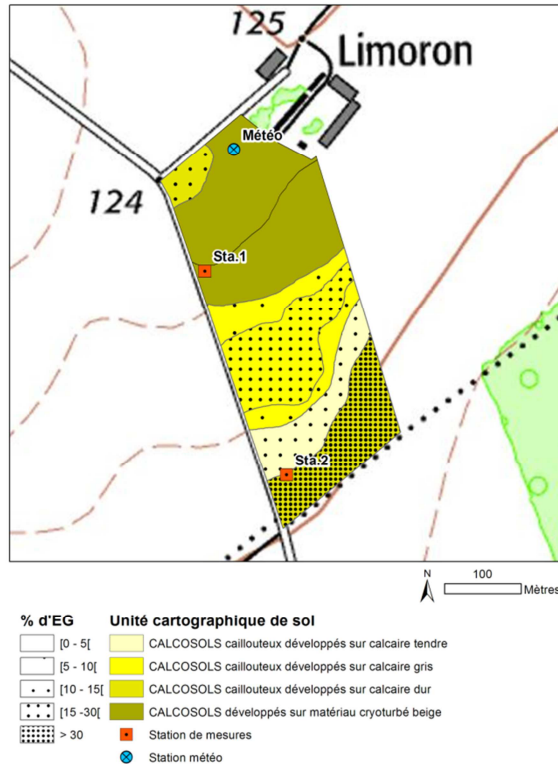
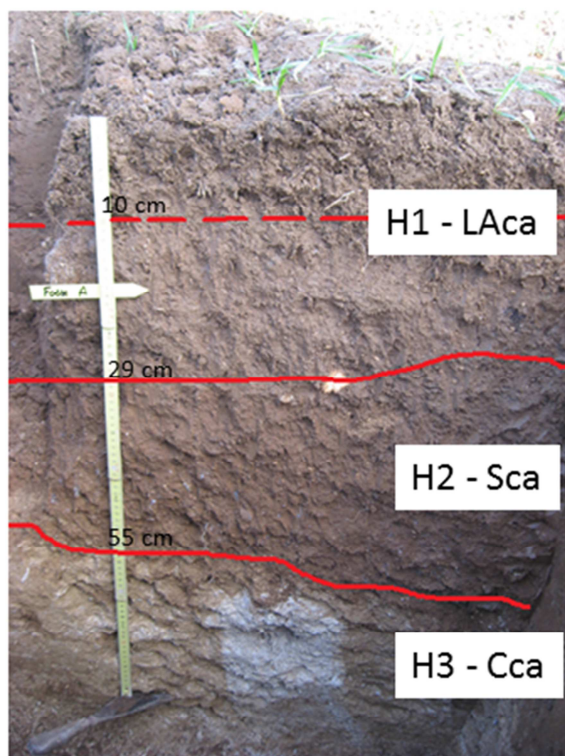


Figure 2 : Carte des types de sols du site de Limoron et position des 2 stations étudiées

Sur la base de cette cartographie des sols, nous avons sélectionné deux stations (Station 1 et Station 2, figure 2) dans la parcelle représentant des fonctionnements hydriques différenciés :

- La station 1 est représentée par un sol profond de type CALCOSOL sur calcaire cryoturbé tendre (figure 3). Le calcaire meuble possède une porosité telle qu'elle permet *a priori* les écoulements d'eau.
- La station 2 est installée sur un sol court de type CALCOSOL caillouteux sur calcaire blanc dur (figure 3) qui a priori constitue une barrière mécanique à l'enracinement et aux écoulements hydriques. Ce sol est représenté par une forte charge en éléments grossiers calcaires qui constituent une réserve potentielle en eau (Tetegan et al., 2011).



**Station 1 (Sta1) – Sol « long »
CALSO SOL sain développé sur
calcaire cryoturbé tendre**

0 à 29 cm : Horizon Laca (H1)

Horizon calcaire (CaCO₃ total = 61 g/kg), argilo-limoneux (33 % argile, 60 % limon, 7 % sable), calcaire (X%CaCO₃) subdivisé en deux couches de structures différenciées :

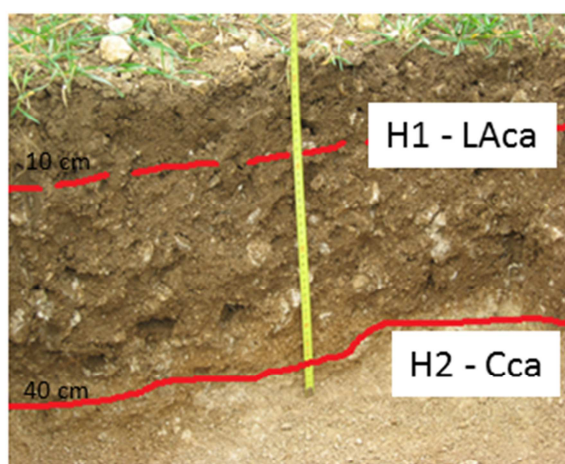
- De 0 à 10 cm : une couche meuble correspondant à la profondeur de travail du sol pratiquée depuis environ 10 ans (travail superficiel au cover crop)
- De 10 à 29 cm : une couche plus massive, plus dense avec beaucoup de petits graviers calcaire de 2-3 mm

29 à 45 cm : Horizon Sca (H2)

Horizon structural calcaire (CaCO₃ total = 41 g/kg) argilo-limoneux (33 % argile, 62 % limon, 5 % sable) Quelques petits graviers calcaires. Structure prismatique avec une sous-structure polyédrique assez fine de 2-3 cm.

A partir de 55 : Horizon Cca calcaire cryoturbé (H3)

Horizon de calcaire cryoturbé beige tendre argilo-limoneux (31% argile, 60 % limon, 9 % sable) avec présence de lentilles de calcaire gris poudreux avec éléments grossiers décimétriques et centimétriques à l'intérieur. Au moment de la description quelques racines ont pu être observées dans les conduits de vers.



**Station 2 (Sta2) – Sol « court »
CALCO SOL sain caillouteux développé sur
calcaire dur**

0 à 40 cm : Horizon Laca (H1)

A partir de 40 cm : Cca calcaire dur (H2)

Figure 3 : Description pédologique des stations 1 et 2 du site de Limoron

2.2. Site « Les hôtels »

Le site « les hôtels » se situe en bordure d'une parcelle agricole. Les sols sont proches de ceux de la parcelle du site de Limoron, il s'agit de CALCOSOLS limono-argileux plutôt profonds reposant sur un calcaire meuble. **Ce site est celui qui a également été choisi pour la future plateforme O'ZNS qui sera installée dans le cadre du projet PIVOTS.** Nous avons choisi ce site pour installer un dispositif innovant de surveillance en continu et à distance du sous-sol.

2.2.1. Caractérisation du contexte pédologique local

Une cartographie de la résistivité électrique sur 3 épaisseurs de la parcelle agricole adjacente au site instrumenté a été réalisée en octobre 2016 avec le système ARP de Geocarta (passage tous les 6m). Les trois cartes de résistivités sont présentées dans la figure 4.

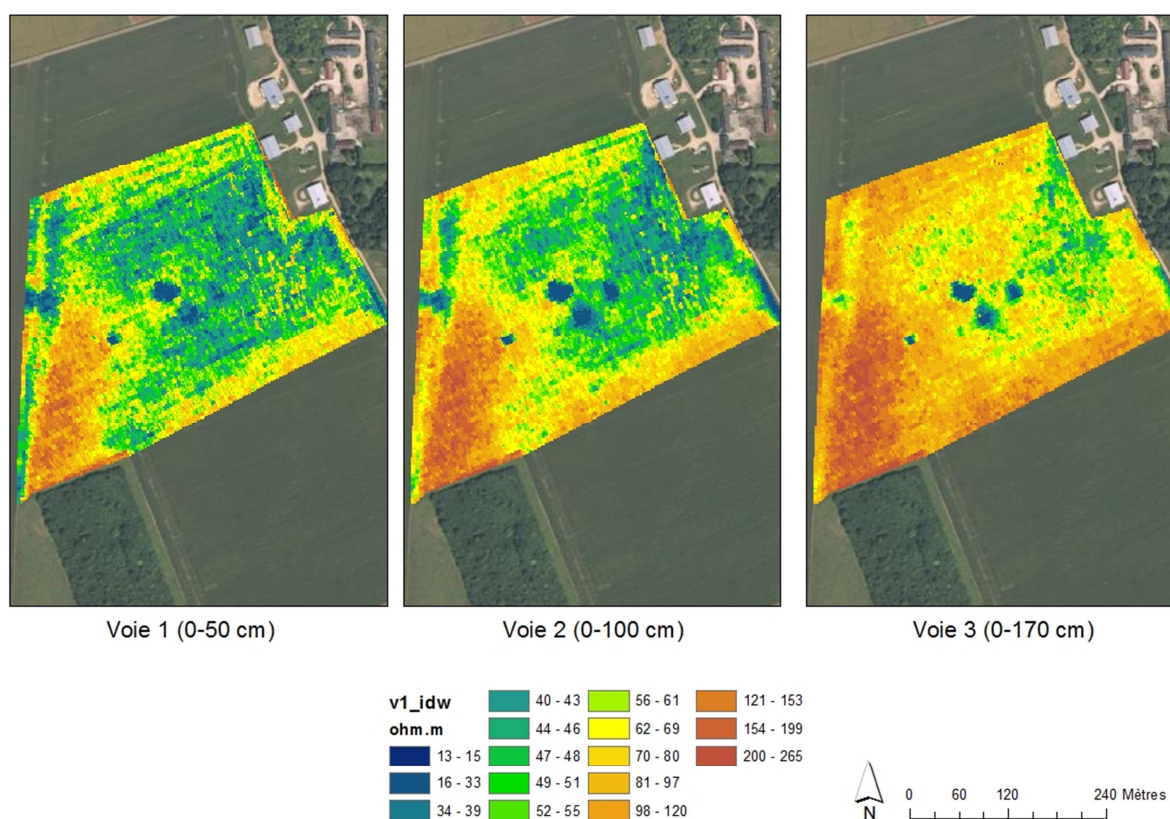


Figure 4 : Cartes de résistivité électrique de la parcelle agricole adjacente à la position des équipements de suivi

Ces cartes de résistivité électrique mettent en évidence que la zone est composée en majorité de sous-sols présentant des résistivités qui augmentent avec la profondeur d'investigation. Cela est cohérent avec ce que nous connaissons du sol : le calcaire sous-jacent au sol limono-argileux constitue un matériau plus résistant. La résistivité augmente toutefois de manière variable dans l'espace suggérant des variations de la profondeur d'apparition du matériau calcaire. Une zone plus résistante est observée au Sud-ouest de la parcelle correspondant a priori à des sols plus courts et plus caillouteux (zone connue par l'exploitant). Des zones de formes circulaires et conductrices apparaissent au milieu de la parcelle. La nature des sols ici présents n'a pas encore été identifiée. L'ouest de la parcelle est marqué par l'existence d'une ancienne haie qui a été détruite.

Ces cartes de résistivité électrique serviront ultérieurement de guide pour la réalisation d'une carte des sols et d'une carte de zones homogènes de fonctionnement.

2.2.2. Caractérisation pédologique de la future zone instrumentée

Des cartes de résistivité électrique de résolution fine (passage de l'ARP tous les 1m) ont été réalisées en octobre 2016 au niveau de la future zone instrumentée. Les cartes ainsi produites sont présentées dans la figure 5.

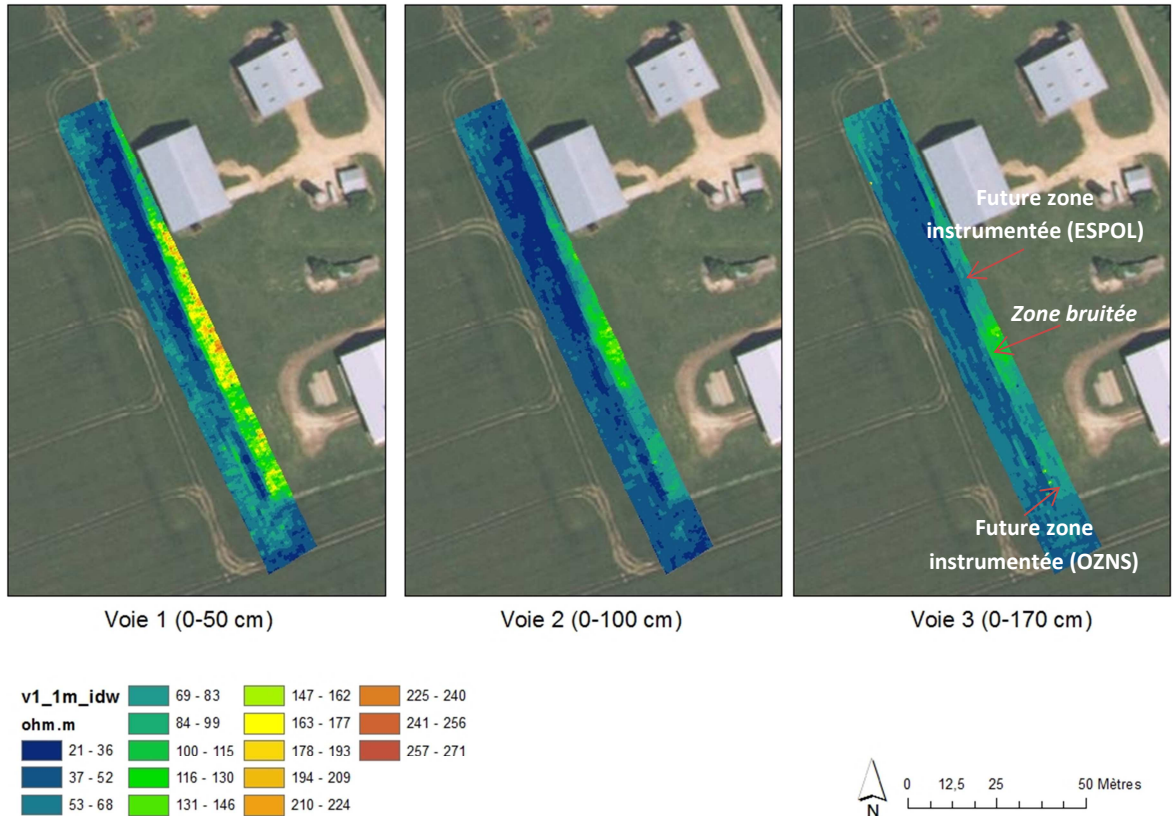


Figure 5 : Cartes de résistivité au niveau de la future zone instrumentée

Ces cartes de résistivité mettent en évidence une limite nette entre la parcelle cultivée et sa bordure historiquement enherbée et où sera implanté le dispositif de suivi. Cette cartographie a permis de sélectionner la position de notre futur site instrumenté en évitant des zones qui ont fortement influencées par des activités humaines, ce que l'on détecte par des mesures très bruitées.

En complément à cette cartographie électrique, des sondages pédologiques accompagnés de tomographies électriques en 2D ont été réalisés précisément sur la future zone instrumentée pour le projet O'ZNS (figure 6).

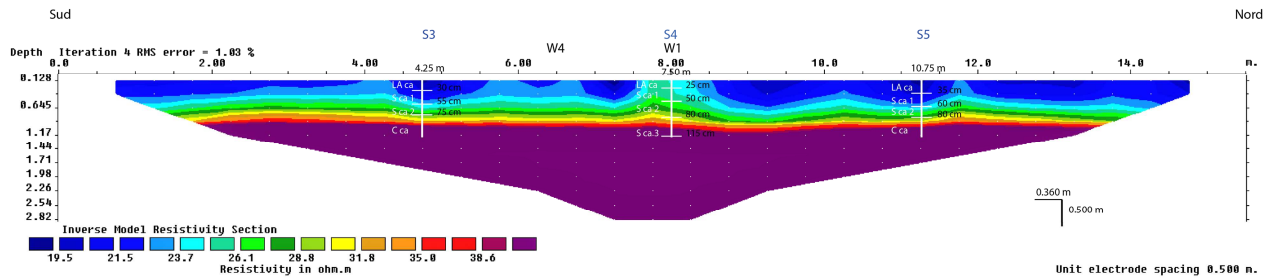


Figure 6 : Coupe en 2D par tomographie électrique du sous-sol au niveau de la future zone instrumentée pour le projet ESPOL et position des sondages pédologiques associés.

Les observations pédologiques et les mesures électriques sur cette zone mettent en évidence que les sols sont composés d'un horizon de surface limono-argileux surplombant un ou plusieurs horizons structuraux qui peuvent s'enrichir en argile avec la profondeur. Ces sols reposent sur un calcaire meuble. Les épaisseurs d'apparition des différents horizons et du matériau parental calcaire sont variables et ceci est confirmé par la coupe en 2D.

3. Caractérisation *in situ* du fonctionnement hydrique des sols

3.1. Instrumentation pour les suivis hydriques temporels des sols

3.1.1. Instrumentation du site de Limoron

Le suivi du fonctionnement du sol des 2 stations du site de Limoron a été réalisé pendant deux années culturales consécutives : 2014-2015 et 2015-2016. La parcelle était cultivée en blé ces deux années.

Suivi de la teneur en eau (Station 1 et Station 2)

La teneur en eau volumique des deux stations a été mesurée par des capteurs réflectomètres (CS616 Campbell Scientific). Les sondes ont été installées dans les différents horizons identifiés lors des descriptions pédologiques (figure 7). Pour la station 1 nous avons réalisé un suivi supplémentaire au niveau d'une placette de sol nu pendant la saison 2014-2015.

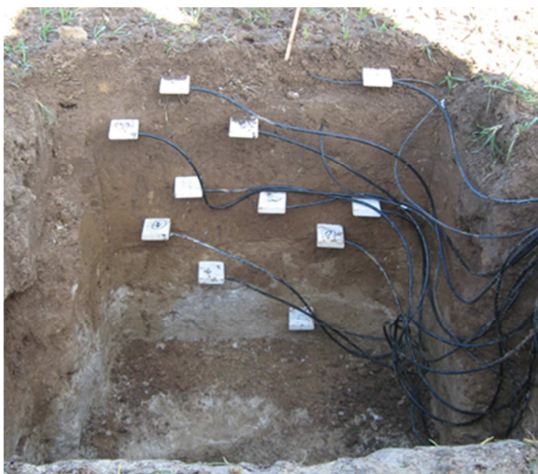


Figure 7 : Installation des capteurs réflectomètres pour le suivi de la teneur en eau volumique des horizons de la Station 1

Une mesure toutes les deux heures a été enregistrée par une centrale d'acquisition (Campbell). A plusieurs dates au cours du suivi expérimental, des mesures directes de la teneur en eau massique du sol par la méthode gravimétrique ont été réalisées de manière à vérifier les mesures réalisées par les sondes.

Suivi par tomographie électrique 2D (Station 1)

Pour l'année culturale 2014-2015, nous avons suivi au niveau de la station 1 le fonctionnement du sol par imagerie électrique grâce à la technique de tomographie. Le suivi a été réalisé sur une zone d'étude de 10m x 15m constituée de deux placettes juxtaposées, l'une étant cultivée (blé) et l'autre étant en sol nu. A cheval sur ces deux modalités, 14 images de résistivité électrique de 7,20 m de long et environ 1 m de profondeur ont été réalisées entre le 26 mars 2015 et le 7 juillet 2015. Les tomographies électriques 2D ont été conduites en mode Wenner alpha avec 72 électrodes espacées de 10 cm. Les mesures ont été réalisées avec un résistivimètre Syscal Pro (Iris Instruments).

3.1.2. Installation d'un observatoire géophysique sur le site des Hôtels

Sur la zone identifiée en bordure de parcelle sur le site des Hôtels, nous avons installé un dispositif de suivi de diagraphie électrique (figure 8). Commercialisé par la société Imageau, ce dispositif appelé SMD est un observatoire en forage permettant une surveillance en continu et en temps réel de la résistivité électrique et de la température du sous-sol. La mesure de la résistivité électrique est réalisée à l'aide d'électrodes annulaires disposées le long d'un tube PVD et reliées à un système autonome d'injection et de mesure du courant électrique. Le tube PVC est également équipé de sondes pour la mesure de la température de type PT100. La taille du dispositif et sa résolution en font un prototype spécifique, construit par la société Imageau sur la base d'un cahier des charges que nous avons défini.



Figure 8 : Photographie du dispositif géophysique en forage : à gauche tube équipé des électrodes et des sondes de température avant installation, à droite : dispositif après installation avec sa station de pilotage autonome

Le dispositif que nous avons acquis mesure 3,4 m de profondeur permettant de suivre le fonctionnement du sol et de la partie supérieure de la Zone Non Saturée (ZNS). Il est composé de 24 niveaux de mesure pour la résistivité électrique et de 7 niveaux de mesure pour la température du sol. Lors de la prise de mesure, les électrodes sont interrogées successivement selon une configuration Wenner. Une séquence interroge tous les niveaux et dure moins de 5 minutes, permettant une image quasi-instantanée. Le système réalise, en autonomie, 2 à 4 enregistrements par jour.

Ce dispositif a été installé en avril 2017 et a vocation à rester en place durant plusieurs années. Nous espérons, par ce système, pouvoir identifier des périodes de fonctionnement hydrique atypique et

notamment des échanges ascendants d'eau entre le haut de la ZNS et le sol (remontées capillaires) en périodes sèches.

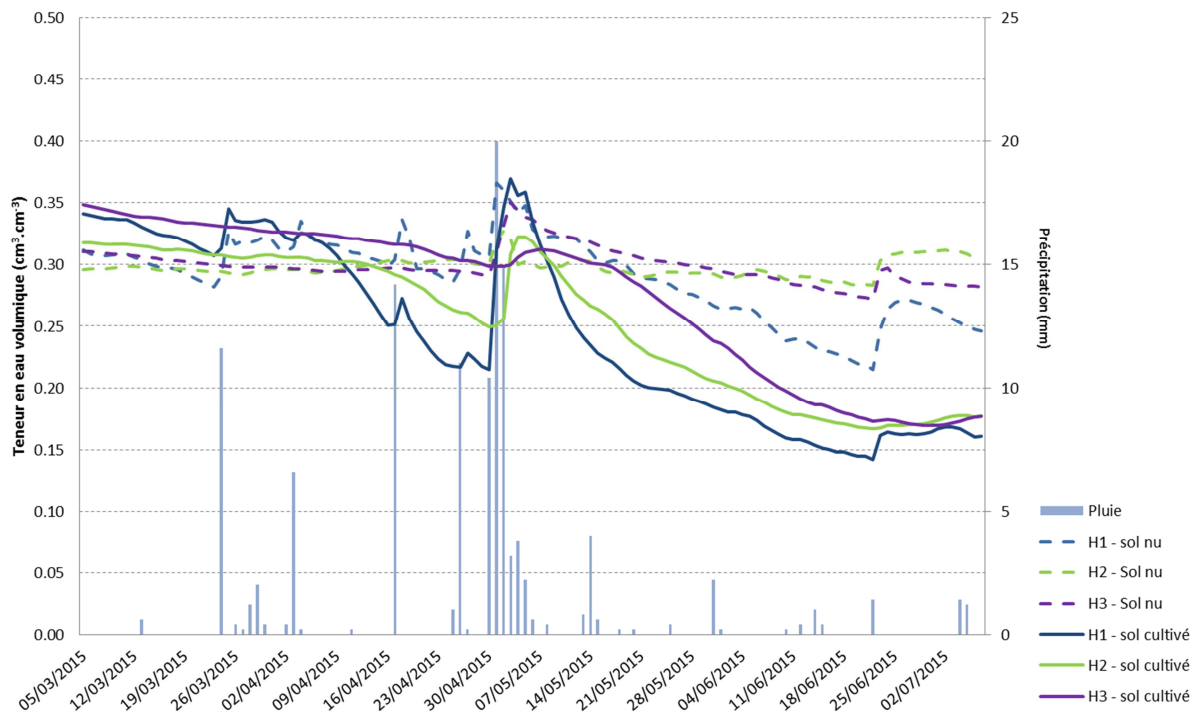
Remarque : les deux sites « Limoron » et « Les hôtels » ont des dispositifs de suivi différents, et les expérimentations mises en place chaque année ont des objectifs différents. Nous présentons donc par la suite les résultats par site et par année.

3.2. Caractérisation du fonctionnement hydrique des sols lors de la saison 2014-2015

En 2014-2015, l'objectif du suivi est de qualifier des zones en sol nu et des zones en sol cultivé pour identifier éventuellement des remontées capillaires et discuter de leurs conditions d'occurrence. Les suivis concernent deux sites de la parcelle de Limoron, l'un en sol « long », l'autre en sol « court » (Camuel, 2015).

3.2.1. Suivi de la teneur en eau des sols par des mesures ponctuelles

Les résultats de suivi de la teneur en eau volumique du sol sont présentés dans les graphiques de la figure 9. Chaque courbe représente une moyenne journalière par horizon.



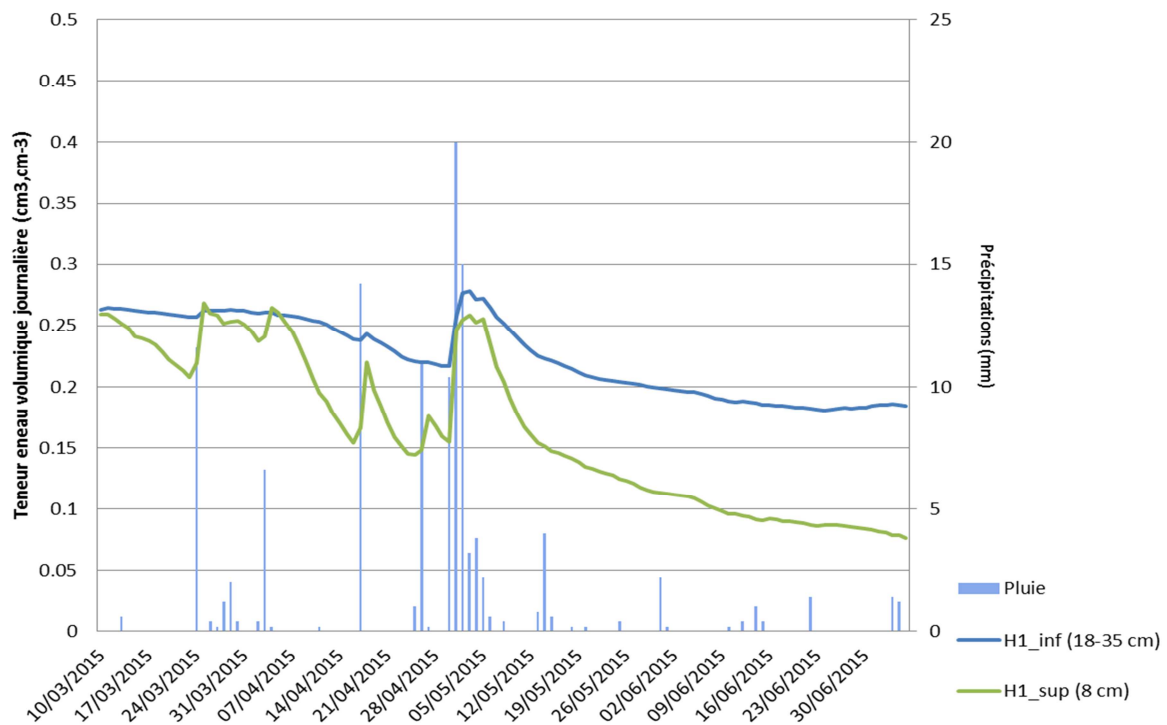


Figure 9 : Evolution de la teneur en eau volumique moyenne des horizons au cours de la période mars-juillet 2015 avec représentation des événements pluvieux pour les stations 1 (en haut, sol nu et sol cultivé) et station 2 (en bas)

Entre mars 2015 et en juillet 2015, la teneur en eau diminue dans tous les horizons, en lien avec la croissance de la culture. Dans cette évolution, on observe une augmentation importante début mai, due à de fortes précipitations. Sur la période de mi-mai à la récolte, la diminution est importante en lien avec la demande accrue en eau des plantes pour leur croissance et de faibles précipitations (0-0.2 mm). Les teneurs en eau mesurées dans les horizons de surface ont de plus fortes amplitudes, quelle que soit la station et la modalité de culture du sol. En dehors d'événements ponctuels, la teneur en eau à des profondeurs comprises entre 20 et 24 cm, est supérieure à la teneur en eau à 5 cm, et l'écart s'accroît avec le temps. Elle suit la même dynamique que la teneur en eau à 5 cm mais varie moins fortement. Les teneurs en eau aux profondeurs plus importantes suivent la même dynamique que les teneurs en eau de surface, mais de façon plus atténuée.

Effet culture/sol nu

L'effet des modalités sol nu/ sol cultivé sur les dynamiques de teneur en eau est bien visible pour la station 1 : les teneurs en eau du sol nu sont en général supérieures à celles du sol cultivé. On observe notamment qu'après ré humectation du sol, le sol nu se dessèche beaucoup moins vite que le sol cultivé : d'une part, la transpiration accélère le dessèchement, d'autre part, le sol présente souvent en surface une très fine couche qui limite les flux évaporatoires.

Effet type de sol

L'évolution, au cours du temps, de la teneur en eau suit la même progression relative dans les deux stations. Cependant, on observe que les teneurs en eau mesurées au niveau de la station 2 présentent des valeurs en moyenne plus faibles que celles mesurées au niveau de la station 1. Ceci

est lié au fait que le sol est plus court au niveau de la station 2 et composé d'une fraction en éléments grossiers importante (28%)

A la fin de la période de mesure, pour la station 2, à partir du 25 juin, on observe une légère augmentation de la teneur en eau dans la partie inférieure de l'horizon 1 alors que dans la partie supérieure de l'horizon on n'observe pas cette augmentation. On peut émettre l'hypothèse que l'eau qui alimente ces horizons provient du bas du profil, et remonte par un processus de remontées capillaires.

3.2.2. Suivi du fonctionnement thermo-hydrrique des sols par tomographie de résistivité électrique (Station 1)

La figure 10 présente 5 imageries de la résistivité électrique du sol extraites du suivi temporel sur la station 1.

On observe qu'à la première mesure, les résistivités augmentent globalement avec la profondeur avec une couche relativement peu résistive (10 à 35 $\Omega.m$) en surface (0 à 55cm) et une couche plus résistante (35 à 60 $\Omega.m$) à partir de 55 cm, correspondant à la profondeur d'apparition du calcaire cryoturbé.

Les deux modalités de traitement (sol nu et sol cultivé) se différencient de façon nette. Pour la zone concernée par la culture de blé, on observe dès le début de l'expérimentation des résistivités en moyenne plus élevées en toute proche surface du sol et cette différenciation s'accroît nettement à partir du 12 mai avec l'apparition de résistivités très élevées (très souvent supérieures à 100 $\Omega.m$) sur toute la hauteur du profil, masquant le contraste entre le sol et le calcaire cryoturbé observé en début d'expérimentation et semblant influencer la résistivité de la zone en sol nu. En sol nu, la résistivité est plus faible dès le début de l'expérience pour les premiers centimètres et une couche conductrice (10 à 20 $\Omega.m$) située entre 10 et 30 cm de profondeur persiste sur toute la durée de l'expérimentation.

3.3. Caractérisation du fonctionnement hydrique des sols lors de la saison 2015-2016

En 2015-2015, l'objectif du suivi est de caractériser le fonctionnement hydrique du sol en situation de sol cultivé. Ces suivis concernent la parcelle de Limoron sur la station en « sol long » et sur la station en « sol court ».

La figure 11 présente les teneurs en eau mesurées en 2016 au niveau des deux stations du site de Limoron.

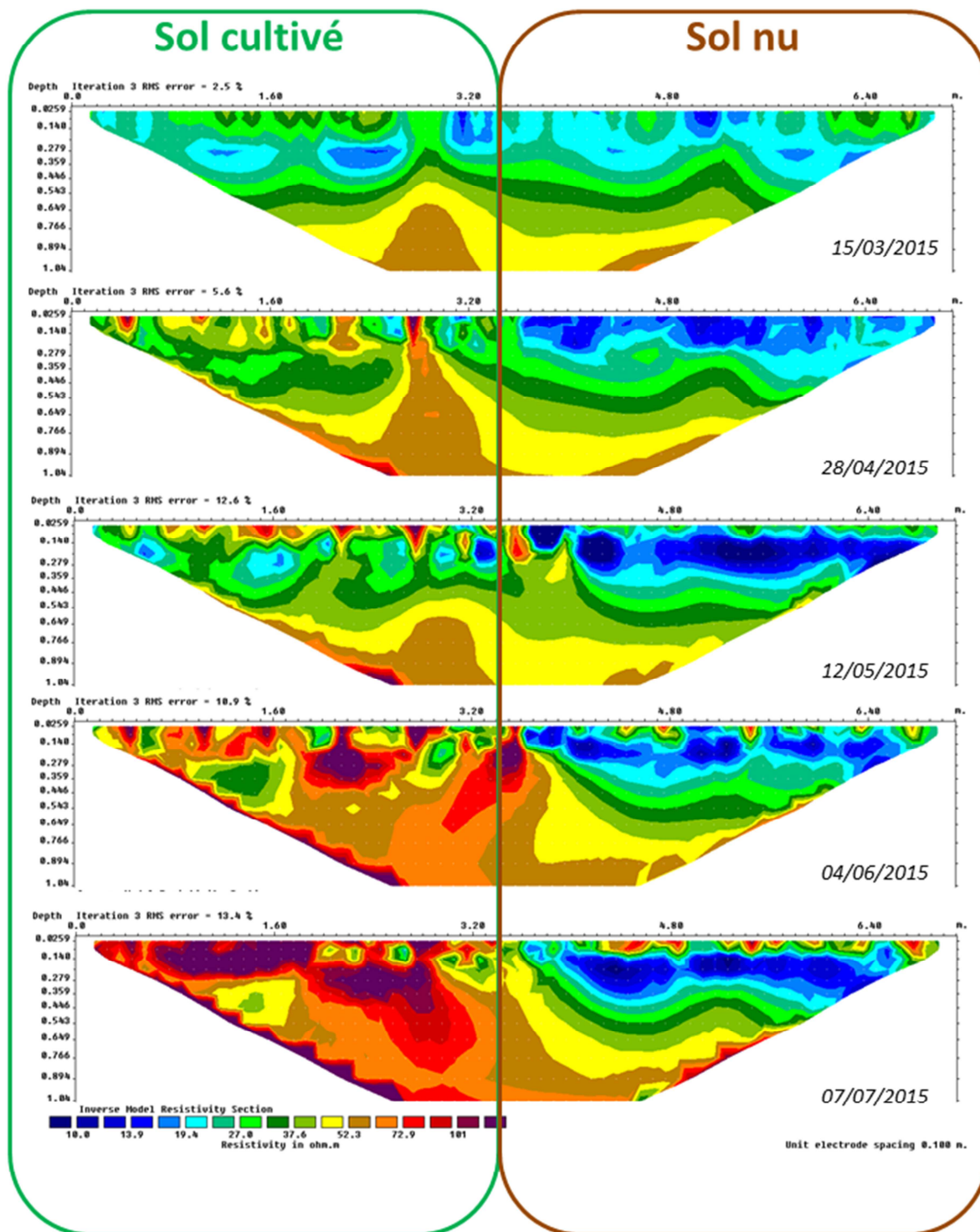


Figure 10 : Extrait de la chronique d'imagerie de résistivité électrique sur la Station 1 du site Limoron et sur 2 modalités de culture (sol cultivé et sol nu)

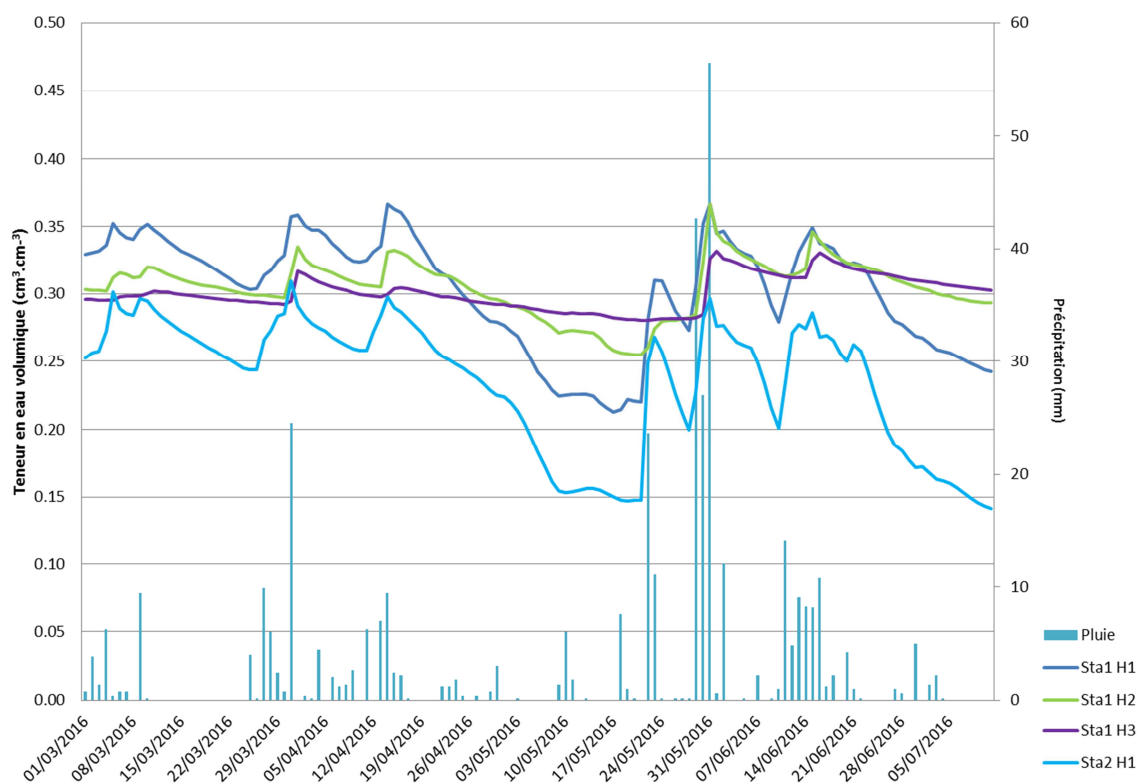


Figure 11 : Evolution de la teneur en eau volumique mesurée sur les stations 1 et 2 du site de Limoron pour la saison 2015-2016 et précipitations. Source des données météo : Météo France, station Bricy (45)

Le climat du printemps 2016 a été particulier pour le Loiret qui a subi des précipitations plus importantes que les autres années. Un événement particulier est à noter fin mai avec un cumul de 140 mm d'eau entre le 28 mai et le 5 juin. La conséquence de ces fortes précipitations sur les sols est que les teneurs en eau n'ont pas diminué autant qu'au cours des années précédentes dans la normale saisonnière. Comme pour la saison 2015, les amplitudes sont plus fortes dans les horizons de surface, quel que soit le type de sol.

Effet type de sol

Les teneurs en eau mesurées dans l'horizon 1 de la station 2 sont systématiquement plus faibles (environ 8 points de différence) que celles mesurées sans l'horizon 1 de la station 1. En revanche, la dynamique relative est identique entre ces deux horizons. Même si l'on peut faire l'hypothèse que les teneurs en eau du sol de la station 2 sont plus faibles du fait de la forte charge en éléments grossiers, la différence avec la station 1 reste tout de même surprenante, d'autant plus que nous sommes dans des conditions humides. Nous attribuons cette différence également à des **effets instrumentaux**. En effet, l'utilisation des sondes en milieu caillouteux est difficile pour plusieurs raisons :

- L'installation nécessite d'éviter les éléments grossiers
- La mesure est bruitée par la présence des éléments grossiers
- Il est difficile de faire une mesure de la masse volumique du sol qui sert de paramètre de correction aux mesures réalisées par ce type de capteurs. Ces données n'ont donc pas été corrigées.

3.4. Saison 2016-2017 : Premières chroniques temporelles de l'observatoire géophysique

3.3.1. Chronique de résistivité électrique

La figure 12 représente une sortie directe des mesures réalisées depuis le 20 avril 2017 par le dispositif géophysique de mesure de la résistivité en continu et en forage (SMD). Il s'agit de représentations interpolées entre les différents niveaux de mesure et de date à date.

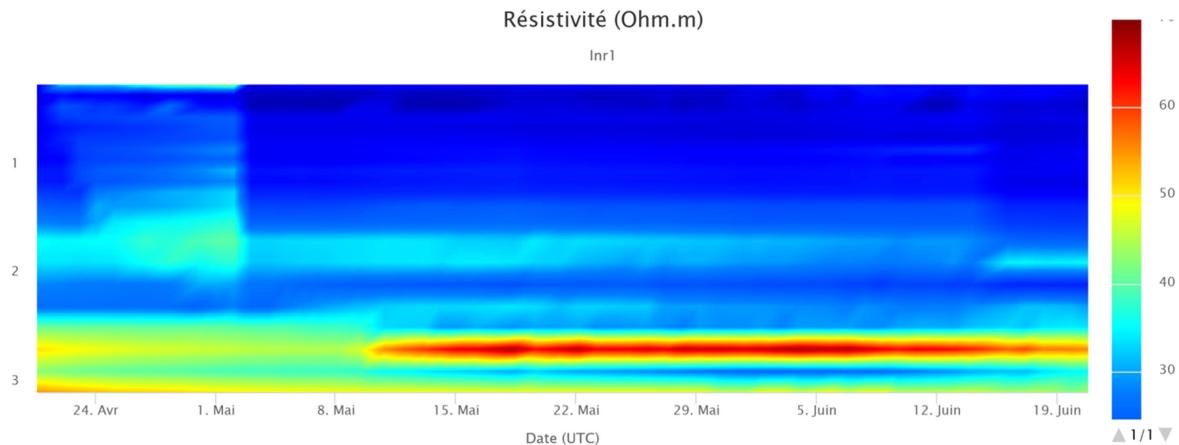


Figure 12 : Chronogramme en 2D de la résistivité électrique mesurée par le système de diaggraphie en forge depuis son installation

Les résistivités mesurées par le SMD depuis le début de l'installation observables sont comprises entre 10 et 70 Ω m et sont structurés verticalement comme suit :

- Des résistivités comprises entre 10 et 35 ohm.m dans la couche de 0 à 2,50 m. Ces valeurs de résistivités sont cohérentes avec les valeurs mesurées par tomographie électrique (figure 6).
- Des résistivités comprises entre 40 et 70 ohm.m au-delà de 2,50 m. Dans cette couche de 2,50m à 3,40m, on observe une couche moins résistante à un peu moins de 3m, intercalée entre deux couches plus résistantes. Il est probable que cette couche plus conductrice corresponde à un niveau de marne brune comme cela a été observé sur des forages géologiques à proximité de notre zone d'étude (forages réalisés dans le cadre de l'installation de la plateforme OZNS du projet PIVOTS).

L'évolution des mesures au cours du temps montrent des événements remarquables :

- Une première phase (avant le 02/05), qui correspond aux toutes premières mesures, juste après l'installation et l'apport de bentonite humide. Les résistivités en surface sont très faibles et ré-augmentent progressivement jusqu'au 26 avril.
- Le 2 mai, on observe une diminution nette de la résistivité dans la couche de 0 à 1 m (encadré rouge 2). Il s'agit de la deuxième injection de bentonite. Cet effet reste marqué dans le temps : les résistivités n'ont pas ré-augmenté depuis le 2 mai dans ce premier mètre. Cela est cohérent avec ce que nous avons observé sur le terrain : en effet, 2 semaines après ce 2^{ème} apport, la bentonite est encore très liquide avec un taux d'humidité supérieur à 200 % (mesures réalisées le 18 mai).
- A partir du 10 mai, on observe l'apparition de résistivités présentant une nette augmentation (30 à 70 ohm.m) à 2,5m de profondeur. Nous n'avons pas décelé de problème technique à ce niveau et nous supputons un phénomène lié au sol comme de la fracturation.

La figure 13 présente les résistivités moyennes journalières mesurées par les électrodes situées entre 0 et 1 m de profondeur depuis l'installation du dispositif. Le graphique représente également les pluies au cours de cette période.

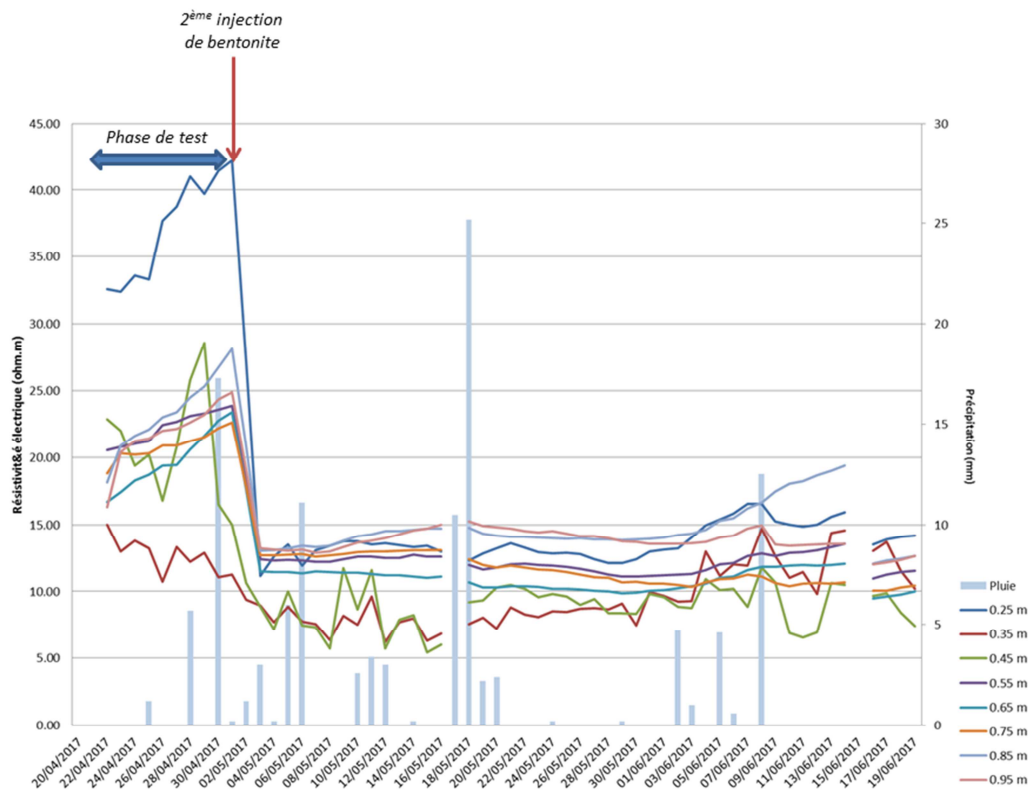


Figure 13 : Résistivité moyenne journalières mesurées par les électrodes dans le premier mètre de sol et précipitation (source des données : station météo France Bricy, 45)

Ces premières mesures de surface mettent en évidence plusieurs éléments :

- Il existe des périodes sans mesures, liées à des aléas techniques que la société ImagEau traite actuellement pour nous proposer des solutions techniques dans les meilleurs délais.
- Après la phase d'installation, la société ImagEau a réalisé des tests techniques, cette phase est un peu sensible à analyser.
- Le 02 mai, une deuxième coulée de bentonite a été réalisée pour combler le manque créé autour des électrodes de surface. Cette coulée a eu pour effet de diminuer nettement les résistivités. Cette diminution a un effet durable dans le temps, puisque la bentonite est restée longtemps très humide.
- Il n'est a priori pas encore évident de relier des variations de résistivité à des événements pluvieux. Cependant, les pluies analysées ne sont pas les pluies réelles enregistrées sur le site mais sont les pluies du site de Bricy, à plusieurs kilomètres de Villamblain.

Le dispositif étant fraîchement installé, nous sommes actuellement dans une phase d'analyse qui nécessite d'avoir plus de recul sur les données recueillies.

3.3.2. Chronique de température

La figure 14 présente les températures enregistrées en continu par le dispositif SMD.

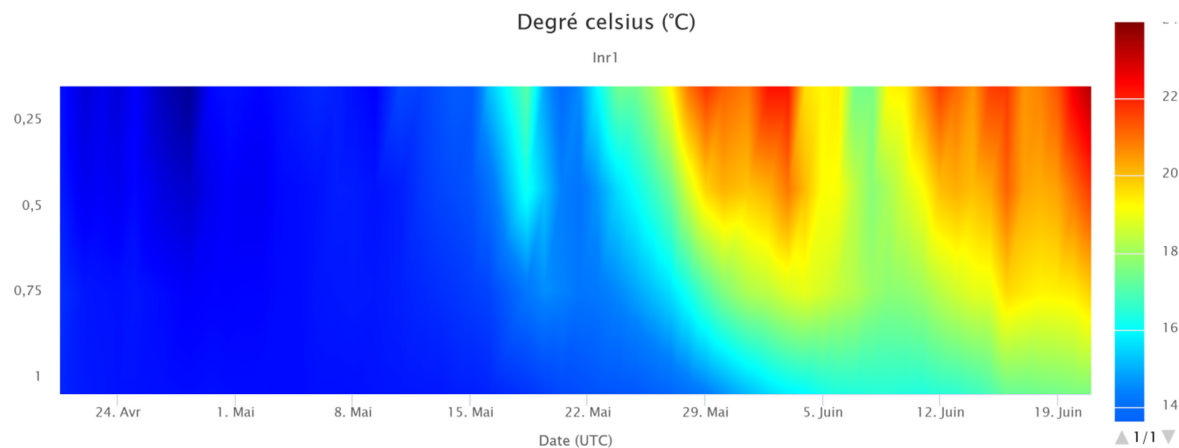


Figure 14 : Chronique de la température du sol de 0 à 1 m réalisée à partir des mesures des capteurs de température disposés le long du dispositif de mesure en forage

Les températures sont comprises entre 14 et 25°C. Les mesures dans la couche 0-1m présentent une variabilité plus importante que dans les valeurs mesurées au-delà de 1m (non présentées ici) ou les températures sont stables, autour de 11 °C. Cela est cohérent avec le fait que les couches superficielles du sol subissent davantage d'échanges thermiques avec l'atmosphère. Les températures augmentent progressivement depuis la surface, avec une période plus chaude à partir du 12 mai. Cette observation est cohérente avec les températures atmosphériques mesurées à la station météorologique de Bricy (météo-France), comme le montre le graphique de la figure 15.

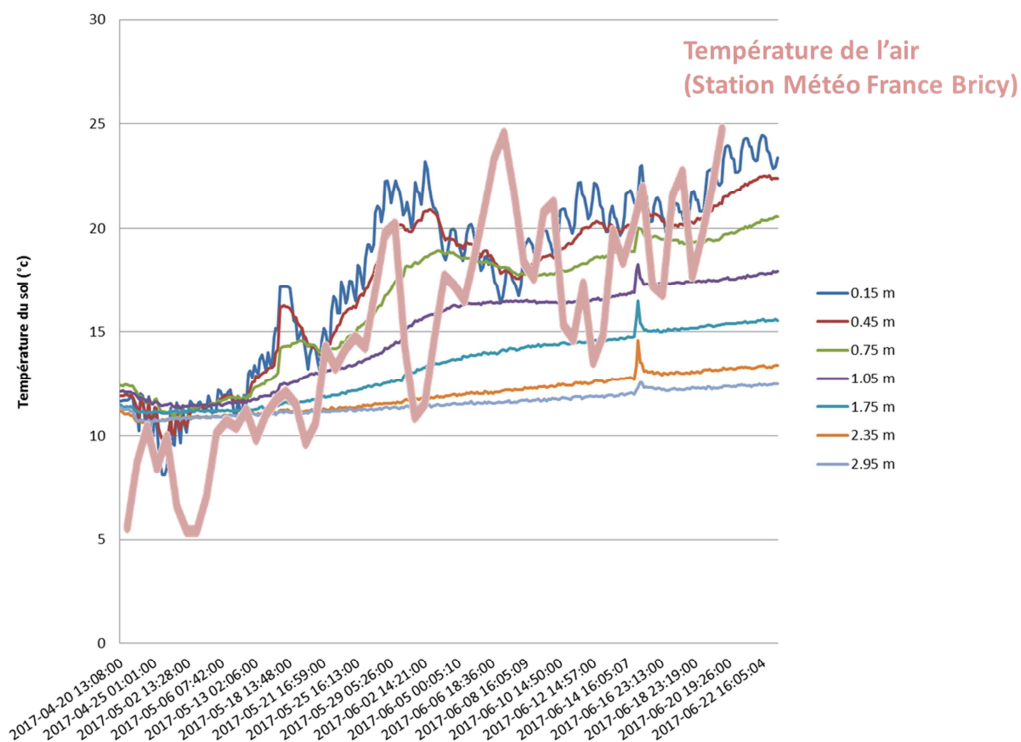


Figure 15 : Chronique de la température du sol à différentes profondeurs, réalisée à partir des mesures des capteurs de température disposés le long du dispositif de mesure en forage. Confrontation avec les données de température de l'air recueillies à la station de Bricy.

3.5. Synthèse sur les travaux expérimentaux

- Nous avons réalisé des suivis d'humidité et de température du sol à l'aide de capteurs au cours des années 2014-2015 et 2015-2016.
- Les données sur sol court de l'année 2014-2015 montrent une évolution de la teneur en eau du sol au cours de la période végétative qui pourrait être assimilée à des remontées capillaires.
- Un dispositif prototype de suivi en continu de la résistivité électrique du sol et de la température a été installé et est opérationnel depuis le printemps 2017. Il permet un suivi à haute résolution temporelle du fonctionnement thermo-hydrique du sol. Son extension verticale, jusqu'à 3,40 m, en fait un outil original de caractérisation du toit de la Zone Non Saturée.

4. Modélisation du fonctionnement hydrique des sols de Villamblain – Etude des transferts préférentiels et des remontées capillaires

Pour aller plus loin dans l'analyse des transferts préférentiels et des remontées capillaires sur les sites de la commune de Villamblain, nous avons conduit des travaux de modélisation, utilisant les données expérimentales recueillies sur les stations 1 et 2 du site de Limoron pendant le projet et présentées au paragraphe précédent.

4.1. Présentation du modèle

4.1.1. Cadre général

Nous avons utilisé le modèle STICS, modèle générique de simulation des cultures, de teneur en eau et d'azote minéral et organique, développé à l'INRA (Brisson et al., 1998). Ce modèle est caractérisé par sa facilité d'accès aux paramètres et variables d'entrée, sa facilité d'adaptation à divers types de plantes, sa robustesse et sa souplesse d'évolution. C'est un modèle dynamique, à pas de temps journalier, qui simule le comportement du système sol-culture au cours d'une ou plusieurs années.

Le modèle STICS simule la teneur en eau du sol, le bilan d'azote, le bilan carbone, les variables environnementales (infiltration et lessivage de nitrates) et les variables agricoles (rendement, consommation d'intrants).

4.1.2. Description des processus hydriques dans le modèle STICS

Dans le modèle, le fonctionnement hydrique du sol est représenté par un formalisme de bilan hydrique (Figure 16, d'après (Lefebvre, 2010)). Chaque horizon de sol est caractérisé par sa « teneur en eau à la capacité au champ » et sa « teneur en eau au point de flétrissement », deux paramètres qui permettent d'évaluer sa Réserve Utile. Il est discrétisé en couches de 1 cm. L'eau qui arrive à la surface du sol bascule d'une couche à l'autre lorsque la teneur en eau dépasse la teneur en eau à la capacité au champ. La limite supérieure du système est l'atmosphère, caractérisée par les variables climatiques standards (rayonnement, températures minimale et maximale, pluie, évapotranspiration

de référence ou éventuellement vent et humidité) et la limite inférieure correspond à l'interface sol/sous-sol.

Des formalismes spécifiques permettent de s'approcher au plus près du fonctionnement réel du sol :

- Quatre compartiments permettent la description des transferts d'eau dans le sol dans le modèle STICS : la **microporosité** (dont les caractéristiques hydriques permettent le calcul du bilan hydrique), la **macroporosité**, les cailloux et les fissures. Pour tenir compte de transferts entre couches qui auraient pour conséquence que la teneur en eau d'une couche dépasse la teneur en eau à la capacité au champ, on peut faire fonctionner le compartiment « macroporosité ». Celui-ci caractérisé par le paramètre « *infil* », qui indique la vitesse d'écoulement de l'eau dans la couche sous-jacente. C'est la modalité qui STICS qui permet de tenir compte des **écoulements préférentiels**.

- **Remontées capillaires** : Le modèle Stics permet de simuler les remontées capillaires. Ce processus est caractérisé par les deux paramètres « *capiljour* », qui indique le flux d'eau dirigé vers le haut et « *humcapil* », qui indique la teneur en eau gravimétrique du sol à partir de laquelle les remontées capillaires se produisent.

Remarque : le modèle, bien qu'étant un modèle 1D, permet de tenir compte des flux qui sortent du système par ruissellement. Dans notre étude, nous n'avons pas activé cette option car nous n'observons pas de ruissellement sur le terrain.

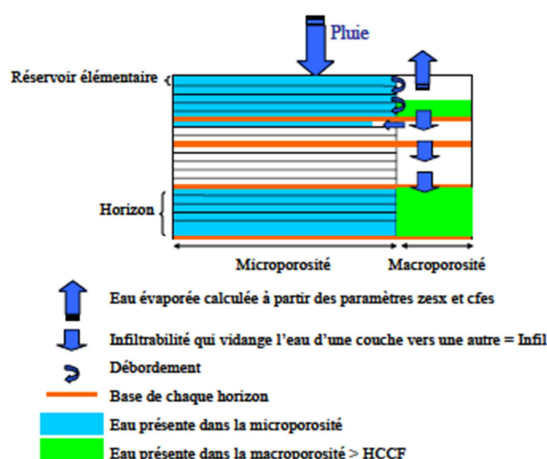


Figure 16 : Schéma du modèle de culture STICS.

4.1.3. Mise en œuvre de la simulation sur le site de Villamblain

Sur la base de nos résultats expérimentaux, nous avons choisi la saison 2014-2015, pour laquelle nous suspectons des réalimentations de la culture par les couches inférieures à la zone d'enracinement (remontées capillaires). La simulation commence ainsi le 01/10/2014 et se termine le 15/07/2015. Les dates-clé sont le semis, au 25/10/2015, et la récolte au 08/07/2015.

Les simulations sont réalisées sur les 2 stations analysées, l'une en sol long (site 1) et l'autre en sol court (site 2). Les profils de simulation, en cohérence avec les descriptions des profils de sol présentés à la figure 3, sont présentés sur la figure 17. Les tableaux 1 et 2 présentent les caractéristiques hydriques des différentes couches décrites dans le modèle. Leurs valeurs ont été déterminées à partir des mesures réalisées directement sur les sols étudiés, soit au cours de cette

étude, soit au cours d'études antérieures. Pour la station 2, on renseigne également la proportion d'éléments grossiers (type *Beauce Limestone 2* dans le modèle). Le tableau 4 présente les caractéristiques hydriques utilisées lorsque l'on active les options « macroporosité » ou « remontées capillaires » du modèle STICS. Les autres paramètres (paramètres du sol, de la culture et du climat) nécessaires au fonctionnement du modèle sont présentés à l'annexe 1.

La teneur en eau initiale est fixée à la teneur en eau à la capacité au champ, pour chaque horizon, à la date du 1er octobre 2014. La teneur en azote dans chaque horizon est renseignée à l'aide de valeurs mesurées à l'automne 2014.

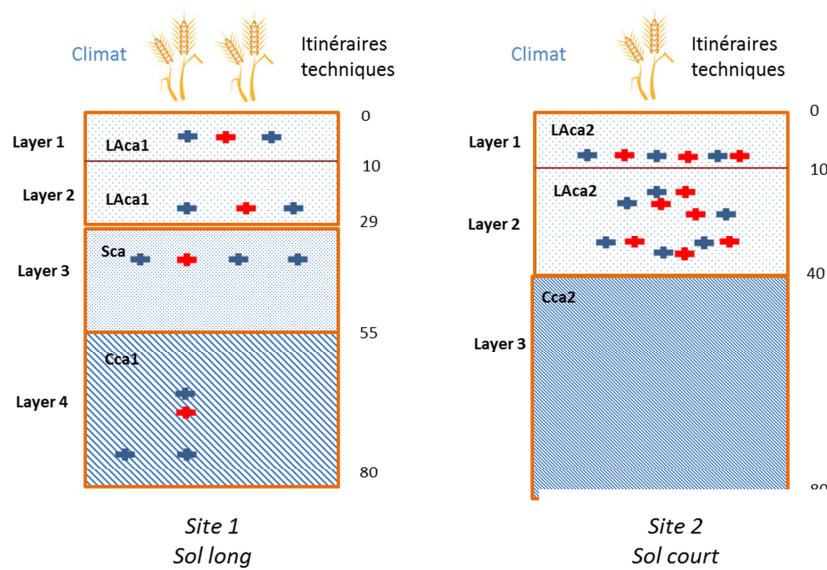


Figure 17 : Profils de simulation utilisés dans le modèle STICS. Les croix représentent la position des capteurs de teneurs en eau.

4.2. Modélisation simple du bilan hydrique

Dans cette modélisation, on ne tient pas compte d'un possible retard à l'infiltration d'eau d'une couche à l'autre, et on ne tient pas compte des remontées capillaires.

Pour les deux stations 1 et 2, la dynamique d'évolution de la teneur en eau simulée est comparable à celle de la teneur en eau mesurée (Figures 18 et 19, tableaux 4 et 5). La teneur en eau dans la première couche présente de fortes amplitudes. Elle diminue rapidement lorsqu'il ne pleut pas ; elle augmente quasi instantanément lorsqu'il y a une pluie. Dans les couches sous-jacentes, les teneurs en eau mesurée et simulée suivent la même dynamique que dans la couche de surface, mais avec des variations moins fortes.

Les valeurs simulées n'augmentent pas en fin de simulation, et l'on ne reproduit donc pas cette augmentation de la teneur en eau en fin de saison, que nous avons assimilée précédemment à l'effet des remontées capillaires (Ismail, 2016).

Enfin, la teneur en eau à la capacité au champ dans l'horizon de surface (LAc1) est fixée à 0,28 cm³.cm⁻³ (soit 0,23 g.100g⁻¹, cf tableau 2) ; la teneur en eau simulée ne peut donc jamais excéder cette valeur. Pourtant, à certaines dates, la teneur en eau mesurée est supérieure à 0,28 cm³.cm⁻³. Pour que les valeurs mesurées s'approchent au plus près des données mesurées, deux actions sont possibles : soit on change le paramétrage du modèle (mais il n'y a pas de raison de remettre en cause la mesure de la teneur en eau à la capacité au champ), soit on ajoute un processus qui permet que la teneur en eau dans un horizon excède la teneur en eau à la capacité au champ. Nous proposons de tester cette deuxième option en activant la fonction « macroporosité » de STICS.

Tableau 1 : Caractéristiques hydriques des couches de simulation pour le profil de simulation de la station 1

Nom de l'horizon pédologique	Position dans le profil (cm) (2014-2015)	Couche (<i>layer</i>)	Epaisseur couche (<i>epc</i>) (cm)	Teneur en eau à la capacité au champ (<i>HCCF</i>) ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	Teneur en eau au point de flétrissement (<i>HMINF</i>) ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	Masse volumique (<i>DAF</i>) ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
LAc1	0-10	<i>layer 1</i>	10	23,1 ^(a)	16,4 ^(b)	1,2 ^(c)
LAc1	10-29	<i>layer 2</i>	19	23,1 ^(a)	16,4 ^(b)	1,47 ^(c)
Sca	29-55	<i>layer 3</i>	26	21,6 ^(a)	14,0 ^(b)	1,38 ^(c)
Cca1	55-80	<i>layer 4</i>	25	25,9 ^(d)	11,9 ^(d)	1,35 ^(c)

^(a) Teneur en eau mesurée en 2016 par H. Gaillard (UR SOLS, INRA, Orléans) sur des mottes de sol non déstructurées, après équilibre dans des presses à membrane de Richards à un potentiel hydrique de -100 hPa.

^(b) Teneur en eau mesurée en 2016 par H. Gaillard (UR SOLS, INRA, Orléans) sur des mottes de sol non déstructurées, après équilibre dans des presses à membrane de Richards à un potentiel hydrique de -15850 hPa.

^(c) Masse volumique de l'horizon, mesurée sur le terrain par la méthode du cylindre (cf. § 2.2.3).

^(d) Données de la thèse de D. Michot (Michot, 2003)

Tableau 2 : Caractéristiques hydriques des couches de simulation pour le profil de simulation de la station 2

Nom de l'horizon pédologique	Position dans le profil (cm) (2014-2015)	Couche (<i>layer</i>)	Epaisseur couche (<i>epc</i>) (cm)	Teneur en eau à la capacité au champ (<i>HCCF</i>) ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	Teneur en eau au point de flétrissement (<i>HMINF</i>) ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	Masse volumique (<i>DAF</i>) ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
LAc2	0-10	<i>layer 1</i>	10	27,73 ^(a)	20,66 ^(b)	0,96 ^(c)
LAc2	10-40	<i>layer 2</i>	30	27,73 ^(a)	20,66 ^(b)	0,96 ^(c)
Cca2	40-80	<i>layer 3</i>	40	6,2 ^(d)	5,10 ^(d)	2 ^(c)

^(a) Teneur en eau mesurée en 2016 par H. Gaillard (UR SOLS, INRA, Orléans) sur des mottes de sol non déstructurées, après équilibre dans des presses à membrane de Richards à un potentiel hydrique de -100 hPa.

^(b) Teneur en eau mesurée en 2016 par H. Gaillard (UR SOLS, INRA, Orléans) sur des mottes de sol non déstructurées, après équilibre dans des presses à membrane de Richards à un potentiel hydrique de -15850 hPa.

^(c) Masse volumique de l'horizon, mesurée sur le terrain par la méthode du densitomètre à membrane (cf. § 2.2.3)

^(d) Données issues de Coutadeur *et al.* (2000).

Tableau 3 : Caractéristiques des couches de simulation pour les modes « macroporosité » et « remontées capillaires »

Nom de l'horizon pédologique	Station	Mode MACROPOROSITE	Mode REMONTEES CAPILLAIRES	
		Vitesse d'infiltration (<i>infil</i>) ($\text{mm}\cdot\text{j}^{-1}$)	Humidité à partir de laquelle se produisent les remontées capillaires (<i>humcapil</i>) ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	Quantité d'eau apportée par les remontées capillaires (<i>capillj</i>) ($\text{mm}\cdot\text{j}^{-1}$)
LAc1	1	10 ^(a)	13 ^(b)	0,12 ^(c)
LAc2	2	10 ^(a)	5 ^(b)	0,1 ^(c)
Sca	1	50 ^(a)	13 ^(b)	0,12 ^(c)
Cca1	1	50 ^(a)	13 ^(b)	0,12 ^(c)
Cca2	2	50 ^(a)	5 ^(b)	0,1 ^(c)

^(a) Valeur déterminée par expertise. ^(b) Valeur déterminée à partir des données de teneur en eau mesurées sur le terrain. ^(c) Valeur déterminée par modélisation (cf. Annexe 2).

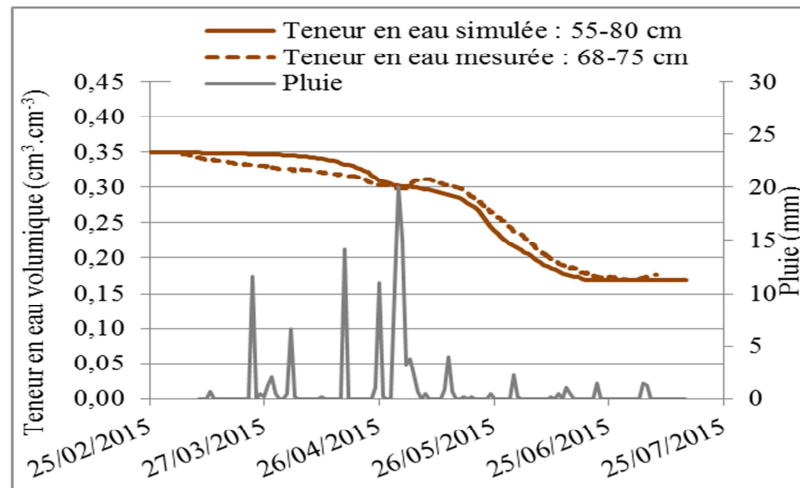
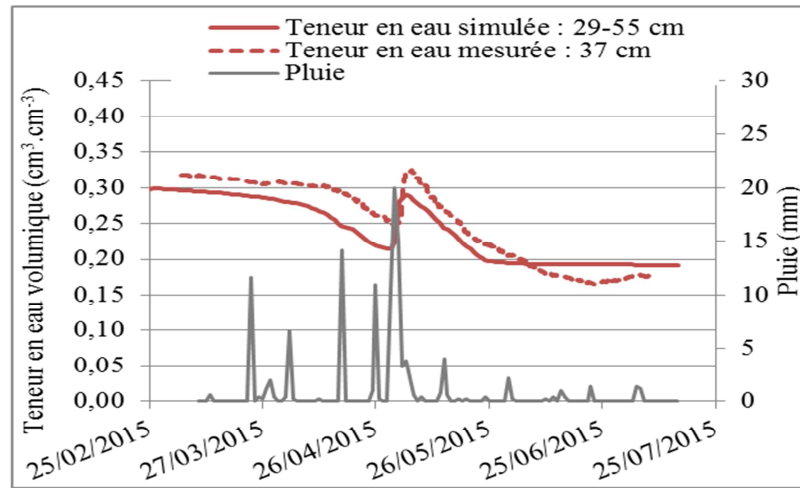
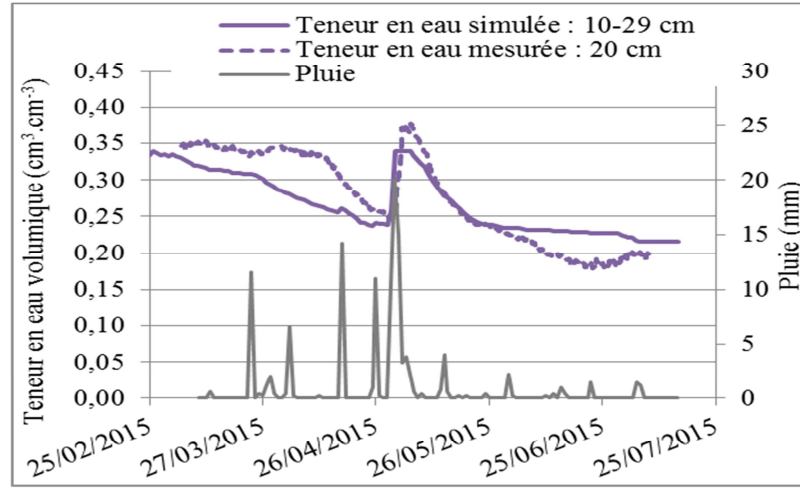
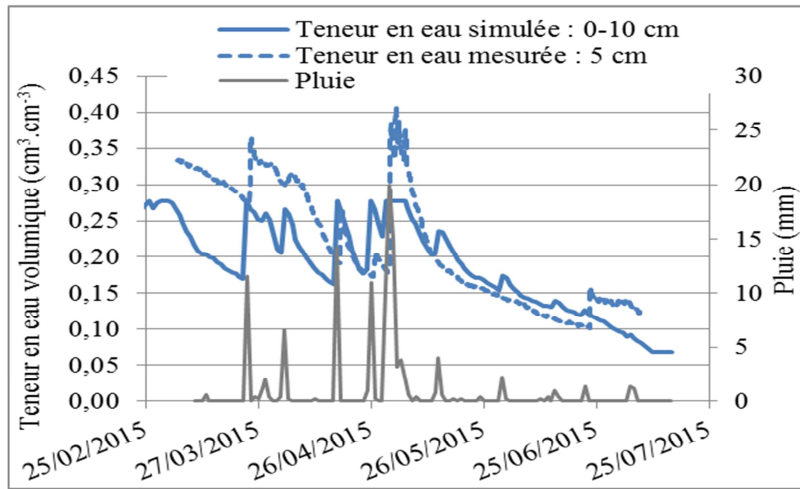


Figure 18 : Teneurs en eau simulées et mesurées à différentes profondeurs pour la station 1 du site de Limoron (mode de simulation : bilan hydrique simple)

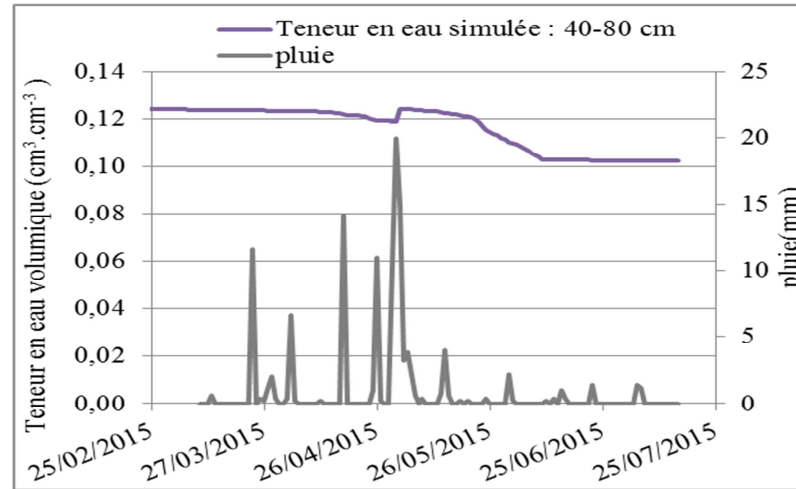
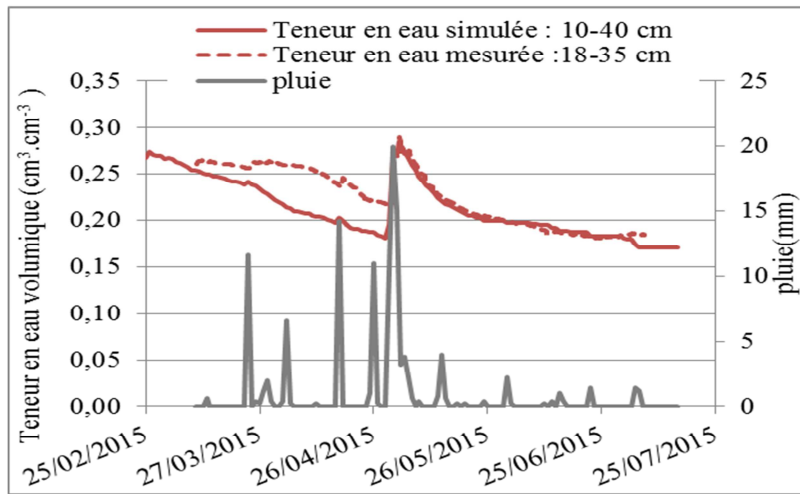
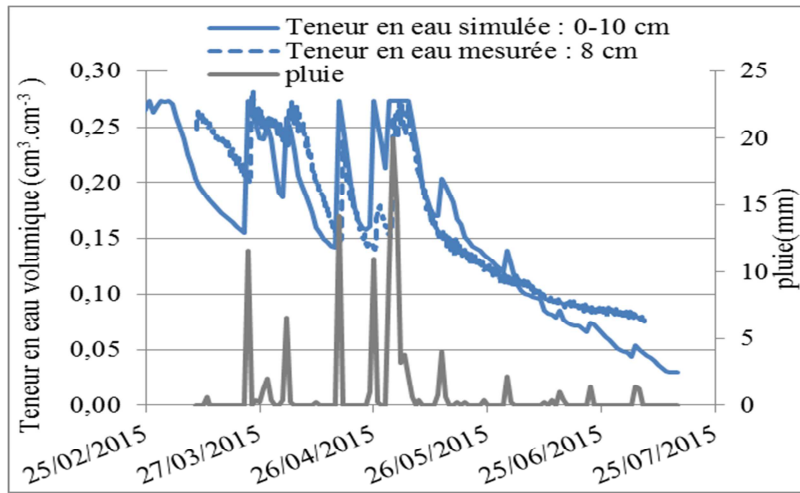


Figure 19 : Teneurs en eau simulées et mesurées à différentes profondeurs pour la station 2 du site de Limoron (mode de simulation : bilan hydrique simple)

Tableau 4 : Indicateurs statistiques d'évaluation des différents modes de simulation sur les différents horizons de la station 1. Calculs réalisés pour la période du 05/03/2015 au 07/07/2015.

Mode de simulation	cm ³ .cm ⁻³	Profondeur de la couche			
		0-10 cm	10-29 cm	29-55 cm	55-80 cm
Bilan hydrique simple	MEP	-0,026	-0,009	-0,014	0,001
	MEA	0,047	0,029	0,024	0,012
	RMSE	0,059	0,035	0,026	0,014
Bilan hydrique et macroporosité	MEP	-0,024	-0,009	-0,014	0,001
	MEA	0,046	0,030	0,023	0,012
	RMSE	0,058	0,035	0,025	0,013
Bilan hydrique avec macroporosité et remontées capillaires	MEP	-0,024	-0,009	-0,014	0,001
	MEA	0,046	0,030	0,023	0,012
	RMSE	0,058	0,035	0,025	0,013

Tableau 5 : Indicateurs statistiques d'évaluation des différents modes de simulation sur les différents horizons de la station 2. Calculs réalisés pour la période du 05/03/2015 au 07/07/2015.

Mode de simulation	cm ³ .cm ⁻³	Profondeur de la couche	
		0-10 cm	10-40 cm
Bilan hydrique simple	MEP	-0,004	-0.061
	MEA	0,029	0.062
	RMSE	0,037	0.075
Bilan hydrique et macroporosité	MEP	0,010	-0.058
	MEA	0,041	0,059
	RMSE	0,061	0,073
Bilan hydrique avec macroporosité et remontées capillaires	MEP	0,010	-0.058
	MEA	0,041	0.059
	RMSE	0,061	0,073

4.3. Simulation d'écoulements préférentiels

Dans cette configuration de modélisation, on tient compte d'un possible retard à l'infiltration d'eau d'une couche à l'autre pour essayer de corriger la teneur en eau dans l'horizon de surface, mais on ne tient pas compte des remontées capillaires. La simulation est réalisée pour les stations 1 et 2.

Quel que soit l'horizon de sol, on observe que la dynamique d'évolution de la teneur en eau simulée est identique à celle de la teneur en eau mesurée, avec des augmentations ou des diminutions de la teneur en eau aux mêmes périodes, comme en simulation de bilan hydrique simple (Figure 20, tableaux 5 et 6) : on observe une première période (février à début mai) où les teneurs en eau diminuent et durant laquelle les valeurs simulées suivent la même évolution que les teneurs en eau mesurées mais sont surestimées. Ceci est vrai pour les 3 premières couches, alors que l'inverse est observé dans la couche de calcaire cryoturbé. Ensuite, après la période d'augmentation importante de la teneur en eau dans le sol due à de fortes précipitations, on observe la tendance inverse : les valeurs simulées sont inférieures aux valeurs mesurées, sauf pour la dernière couche qui présente la tendance inverse. Au moment des fortes pluies de début mai, la teneur en eau simulée peut dépasser la teneur en eau à la capacité au champ, et la différence entre teneur en eau mesurée et teneur en eau simulée est plus faible que pour la simulation en mode de bilan hydrique simple. On note enfin que les valeurs simulées ne mettent pas en évidence la remontée des teneurs en eau en fin de saison comme cela a été observé sur les valeurs mesurées.

Ce protocole de simulation ne met donc pas en évidence de flux préférentiels dans la zone racinaire. Au contraire, de l'eau peut être stockée au-delà de l'état de capacité au champ, ce qui traduit un retard à l'infiltration.

4.4. Simulation des remontées capillaires

Dans ce troisième essai de modélisation, on tient compte à la fois d'un possible retard à l'infiltration d'eau d'une couche à l'autre et des remontées capillaires, que nous suspectons à partir du 23/06/2015, lorsque la culture est très active avec une demande évapotranspiratoire élevée concomitante d'une période de faibles précipitations. Pour paramétrer le modèle, nous avons fixé la valeur du paramètre *humcapil* à la teneur en eau mesurée dans l'horizon Cca à la date du 26/06/2015 (soit 13 g.g-1, cf. tableau 3). Pour la station 2, en l'absence de valeurs mesurées, nous avons fixé la valeur de *humcapil* à la teneur en eau simulée à la date du 01/07/2015 (soit 5 g.g-1, cf. tableau 3). Le calcul du paramètre *capilljour* est présenté à l'annexe 2.

Comme dans les cas précédents, on observe qu'à toutes les profondeurs et pour les deux stations, la dynamique d'évolution de la teneur en eau simulée est identique à celle de la teneur en eau mesurée (Figures 21 et 22 ; tableaux 5 et 6) : on observe des augmentations ou des diminutions aux mêmes périodes. Cependant, malgré nos efforts de paramétrisation, nous ne reproduisons pas les remontées de teneur en eau liées observées sur le terrain. On obtient les mêmes résultats qu'avec les simulations où l'on modélise simplement l'effet de la macroporosité sans remontée capillaire.

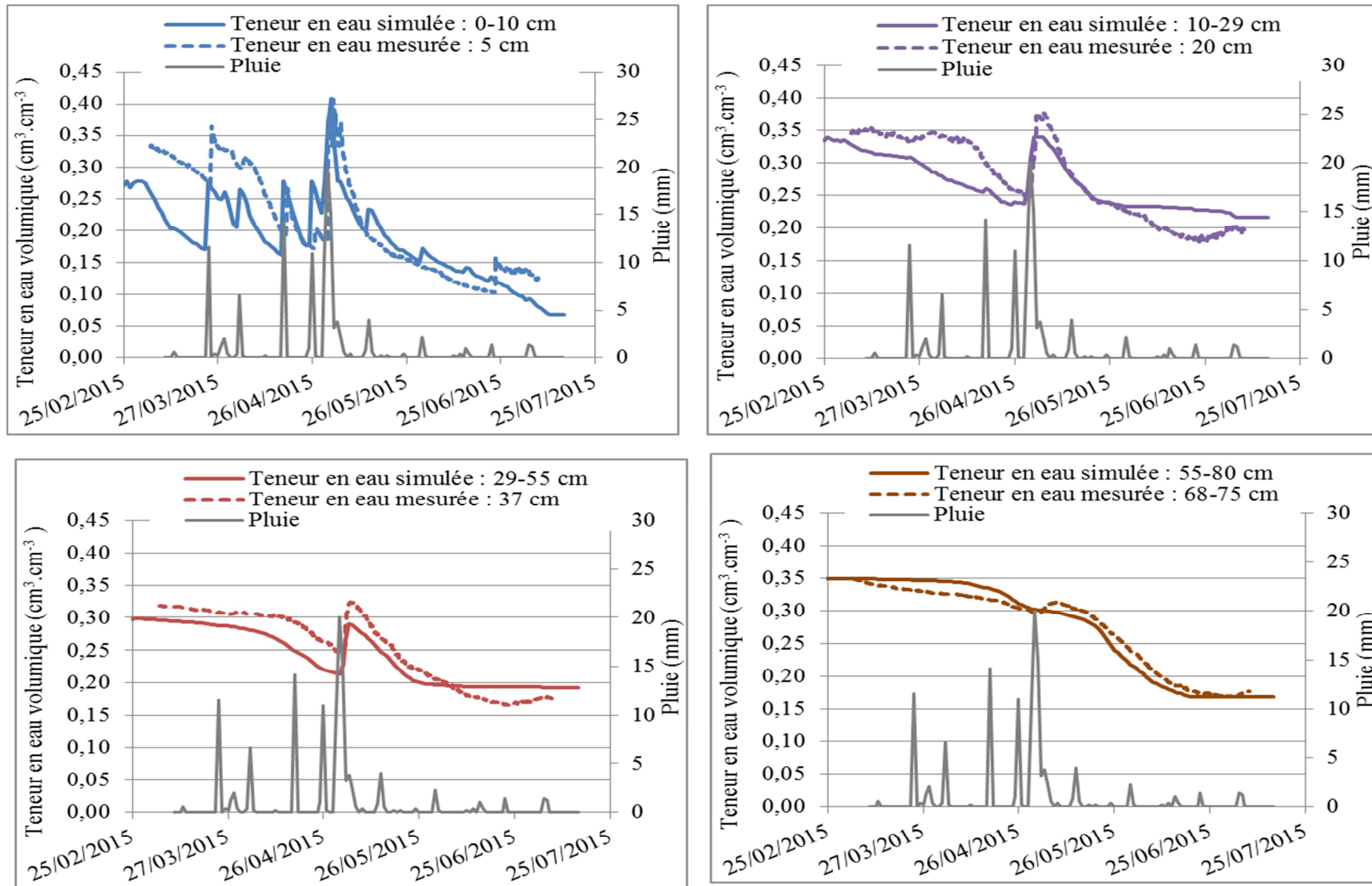


Figure 20 : Teneurs en eau mesurées et simulées à différentes profondeurs pour la station 1 (mode : bilan hydrique avec macroporosité)

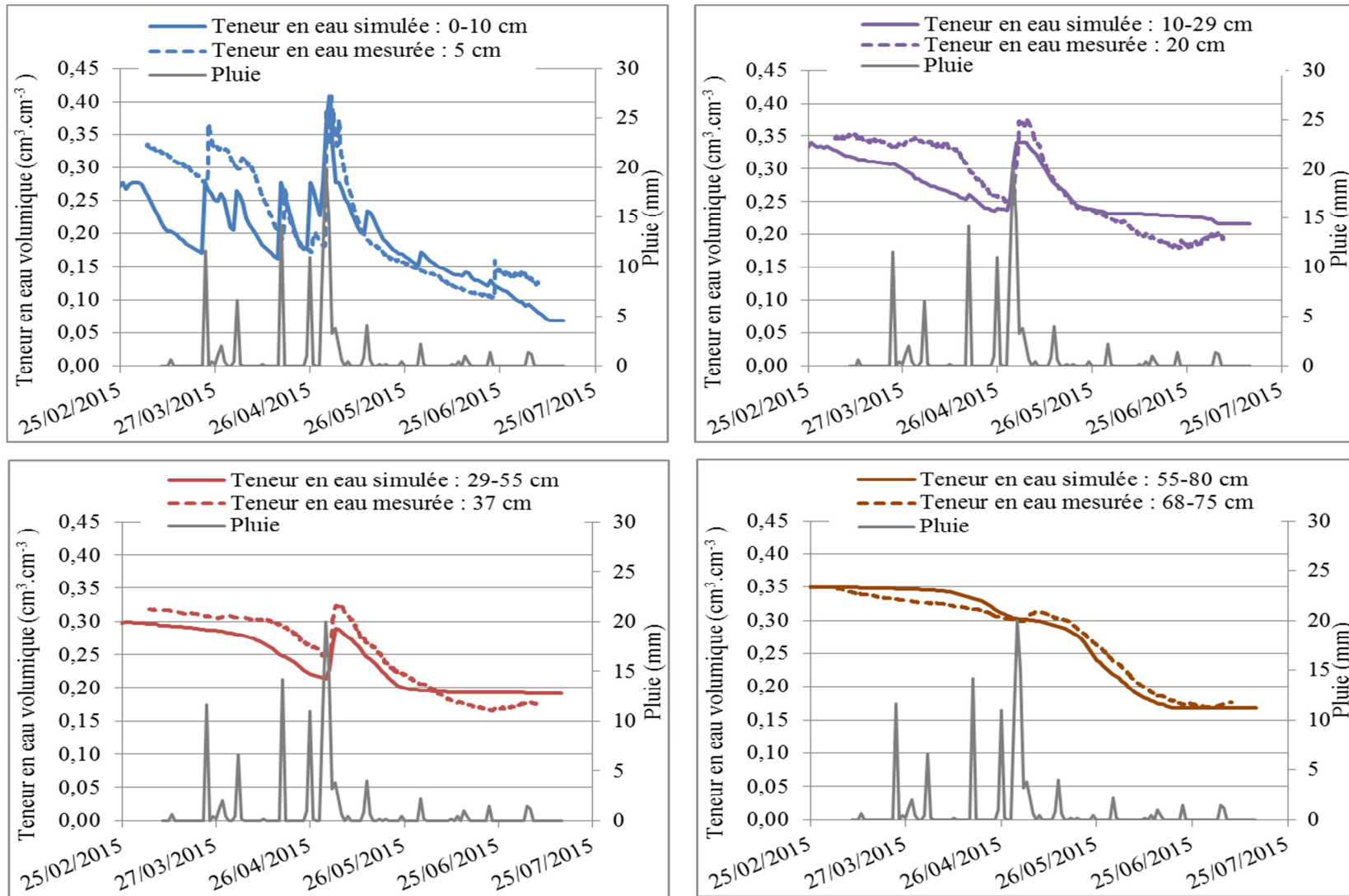


Figure 21 : Teneurs en eau mesurées et simulées à différentes profondeurs pour la station 1 (mode : bilan hydrique avec macroporosité et remontées capillaires)

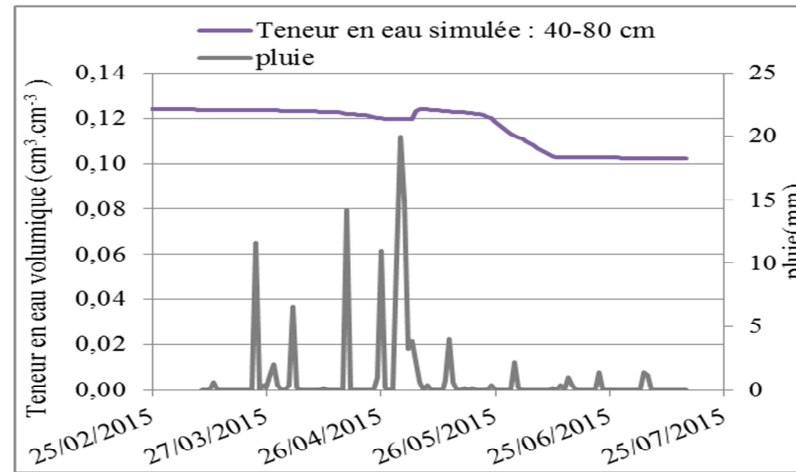
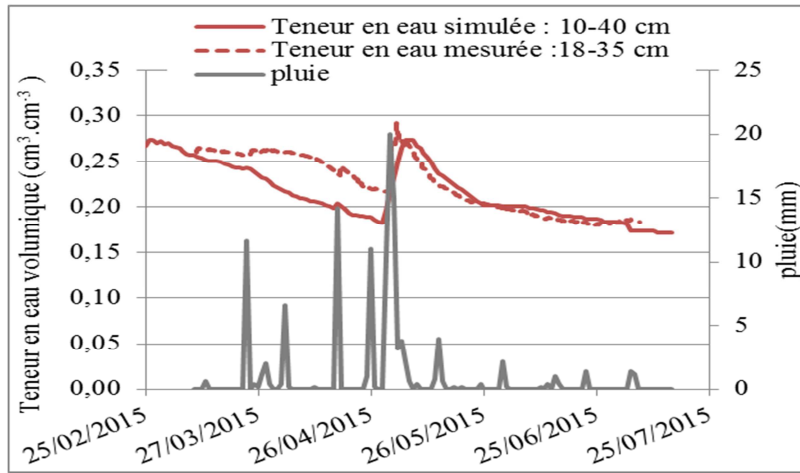
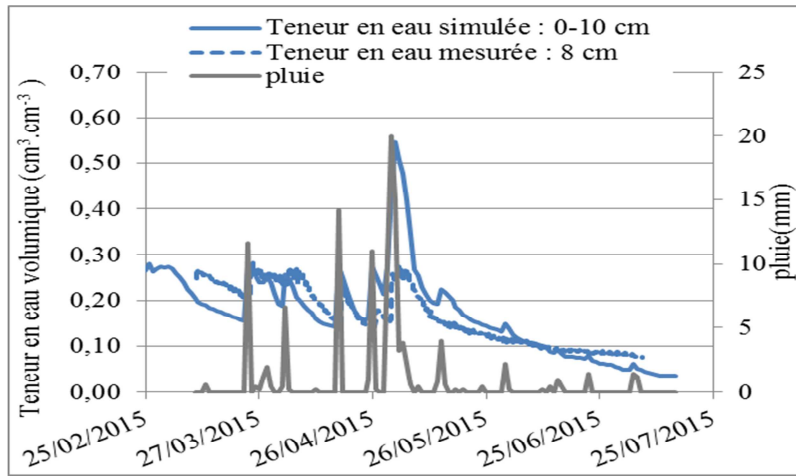


Figure 22 : Teneurs en eau mesurées et simulées à différentes profondeurs pour la station 2 (mode : bilan hydrique avec macroporosité et remontées capillaires)

4.5. Synthèse sur les travaux de modélisation

- Le modèle de bilan hydrique STICS a été utilisé pour modéliser le fonctionnement hydrique des stations du site de Limoron, avec les données expérimentales de l'année 2014-2015.
- Le modèle permet de reproduire la dynamique générale des teneurs en eau du modèle.
- La modélisation ne permet pas de qualifier des écoulements préférentiels dans le sol sur l'épaisseur de la zone racinaire. En revanche, on peut observer des retards à l'infiltration, qui génère une teneur en eau dans les horizons de sol supérieure à la teneur en eau à la capacité au champ.
- La modélisation des remontées capillaires ne s'avère pas concluante ; si une alimentation hydrique par le bas est possible dans le profil de sol, il faut revoir l'utilisation du modèle STICS pour la représenter.

5. Conclusion générale

Les travaux conduits sur les deux sites de Limoron et les Hôtels, ont permis d'acquérir un jeu de données du fonctionnement thermo-hydrique du sol qui permet de paramétrer un modèle de cultures. La modélisation du fonctionnement hydrique a permis de reproduire la dynamique générale de la teneur en eau dans le sol, mais n'a pas permis de reproduire l'évolution de la teneur en eau lorsque la demande évapotranspiratoire est très élevée ; au cours de cette période, une réalimentation du sol par des couches sous-jacentes plus humides est suspectée. Pour progresser dans notre compréhension des processus de transfert hydrique à l'interface entre la zone racinaire et la zone sous-racinaire, un observatoire géophysique de suivi en continu de la résistivité électrique du sol et de la température a été installé. Il participera à la plateforme O'ZNS du projet PIVOTS.

6. Références

- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.M., Meynard, J.M., Delecolle, R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311-346.
- Camuel, 2015. Evaluation du suivi de l'enracinement d'une culture annuelle par résistivité électrique. Rapport de stage M2 Hydro 3, Université de Rennes, 25p.
- Coutadeur, C., Cousin, I., Nicoullaud, B., 2000. Influence de la phase caillouteuse sur la réserve en eau des sols. Cas des sols de Petite Beauce du Loiret. *Etude et Gestion des Sols* 7, 191-205.
- Ismail, 2016. Suivi du fonctionnement hydrique d'un sol cultivé – Evaluation de la contribution des remontées capillaires à l'alimentation en eau des cultures. Mémoire d'Ingénieur AgroSup Dijon, 38 p.
- Lefebvre, M.P., 2010. Spatialisation de modèles de fonctionnement hydromécanique des sols appliquée à la prévision des risques de tassement à l'échelle de la France. *Sciences de l'Univers. Université d'Orléans*, p. 293.
- Michot, D., 2003. Intérêt de la géophysique de subsurface et de la télédétection multispectrale pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle intraparcellaire. *Sciences de la terre (Pédologie - Géophysique). Université Pierre et Marie Curie (Paris 6)*, p. 393.
- Tetegan, M., Nicoullaud, B., Baize, D., Bouthier, A., Cousin, I., 2011. The contribution of rock fragments to the available water content of stony soils: Proposition of new pedotransfer functions. *Geoderma* 165, 40-49.

7. Annexes

Annexe 1 – Paramétrage du modèle STICS pour les stations 1 et 2

Code	Variables climatiques	Choix de la valeur
Tmin	Température minimale journalière ou température minimale moyenne sur la décade (°C)	Données climatiques mesurées sur les stations météo de Bricy et Villamblain
Tmax	Température maximale journalière ou température maximale moyenne sur la décade (°C)	
Rg	Rayonnement journaliers (MJ.m-2.j-1) ou cumulé sur la décade (MJ.m-2.d-1)	
ETP	Evapotranspiration potentielle Penman (mm.j-1 ou mm.d-1)	
RR	Les précipitations (mm.j-1 ou mm.d-1)	
Latitude	La latitude(°), utile pour calculer la photopériode	
Itinéraire technique		
A. travail du sol et apport de résidus organiques		
coderes	Type de résidus de culture ou d'amendements organiques incorporés (cultures principales, intermédiaires, fumier...)	Information fournie par l'exploitant
julres	Jours et profondeurs d'incorporation de chaque type de résidus organiques et/ou jours et profondeurs de travaux du sol	Information fournie par l'exploitant
C/N	Quantité et rapport C/N de chaque type de résidus organiques apportés	Estimé
B. culture simulés		
profsem	Date et profondeur de semis(PROFSEMIS)	Information fournie par l'exploitant 5 cm le 15/08/2014
gpreco	Groupe variétal et densité de plantes levées	Information fournie par l'exploitant 250 grains/m ²
concurr	Dates, apports et teneur en nitrates de l'eau d'irrigation	Information fournie par l'exploitant Pas irrigation
engrais	Dates et apports de fertilisants azotés	Information fournie par l'exploitant n390 (5 mars 2015)
effirr	Efficacité de l'irrigation et de la fertilisation	
harvest	Date de récolte	Information fournie par l'exploitant (8 juillet 2015)
Paramètre concernant le sol		
• Couche de surface		
argi	Teneurs en argiles(%)	mesuré Sta1 : 335g /kg Sta2 : 291g /kg
calc	Teneurs en calcaire(%)	mesuré Sta1 :61g/kg Sta2 :464g/kg
Norg	Teneurs en azote organique(%)	mesuré Sta1 : 1.91g/kg

		Sta2 : 2.29g/kg
albedo	Albédo du sol nu à l'état sec (SD)	Sol nu : 0.2
q0	Q0, limite d'évaporation de la phase potentielle d'évaporation du sol (mm)	Calculé à partir de la formule de Textural triangle and classification by Jamage <i>et al.</i> (1977). Sta1 :10.68 Sta2 :10.32
profhum	PROFHUM, profondeur équivalente d'humification (cm), entre la profondeur de labour et 60 cm	40 cm (valeur par défaut)
	<ul style="list-style-type: none"> Couches suivantes : 	
epc	Epaisseur de la couche (cm)	mesuré (cf. profils de simulation)
HCCF	Humidité à la capacité au champ et humidité au point de flétrissement permanent (%pondéral) de la couche	estimé
DAF	Densité apparente(ou masse volumique) de la couche	mesuré
capiljour	Remontées capillaires (mm j ⁻¹)	mesuré à partir de données de la littérature
	Types de plante simulée	
	A. caractéristique de l'espèce	
DLTAMS	Levée (seuil de température et cumul d'unités de développement permettant la germination-levée ; paramètre de courbe de croissance de la plantule	estimé
TCOPT	Développement post-levée (température pilote et seuils de températures de développement	estimé
LAI	Evolution de l'indice foliaire	mesuré
EXTIN	Interception du rayonnement (coefficient d'extinction EXTIN)	estimé
masec	Croissance en Biomasse	estimé
	Composantes du rendement	mesuré
roots	Racines	estimé
water	Fonctionnement Hydrique	estimé
nitrogen	Fonctionnement azotée	estimé
harvest	Récolte	estimé
ISEN	Sénescence	estimé
	B. caractéristiques des variétés	
somcour	Les cumuls d'unités de développement entre les différents stades	estimé
pgrainmaxi	Poids maximum d'un grain	estimé
deltaz	Vitesse de croissance du front racinaire	estimé
	Paramètre structuraux ou généraux	
eo	Evaporation du sol	estimé
LRAC	Croissance racinaire	estimé
	Minéralisation de l'humus	estimé
	Minéralisation des résidus organiques	estimé
	Variables d'initialisation	
Hinitf	Humidité initiale des cinq couches de sol (%pondéral)	Hinitf= capacité au champ
NO3initf	Quantité initiales d'azote nitrique des cinq couches de sol (KgN.ha-1)	mesurés du 09/12/2014
NH4initf	Quantité initiales d'azote minéral des cinq couches de sol (KgN.ha-1)	mesurés du 09/12/2014

Annexe 2 – Evaluation des paramètres *humcapil* et *capiljour* pour la paramétrisation des remontées capillaires dans le modèle STICS

Le formalisme de remontées capillaires dans le modèle STICS requiert deux paramètres spécifiques :

- d'une part, le paramètre *humcapil* ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), qui décrit la teneur en eau à partir de laquelle les remontées capillaires peuvent se produire ;
- d'autre part, le paramètre *capiljour*, ($\text{mm}.\text{j}^{-1}$) qui décrit la vitesse des remontées capillaires

Cas de la station 1

Pour la station 1, nous avons fixé la valeur de *humcapil* à la valeur de la teneur en eau dans l'horizon de calcaire cryoturbé à la date où nous observons que la teneur en eau dans cet horizon augmente alors que les pluies sont très faibles et que la demande évaporatoire est élevée. Cette augmentation de la teneur en eau se produit à partir du 25/06/2015, et la teneur en eau est égale à **0.17 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$** (Figure 22).

Pour évaluer la vitesse des remontées capillaires, nous avons déterminé la conductivité hydraulique en régime insaturé à la teneur en eau *humcapil*. Pour cela, nous avons utilisé des données disponibles dans la thèse de D. Michot (Michot, 2003), et nous avons procédé en deux temps.

Dans un premier temps, nous avons modélisé la courbe de rétention en eau de l'horizon de calcaire cryoturbé à l'aide du modèle RETC, par un formalisme de (Van Genuchten, 1980) :

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

où h est le potentiel hydrique (m), θ la teneur en eau volumique (m^3m^{-3}), θ_s la teneur en eau à saturation (m^3m^{-3}), θ_r la teneur en eau résiduelle (m^3m^{-3}), et n et α (m^{-1}) sont des paramètres d'ajustement mathématique. Les données sont des teneurs en eau mesurées sur des mottes de sol non perturbées équilibrées à différents potentiels hydriques dans des presses à membrane de Richards (Michot, 2003).

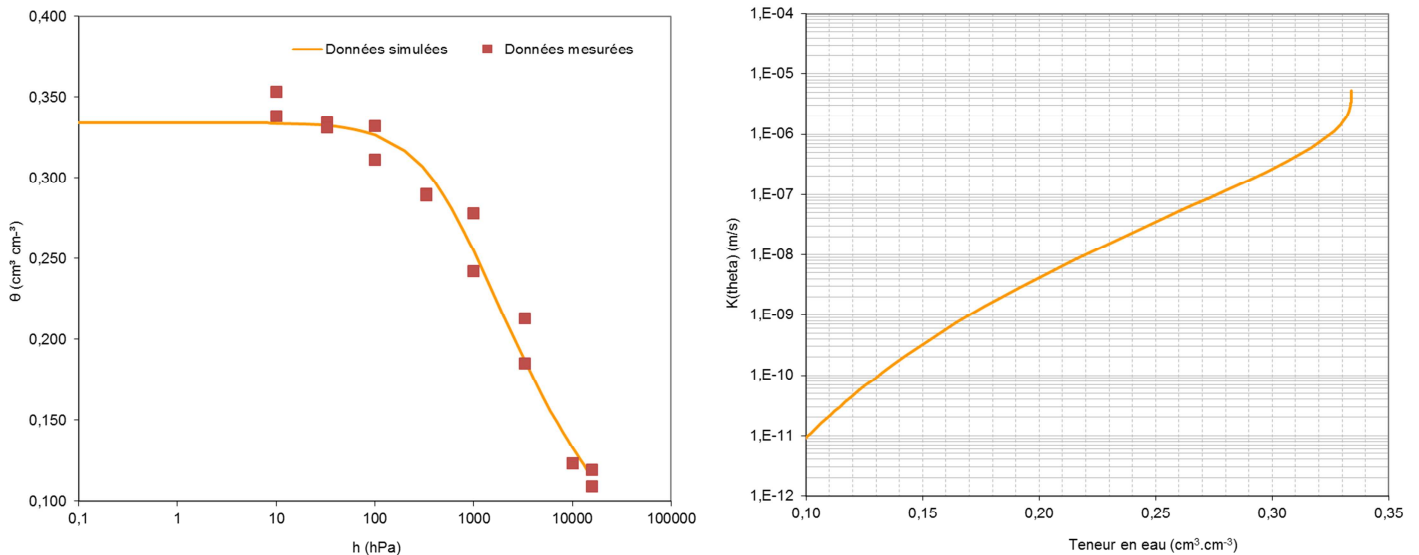
Dans un second temps, nous avons utilisé les paramètres de Van Genuchten ainsi définis et une valeur de conductivité hydraulique à saturation pour modéliser la courbe de conductivité hydraulique en régime insaturé par le formalisme de Mualem-Van Genuchten (Van Genuchten, 1980) :

$$K(Se) = K_0 Se^l \left[1 - (1 - Se^{1/m})^m \right]^2 \quad \text{avec} \quad Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

où h est le potentiel hydrique (m), θ la teneur en eau volumique (m^3m^{-3}), θ_s la teneur en eau à saturation (m^3m^{-3}), θ_r la teneur en eau résiduelle (m^3m^{-3}), n et α (m^{-1}) sont des paramètres d'ajustement mathématique, l est le facteur de tortuosité (ici égal à 0,5), et K_0 ($\text{m}.\text{s}^{-1}$) est la conductivité hydraulique à saturation.

La teneur en eau à saturation est issue de la thèse de D. Michot (2003). Elle a été déterminée sur un cylindre de sol non perturbé par la méthode du perméamètre à charge constante. Elle est égale ici à $5,7.10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$.

Les courbes de rétention en eau et de conductivité hydraulique en régime insaturé sont présentées dans le graphique ci-dessous.



On en déduit la valeur de *capiljour* à l'humidité *humcapil* pour la station 1 : *capiljour* vaut $1,4. 10^9 \text{ m.s}^{-1}$ soit **0,12 mm.j⁻¹**.

Cas de la station 2

Pour cette station, nous ne disposons pas de données permettant, d'une part, d'évaluer la valeur de *humcapil*, et, d'autre part, d'évaluer les paramètres des courbes de rétention et de conductivité en régime insaturé. Nous avons donc choisi la valeur de *humcapil* sur la courbe de teneur en eau simulée par STICS, à la date du 25/06/2015 (soit $0,10 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) (Figure 21). La conductivité hydraulique de l'horizon de calcaire dur étant probablement très faible, nous avons fixé la valeur de *capiljour* à la valeur minimale autorisée par STICS, soit **0,1 mm.j⁻¹**