

Mesure de l'eau du sol : questions, méthodes et outils Exemples d'application sur deux plateformes champs du réseau « PHENOME »

Magalie Delalande^{1, 5}, André Gavaland², Marie Noël Mistou³, Philippe Burger⁴, Florence Meunier⁵ Rémy Marandel², Guillaume Miglionico⁵, Sébastien Fargier⁵, Claude Doussan⁶

Résumé. La mesure de la quantité d'eau dans le sol et de sa disponibilité pour les plantes sont deux éléments clé pour permettre l'interprétation des données phénotypiques collectées sur les expérimentations conduites en plein champ. Pour réaliser ces mesures, l'expérimentateur doit prendre en compte la variabilité du sol avec les connaissances sur le site expérimental dont il dispose. Il est également confronté à la question délicate et assez peu renseignée du choix des outils pour mesurer et suivre la variation de l'eau dans le sol au sein de l'expérimentation. Cet article a pour objectif de fournir aux expérimentateurs les éléments théoriques qui vont lui permettre de définir précisément les questions à se poser lorsqu'ils veulent mesurer « l'eau du sol ». Il présente également les grandes familles de capteurs disponibles sur le marché avec leurs avantages et leurs inconvénients. Ces éléments théoriques sont illustrés par des exemples concrets issus des pratiques sur les plateformes de phénotypage au champ du réseau PHENOME : depuis la connaissance de la variabilité des sols, jusqu'à la consultation en temps réel et l'archivage des données des capteurs, avec un focus particulier sur l'installation et la mise en œuvre opérationnelle des sondes capacitatives (enviroscan).

Mots clés : capteur capacitif, sol, disponibilité en eau, expérimentation, phénotypage, champ

Introduction

L'expérimentation au champ, conduite à l'INRA, sur des plateformes de phénotypage ou sur des dispositifs classiques d'évaluation variétale ou de système de culture vise à comparer et évaluer du matériel végétal et/ou des conduites culturales dans des situations diversifiées et représentatives des conditions de culture en France et en Europe. Evaluer les génotypes et/ou les conduites culturales nécessite de caractériser finement le milieu (climat, sol, statut hydrique) dans lequel sont menées les expérimentations. En effet les performances agronomiques des variétés et des conduites culturales sont étroitement dépendantes des ressources disponibles et des stress que subissent les plantes au cours du cycle de culture. Pour décrire le statut hydrique journalier des différentes modalités expérimentales, il est possible aujourd'hui d'utiliser de nombreux capteurs à installer de manière temporaire ou permanente dans les parcelles, au sein des essais. Le choix de capteurs pertinents et leur utilisation peuvent s'avérer délicats pour les responsables de plateformes expérimentales : en effet, ces capteurs utilisent des technologies pointues qui nécessitent des compétences spécifiques souvent non présentes dans les Unités Expérimentales (UE).

¹ UMR AGAP, INRA, 34398 Montpellier, France

² UE Auzeville, INRA, 31326 Auzeville, France

³ UMR Agronomie, INRA, 78850 Thiverval-Grignon, France

⁴ UMR AGIR, INRA, 31326 Auzeville, France

⁵ UE Diascope, INRA, 34130 Mauguio, France

⁶ UMR EMMAH, INRA, 84914 Avignon, France

magalie.delalande@inra.fr et claudedoussan@inra.fr

Les départements EA (Environnement et Agronomie) et BAP (Biologie et Amélioration des Plantes), ont initié la création d'un groupe de travail « INSTRUMENTATION dans les UE » afin d'accompagner les unités expérimentales (UE) dans l'intégration de ces nouveaux outils et leur utilisation en routine au sein des plateformes d'essais. Ce groupe s'est fixé trois objectifs principaux :

- 1- établir un état des lieux des équipements et instrumentations de pointe des UE ;
- 2- cerner les besoins émergents des UE dans ce domaine, en fonction des attentes des UMR partenaires et des grands projets en cours ;
- 3- accompagner les UE dans l'acquisition mutualisée de nouveaux matériels et équipements et des compétences associées.

Les UE de Montpellier (UE Diascope à Mauguio) et de Toulouse (UE Grandes Cultures d'Auzeville), partenaires du projet PHENOME (Projet Investissement d'Avenir) qui vise à mettre en place le réseau français de phénotypage des plantes, ont commencé depuis quelques années à travailler sur ces questions de caractérisation fine du milieu et d'instrumentation. Dans l'objectif de faire partager leur expérience avec les autres UE de l'INRA intéressées, elles ont organisé le 3 octobre 2014 à l'UE Diascope une journée technique sur la thématique de la mesure de la teneur en eau du sol.

Cette journée a été l'occasion pour les participants (32 agents issus de 11 unités INRA, de Terres Inovia –ex CETIOM et d'Arvalis) de suivre plusieurs exposés techniques visant à présenter et comparer les différentes méthodes et capteurs disponibles sur le marché, et de visiter la plateforme Diaphen et ses essais instrumentés avec des sondes capacitives connectées à des Agribases. Des démonstrations de pose de sondes et de collecte automatisée des données via une interface web ont également été organisées lors de cette journée. Enfin une large place a été laissée au dialogue et aux retours d'expérience.

Cet article constitue une restitution de l'essentiel des connaissances théoriques et pratiques présentées lors de la journée du 3 octobre 2014. Dans un premier volet sont abordées les grandes questions à se poser avant de s'investir (et d'investir) dans des capteurs, avec un accent mis sur un point capital dès lors qu'il s'agit de capteurs : l'étalonnage. Dans un deuxième volet, sont présentées les démarches qu'ont suivies les plateformes de Montpellier et Toulouse pour choisir leurs capteurs en fonction de leurs objectifs et de leurs contraintes. Enfin le troisième volet se veut résolument pratique et détaille les outils mis en place sur les plateformes Diaphen (Montpellier) et Agrophén (Toulouse) : l'installation de capteurs capacitifs, la consultation des mesures effectuées en temps réel sur internet et le stockage à moyen terme des données dans une base de données.

Cet article est le fruit d'un travail collectif de la part des co-animateurs du groupe de travail « Instrumentation dans les UE »⁷ et des personnes ayant réalisé les présentations orales, pratiques et théoriques.

⁷ Marie-Noël Mistou, André Gavaland et Magalie Delalande

L'eau du sol : quelles variables descriptives et mesures ?

Claude Doussan

1. Les variables d'état de l'eau dans le sol : teneur en eau et potentiel hydrique

Le sol est constitué en moyenne de 50 % d'éléments solides et de 50 % de pores, qui sont les vides du sol. Cette porosité du sol va être généralement remplie d'eau et d'air et assurer les fonctions de stockage et de transfert d'eau et solutés dans le profil de sol, mais également assurer son aération et le transfert de gaz.

On quantifie l'eau dans le sol par deux types de variables : l'**humidité volumique**, qui caractérise une quantité d'eau dans le sol et le **potentiel hydrique matriciel** qui caractérise l'énergie avec laquelle l'eau est retenue dans le sol.

- **L'humidité volumique (θ)** : (également appelée teneur en eau volumique) correspond à un volume d'eau contenu par unité de volume de sol, elle s'exprime en $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ou en % :

$$\theta = \frac{V_{\text{eau}}}{V_{\text{sol}}}$$

avec V_{eau} volume d'eau et V_{sol} volume de sol considéré. La mesure de volume, pour le sol en particulier, étant assez contraignante lors de prélèvements au champ (cylindres non perturbés), on utilise également fréquemment la notion d'humidité pondérale (W), qui correspond à la masse d'eau contenue par unité de masse de sol sec :

$$W = \frac{M_{\text{eau}}}{M_{\text{sol}}}$$

Où M_{eau} et M_{sol} sont la masse d'eau et de sol sec d'un échantillon. La mesure (gravimétrique) de l'humidité pondérale est réalisée par pesée de l'échantillon (prélevé à la tarière par ex.) avant et après passage à l'étuve (à 105 °C pendant 24 h, minimum) pour en évaporer l'eau contenue.

On peut passer de l'humidité pondérale à l'humidité volumique avec la masse volumique sèche du sol (ρ_d), qui est la masse de sol sec contenue par unité de volume de sol prélevé : $\rho_d = M_{\text{sol}}/V_{\text{sol}}$. Dans les applications agronomiques, on considère que la masse volumique de l'eau ne varie pas et que celle-ci vaut $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Ainsi, la mesure de la masse d'eau dans un échantillon de sol (par ex. 2 g) donne directement le volume d'eau dans cet échantillon (soit 2 cm^3 dans l'exemple). La correspondance entre les deux types de mesure de l'humidité est : $\theta = W \cdot \rho_d$

Il est donc important de bien connaître la masse volumique sèche du sol, qui peut varier typiquement de 1,2 à 1,6 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, pour avoir une estimation correcte de l'humidité volumique à partir de l'humidité pondérale (utilisée typiquement pour étalonner les capteurs d'humidité dans le sol).

L'humidité volumique est utilisée dans tous les calculs relatifs au stock d'eau dans le sol, qui est la quantité d'eau (S_z) qu'un sol contient dans une certaine épaisseur (dZ) : $S_z = \theta \cdot dZ$, exprimée en mm de lame d'eau. Ainsi, par ex. avec une humidité volumique $\theta = 0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (ou 10%) mesuré sur une épaisseur de sol de 10 cm, le stock d'eau de cette couche de sol sera de 10 mm (ou de façon équivalente 10 $\text{l} \cdot \text{m}^{-2}$). Le stock d'eau total du sol, jusqu'à la profondeur d'enracinement maximum, sera la somme des stocks d'eau des différentes couches de sol jusqu'à cette profondeur. Les variations de stock d'eau dans le temps donnent accès à des estimations de la quantité d'eau utilisée par évapotranspiration ou transférée par drainage (bilan hydrique). Humidité volumique et stock d'eau du

sol par horizon permettent également de calculer la réserve utile du sol et de situer l'état de la culture par rapport à l'épuisement de cette réserve utile.

- **Le potentiel hydrique matriciel** : si l'humidité volumique permet d'estimer des quantités d'eau dans un sol, cette grandeur ne retranscrit pas la force avec laquelle l'eau est retenue dans le sol. C'est le potentiel hydrique matriciel (h) qui traduit l'énergie, ou la force qu'il faut appliquer à un volume de sol donné pour en extraire un certain volume d'eau libre. Le potentiel hydrique est généralement exprimé en unités de pression (force par unité de surface : kPa, ou bar ou en charge hydraulique : en cm de colonne d'eau équivalente). Les équivalences d'unités de pression sont :

1 bar = 100 kPa = 1020 cm de colonne d'eau équivalente = pF 3,01 (avec $pF = \log_{10} cm_{eau}$).

Le potentiel hydrique matriciel est nul quand il est au plus haut (eau libre, sol saturé) et décroît - devient de plus en plus négatif - quand le sol devient de plus en plus sec. La valeur négative du potentiel matriciel signifie qu'il faut fournir de l'énergie pour extraire l'eau du sol. Cette relation entre humidité du sol et potentiel matriciel est nommée courbe de rétention (d'eau) du sol. Elle est caractéristique de chaque type de sol en fonction de sa texture / structure...

Le potentiel matriciel, associé à la profondeur dans le sol (définissant un potentiel hydrique total), est une caractéristique fondamentale pour quantifier le sens et l'intensité des flux d'eau dans le sol. C'est aussi une grandeur essentielle pour déterminer la disponibilité de l'eau du sol pour la plante, car représentant la force de succion que devra déployer la plante pour extraire l'eau du sol. Par exemple, le point de flétrissement permanent, qui marque la limite inférieure d'humidité de la réserve utile, est souvent déterminé pour un potentiel matriciel $h = -15$ bars. A ce potentiel matriciel on admet que, en général, les cultures ne sont plus capables d'extraire l'eau du sol et finissent par flétrir sans irrigation. Cependant, pour des potentiels hydriques supérieurs, variables de -0,3 à -5 bars suivant les cultures, les plantes peuvent déjà commencer à subir un stress hydrique et à ne plus satisfaire la demande climatique par transpiration. Enfin, une caractéristique du potentiel hydrique est qu'il est une variable continue dans le sol, contrairement à l'humidité volumique. Ainsi, à l'équilibre (pas de flux d'eau), un sol fait d'un horizon hétérogène où un milieu sableux jouxte à la même profondeur un milieu plus argileux peut présenter des teneurs en eau différentes dans ces deux milieux (par ex. 5% et 25% respectivement) mais le potentiel matriciel sera par contre semblable (par ex. -1 bar). Ce sera un avantage pour l'installation des capteurs de potentiel hydrique, qui pourront être installés dans un milieu qui aura été remanié, mais qui s'équilibrera en potentiel matriciel avec le milieu entourant non perturbé.

2. Un aperçu des capteurs pour la mesure de l'eau du sol

La mesure de l'eau dans le sol peut être réalisée de manière directe : en obtenant directement la variable physique désirée, ou indirecte : en mesurant un paramètre physique lié à l'eau et nécessitant de connaître la relation entre ce paramètre et la variable hydrique désirée.

Les méthodes directes pour la détermination de l'humidité volumique et/ou pondérale sont le prélèvement de sol au champ, suivi d'une mesure gravimétrique, soit de sol non perturbé avec des cylindres (100 cm³ ou plus), soit de sol remanié par tarière avec une estimation par ailleurs de la masse volumique sèche. Ce sont les méthodes de référence pour l'humidité utilisées pour l'étalonnage des méthodes indirectes et capteurs associés. Ce sont également des méthodes normalisées, internationales, de mesure de l'humidité: NF EN ISO 11461 (pour θ), NF ISO 11465 (pour W), NF EN ISO 11272 (pour ρ_d) ; avec l'autre méthode de mesure de référence qui est la mesure par atténuation de neutrons (NF ISO 10573). Cette méthode, précise (précision ~ 0,01-0,02 m³/m³) et intégrative (mesure sur une sphère de rayon ~20cm), utilise cependant une source radioactive, nécessitant des habilitations spécifiques, un personnel compétent en radioprotection et se confrontant à des difficultés d'import. Elle est en voie de disparition au profit des autres méthodes indirectes moins contraignantes.

Pour le potentiel hydrique, la méthode directe et normalisée (NF EN ISO 11276) est l'utilisation du tensiomètre (bougie poreuse remplie d'eau implantée dans le sol dans laquelle on mesure la succion de l'eau avec un manomètre). Bien que précise et réactive, cette méthode présente une gamme de mesure limitée (0 à -0,7 bars) et nécessite un entretien régulier et minutieux du dispositif.

Les méthodes indirectes de mesure des paramètres hydriques du sol se sont fortement développées ces dernières années avec le développement de techniques basées sur des mesures électriques (électromagnétiques), automatisables, nécessitant peu de maintenance, avec un temps de réponse quasi-instantané et avec un coût décroissant au cours du temps. Ces techniques « électriques » sont en pleine expansion et donnent lieu à différents designs et technologies de mesure. Elles partagent cependant le fait que, pour des mesures d'humidité du sol, ces techniques présentent un faible volume de mesure (quelques cm autour du capteur) et sont donc « locales » et sensibles à l'hétérogénéité naturelle du milieu (cailloux par ex) ou de pose (lame d'air restant après installation ou fissure de retrait) avec des mesures beaucoup plus variables (dans l'espace) que des mesures intégratives (comme la sonde neutron). Le principe général des mesures d'humidité du sol repose sur une estimation de la permittivité diélectrique d'un volume de sol. On trouvera également des mesures fondées sur la résistivité électrique, ou la diffusivité thermique pour l'estimation du potentiel hydrique. Brièvement, la **permittivité diélectrique** est une propriété physique d'un milieu qui exprime l'interaction de ce milieu avec un champ électrique : sa capacité à se polariser ou encore l'influence du milieu sur l'atténuation de la vitesse d'une onde électromagnétique s'y propageant. Ces deux propriétés (vitesse, polarisation) ont donné lieu à deux grands types de technologies : mesures de temps en relation avec la vitesse de l'onde électromagnétique dans le sol (mesures dites TDR), mesures liées à un aspect capacitif (au sens électrique) en relation avec la polarisation du milieu (mesures dites capacitives : FDR, ADR...). L'intérêt d'une mesure basée sur la permittivité diélectrique pour le sol provient du fait que l'eau a une permittivité diélectrique très grande (~80) par rapport aux autres constituants du sol (air : 1, minéraux : 2-4) et la permittivité du sol est donc fortement sensible à sa teneur en eau. D'autre part, quand la permittivité est effectivement mesurée et donnée par le capteur, il existe une relation empirique (relation de Topp, Topp et al., 1980) liant permittivité et teneur en eau qui est relativement générale et peut être assez « précise » (de l'ordre de $0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$), mais qui se dégrade pour des teneurs en eau importantes ($>0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$) et qui dépend de la constitution du sol : si trop fort taux d'argile, de matière organique, forte densité ($>1,55 \text{ g/cm}^3$), sols à allophanes (andosols) ou à magnétite, forte salinité.

Les capteurs d'humidité à base « diélectrique » ont un design d'électrodes soit en broches ou plaques à insérer dans le sol, qui nécessite en général le creusement d'une fosse pour avoir des mesures en fonction de la profondeur, soit d'électrodes annulaires, éventuellement empilables, dans un tube implanté dans le sol permettant d'obtenir un profil d'humidité. Une grande variété de capteurs (et de constructeurs), en particulier capacitifs, existent actuellement sur un marché qui prend de l'essor. De façon générale, les mesures TDR sont plus précises et délivrent une information en permittivité (permettant d'utiliser la relation de Topp) et potentiellement moins sensibles (fonctionnement à haute fréquence) à la salinité que les capteurs capacitifs. Par contre, les capteurs TDR sont plus chers que des capteurs capacitifs. Les mesures à partir de tubes sont globalement moins sensibles qu'avec des capteurs directement implantés dans le sol. Que ce soit des capteurs capacitifs ou TDR, les mesures diélectriques sont très sensibles à l'installation des électrodes ou des tubes : 90% de la réponse du capteur provient en gros d'une distance dans le sol inférieure à 3 cm des électrodes et les volumes de mesure effectif autour du capteur sont de l'ordre de quelques centaines de cm^3 au litre (en comparaison avec ~35 L de sol pour une sonde à neutrons). Une lame d'air entre le capteur (ou tube) et le sol, due à des fentes de retrait ou un trou d'implantation trop large, modifie fortement la réponse du capteur, de même que des cailloux ou des macropores à proximité du capteur. Ces effets locaux (lame d'air, macropores, cailloux...) peuvent être aléatoires d'un capteur à l'autre au champ et ces capteurs peuvent donner des réponses différentes non pas du fait d'une teneur en eau différente, mais d'installation ou d'hétérogénéités du sol variables. Dans ce cas, la représentativité de la mesure est plus problématique et peut nécessiter des étalonnages « *in situ* » par sonde, ou l'installation d'un

nombre important de sondes pour avoir une mesure moyenne représentative. Globalement, les sols présentant du retrait lors de la dessiccation (sol argileux), ou les sols caillouteux, ou très organiques, ou avec une salinité importante ($> 1,5\text{-}2 \text{ dS/m}$) nécessitent des précautions dans l'installation ou l'analyse des données pour ces méthodes diélectriques. Une correction de température peut s'avérer nécessaire également.

Les mesures à base électrique du potentiel hydrique sont basées sur la mise en équilibre hydrique d'un corps poreux avec le sol. Une mesure électrique, résistive ou capacitive, est faite dans ce corps poreux, qui est liée à sa teneur en eau. A l'équilibre (i.e. pas de flux hydrique), le potentiel matriciel du corps poreux et du sol sont égaux. La relation entre l'état hydrique (ou le signal électrique mesuré) de ce corps poreux et son potentiel matriciel ont été déterminés auparavant par le constructeur (étalonnage). Un avantage de ces capteurs est qu'ils sont moins sensibles à l'installation et l'hétérogénéité que les capteurs d'humidité car on peut faire une boue pour assurer un bon contact hydrique capteur/sol lors de l'implantation. Les capteurs à base d'une mesure résistive sont moins précis (0,3 à 0,6 bars) et peuvent dériver dans le temps, leur gamme de mesure peut être restreinte (par ex. jusqu'à -2 bars pour les sondes Watermark) et si le sol sèche trop, dépassant leur gamme de mesure, ils peuvent n'être plus fonctionnels même si le sol se réhydrate. Ils offrent cependant une solution économique pour du monitoring. Les capteurs capacitifs sont plus précis, plus stables dans le temps et avec moins d'hystérésis. Leur gamme de mesure s'étend jusqu'à -15 bars (voire au-delà). Ils sont cependant plus chers que les capteurs résistifs et ce d'autant plus que la calibration constructeur en potentiel matriciel est précise. Dans les deux types de mesure cependant, les temps de mise en équilibre peuvent être longs par rapport au sol et aux flux s'y déroulant: c'est le cas quand le sol est très humide (par ex. entre saturation et capacité au champ) ou quand a lieu une infiltration dans un sol déjà bien sec. Ils sont moins précis dans la gamme 0 à -0,5 bar, et dans la gamme de ces potentiel matriciels, sont moins adaptés et rapides que les tensiomètres « classiques ». Ils peuvent être sensibles à la température et comme pour la pose des capteurs d'humidité, l'installation dans un sol initialement sec peut compromettre les mesures ultérieures, ici à cause d'un non-équilibre entre le capteur et le sol.

3. Etalonnage des capteurs mesurant l'eau du sol : pourquoi? Comment ?

L'étalonnage consiste à mettre en relation le signal délivré par le capteur et la valeur du paramètre désiré : ici l'humidité volumique ou le potentiel hydrique. La plupart des constructeurs des capteurs proposent une relation d'étalonnage pour leur capteur, basée sur leur expérience du matériel et un certain nombre de mesures qu'ils ont effectuées. Pour l'humidité volumique, les précisions de mesure annoncées avec une relation d'étalonnage constructeur sont de 0,01 à 0,03 m^3/m^3 . Ce sont cependant des valeurs basses correspondant à de bonnes conditions de pose et de milieu, pour les types de sols testés. En condition d'utilisation réelle, cette précision d'une relation constructeur peut être nettement moindre, voire très faible, et considérer une précision l'ordre de 0,05 m^3/m^3 peut être plus raisonnable, mais elle peut être également moins bonne. Comme vu ci-dessus, la précision dépendra du type de sol (proportion d'argile, de matière organique, masse volumique...), de son hétérogénéité (cailloux, macroporosité...), de la qualité de la pose (qualité du contact sol-capteur) mais probablement aussi de la variation de paramètres environnementaux (température, salinité) et des types de capteurs (installation en tube, tige ou plaques époxy, géométrie des broches contraignant plus ou moins le champ électrique...). Cependant, le besoin en précision de mesure dépendra de l'application et des objectifs. Un besoin de monitoring pour de l'irrigation sera moins exigeant qu'un calcul de stock hydrique pour faire des bilans hydriques ou retracer des variations d'humidité ou de prélèvement hydrique en fonction de la profondeur. Dans ces derniers cas une précision 0,05 m^3/m^3 (due uniquement à l'erreur d'étalonnage du capteur) n'est sûrement pas acceptable. Il sera en général alors nécessaire d'avoir un étalonnage terrain plus ou moins lourd (suivant la précision souhaitée) et/ou une vérification terrain des données capteurs. A cette erreur d'étalonnage s'ajoute une « erreur » liée à la variabilité spatiale et à l'hétérogénéité du sol, qui nécessite de répliquer les

mesures à différents endroits de la parcelle pour obtenir une moyenne représentative du traitement ou de la parcelle. Concernant cette variabilité spatiale, Il faut noter que dans le cas des capteurs capacitifs, sensibles à l'environnement local à cause de leur faible volume de mesure, la qualité de pose ou l'hétérogénéité locale peuvent augmenter fortement cette composante de variabilité spatiale par rapport à des mesures classiques, plus intégratives.

L'étalonnage des capteurs peut être fait de manière plus ou moins complexe, suivant la précision recherchée et le travail à fournir. Dans tous les cas, il faut connaître le milieu : profondeurs d'horizons ou variations texturales en profondeur, masses volumiques. Un moyen relativement simple, quand peu de précision est requise, consiste à se baser sur les points d'humidité caractéristiques (capacité au champ (CC), point de flétrissement permanent (PFP) et teneur en eau à saturation (θ_{sat}). Ceux-ci peuvent être estimés à partir de prélèvements et mesures ou calculés par une fonction de pédotransfert pour CC et PFP (à partir de la texture, masse volumique... par ex. Bruand et al., 2004 pour des sols agricoles français). La teneur en eau à saturation peut être estimée par $\theta_{sat} = 1 - (\rho_d / 2,65)$. Quand il est estimé que le sol est à la capacité au champ (après quelques jours de pluies abondantes ou après une forte irrigation) ou au point de flétrissement permanent (fin de saison d'une culture peu irriguée) et en suivant les valeurs mesurées par les capteurs. On peut alors soit vérifier la cohérence des données capteurs, si la relation d'étalonnage constructeur est utilisée, soit ajuster cette relation d'étalonnage. La vérification se fait en vérifiant que les capteurs ne donnent pas de valeurs supérieures à θ_{sat} et que l'écart des valeurs mesurées aux points caractéristiques d'humidité n'est pas trop fort. En plus de la vérification, Il est préférable cependant d'ajuster l'équation de calibration des capteurs pour que les valeurs estimées (à chaque profondeur) par capteurs donnent les valeurs de capacité au champ et point de flétrissement permanent mesuré ou calculé. Une vérification ou estimation de la précision pourra être faite en cours de saison par quelques prélèvements de sol suivis de mesure gravimétrique de teneur en eau. A l'autre extrême, la méthode d'étalonnage apportant le plus de précision, mais la plus exigeante et lourde, est un étalonnage capteur par capteur en faisant des prélèvements de sol à une distance de l'ordre de 1 m autour des capteurs et à chaque profondeur de capteurs (avec 2, 3 répétitions). Il faut de l'ordre de 5-6 dates de prélèvements (points d'échantillonnage) au cours de la saison couvrant une gamme de teneur en eau la plus large possible (on peut ainsi atteindre une précision de 0,01 – 0,02 m³/m³). Ce protocole peut être allégé (en perdant de la précision) en faisant un étalonnage par groupe de capteurs installés dans un même horizon ou texture de sol, limitant ainsi le nombre de prélèvements.

Estimation de l'erreur globale de mesure (teneur en eau, stock hydrique ; si on a réussi à estimer l'erreur sur la mesure de l'humidité ($\Delta\theta_{cal}$), provenant de la calibration (soit à partir de la courbe d'étalonnage, soit à partir de prélèvements de sol), on peut estimer l'erreur d'estimation du stock d'eau (ΔS_{cal}) due à l'étalonnage sur le profil par $\Delta S_{cal} = \Delta\theta_{cal} \cdot dZ \cdot \sqrt{n}$, où dZ est l'épaisseur de sol de chaque mesure de teneur en eau, et n le nombre de mesures (d'épaisseur dZ) sur le profil. Par ex., si $\Delta\theta_{cal} = 0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$, sur une profondeur de 120 cm avec une mesure tous les 10 cm, on aura $\Delta S_{cal} = 10 \text{ mm}$.

Comme noté plus haut, La variabilité spatiale s'ajoute à cette erreur de calibration. Pour estimer cette « erreur » spatiale, dans le calcul d'une valeur moyenne, si k profils de mesures ont été installés pour qualifier le traitement ou la parcelle, alors l'erreur (écart type) sur la moyenne estimée due à la variabilité spatiale (soit sur la teneur en eau à une profondeur donnée $\Delta\theta_{esp}$, soit sur le stock d'eau ΔS_{esp}) est donnée par $\Delta\theta_{esp} = \sigma_\theta / \sqrt{k}$ (ou $\Delta S_{esp} = \sigma_S / \sqrt{k}$) avec σ_θ et σ_S les écarts types de la teneur en eau mesurée et du stock d'eau calculé sur les k répétitions. Par ex., si l'écart type du stock d'eau d'un traitement sec est $\sigma_S = 12 \text{ mm}$, avec 4 répétitions, alors $\Delta S_{esp} = 6 \text{ mm}$.

Au final, l'estimation de l'erreur globale du stock hydrique (ΔS_{tot}) ou de la teneur en eau à une profondeur donnée ($\Delta\theta_{tot}$) sera estimée par $\Delta S_{tot} = \sqrt{\Delta S_{cal}^2 + \Delta S_{esp}^2}$ (et $\Delta\theta_{tot} = \sqrt{\Delta\theta_{cal}^2 + \Delta\theta_{esp}^2}$).

Pour reprendre l'exemple précédent, l'erreur totale d'estimation du stock hydrique sur l'essai sec sera $\Delta S_{tot} \sim 12$ mm.

Références bibliographiques

Topp GC, David JL, Annan AP (1980) Electromagnetic, Determination of Soil Water Content : Measurement in Coaxial Transmission Lines. *Water Resources Res* **16**: 574-582.

Bruand A, Duval O, Cousin I (2004) Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO : une première proposition combinant le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente. *Etude et Gestion des Sols* **11** : 323-334.

En synthèse de ce paragraphe, voici un tableau comparatif de capteurs pour la mesure de la teneur en eau du sol. Ces capteurs peuvent se trouver sous différentes géométries (en tube, cylindriques, plats...). Les capteurs type TDR, FDR et ADR sont des capteurs reposant sur la mesure de la permittivité diélectrique du sol avec l'émission d'une onde électrique dans le sol, tandis que la sonde à neutrons implique l'utilisation d'une source radioactive. Les capteurs TDR, FDR, ADR sont très sensibles à la pose : présence d'une lame d'air, cailloux au niveau du capteur.

TDR= Time Domain Reflectometry, FDR= Frequency Domain Reflectometry, ADR= Amplitude Domain Reflectometry.

	Sonde Neutron	TDR	FDR	ADR
Intervalle de teneur en eau	0-60%	3-50%	0-saturation	0-saturation
Précision (avec calibration spécifique sol)	± 1%	± 1%	± 2-5%	± 2-3%
Volume mesure	Sphère (10-30cm rayon)	2-3 cm le long du guide d'onde (de 20 à 50 cm long ...)	Sphère/tore : 3-4 cm	Cylindre 3 cm rayon, 4 cm long
Méthode installation	Tube PVC/Alu	Enterré permanent ou insertion en surface lecture manuelle	Enterré permanent ou tube PVC	Enterré permanent ou insertion en surface lecture manuelle
Capacité enregistrement mesures	Non	Dépend instrument	Oui	Oui
Effet salinité	Non	Oui	Oui si élevé	faible
Types sol non recommandés	Aucun	Organiques, très argileux, salés	Argileux= retrait sur tube, caillouteux	caillouteux
Maintenance au champ	Retrait tube total ou partie supérieure tube => labour	Retrait sonde 0-30 cm => labour	Retrait sonde/tube total ou partie 0-30 cm => labour	Retrait sonde 0-30cm => labour
Coûts (€ avec acquisition/lecteur)	10000 (NB : quasiment plus disponible)	300-18000	200-2000	400-900

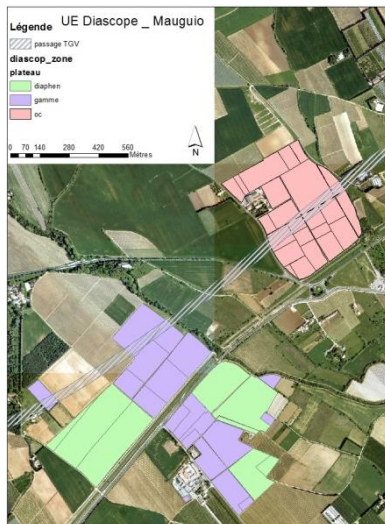
Deux exemples d'application : les plateformes champ du réseau PHENOME sur les Unités Expérimentales de Toulouse et Montpellier

Magalie Delalande, André Gavaland, Philippe Burger

1. Les plateformes Champ du Réseau PHENOME : situation générale

Le réseau français de phénotypage des plantes (PHENOME) est composé de plateformes de phénotypage haut débit en serre (Dijon et Montpellier), en milieu semi-contrôlé (Ouzouer-le-Marché et Clermont-Ferrand), au champ (Montpellier et Toulouse) et de deux plateformes « omics » (Nantes et Bordeaux). Les plateformes « champ » ont parmi leurs missions, celle de caractériser finement l'environnement cultural sur lesquelles sont réalisées des expérimentations de phénotypage instrumenté haut débit, avec l'idée de documenter précisément les interactions Génotype X Environnement. Parmi les paramètres d'état à contrôler, un élément important est le suivi de l'évolution de la teneur en eau des sols et de sa disponibilité pour les cultures.

La **plateforme DIAPHEN** est située au Sud de Montpellier. Elle est soumise à un climat méditerranéen qui se caractérise par des étés très chauds et très secs, et des hivers doux et humides.



Quelques données météo (moyennes relevées sur la période 1981-2010 - aéroport de Fréjorgues) : température moyenne de 15,2°C, température moyenne estivale (juillet) de 29,3°C; pluviométrie annuelle : 629 mm avec de très forts contrastes interannuels et une tendance à la réduction aux environs de 550 mm. Les précipitations avec cumuls records ont tendance, elles, à augmenter, le record de pluie en 24 h a atteint 299,5 mm ; le mois de septembre voit la fréquence des épisodes cévenols augmenter. ETP cumulée annuelle moyenne : 1144 mm et déficit hydrique mensuel (**Figure 1**) de l'ordre de 180 mm en juin et juillet, et supérieur à 100 mm en mai et août.

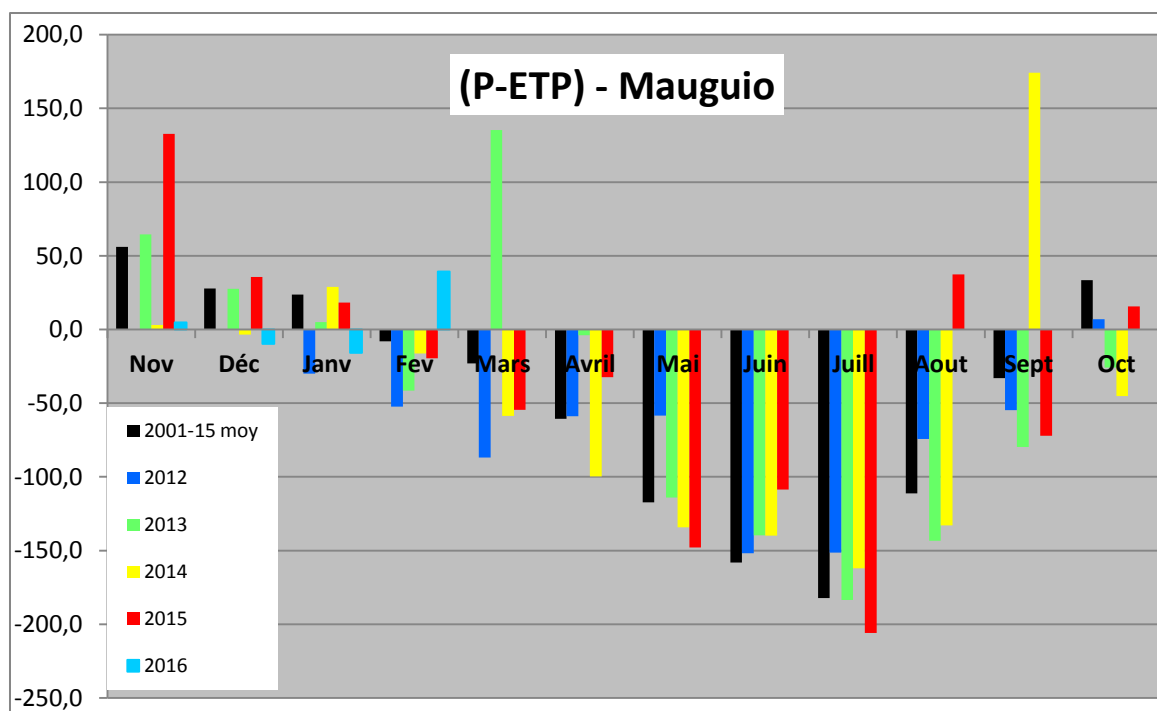


Figure 1. Déficit hydrique sur Mauguio.

La plateforme Diaphen accueille des expérimentations sur les espèces méditerranéennes : blés (principalement blé dur), sorgho, maïs, soja, mais également pommier et olivier.

Spécificité de la plateforme Diaphen : réponse des plantes aux stress hydrique et thermique typiques du climat méditerranéen.

Diaphen, gérée par UE Diascope, est idéalement située pour la conduite des études sur la réponse des plantes en plein champ aux stress hydrique et thermique estival. Les expérimentations accueillies permettent de comparer les traits physiologiques et l'évolution des composantes du rendement entre arbres ou micro-parcelles soumis à des stress hydriques importants à d'autres en situation d'irrigation non contraignante. Une station météorologique du réseau Agroclic a été installée en 2011 en bordure de l'une des parcelles de la plateforme. Elle permet une caractérisation fine de la climatologie des parcelles. Ces informations sont complétées par un réseau de capteurs (principalement des pluviomètres) installés dans les traitements en irrigation contrainte et en irrigation non limitante, afin de pouvoir comparer les apports et de palier le caractère potentiellement très localisé des pluies et orages en région méditerranéenne.

La plateforme AGROPHEN est située à Auzeville, en région Toulousaine. Elle est soumise à un climat tempéré océanique, à influences méditerranéenne et continentale. L'été est le plus souvent sec et très chaud, l'automne est bien ensoleillé, l'hiver est doux et le printemps est marqué par de fortes pluies et des orages violents.

La température moyenne annuelle de 13,4 °C (moyenne 1971-2015) est en augmentation au cours de ces 4 décennies : de 12,4°C en 1975 (moyenne 1971-1975), elle se stabilise autour de 14°C à partir de 1997.

Sur 32 ans (1984-2015), les précipitations moyennes annuelles s'élèvent à 658 mm avec des variations interannuelles importantes (385 mm en 1989, 977 mm en 1992). Avec une ETP cumulée

annuelle de 947 mm, le déficit hydrique mensuel (P-ETP, **Figure 2**) est de l'ordre de 100 mm en juin, juillet et août, et 50 mm en mai et septembre.

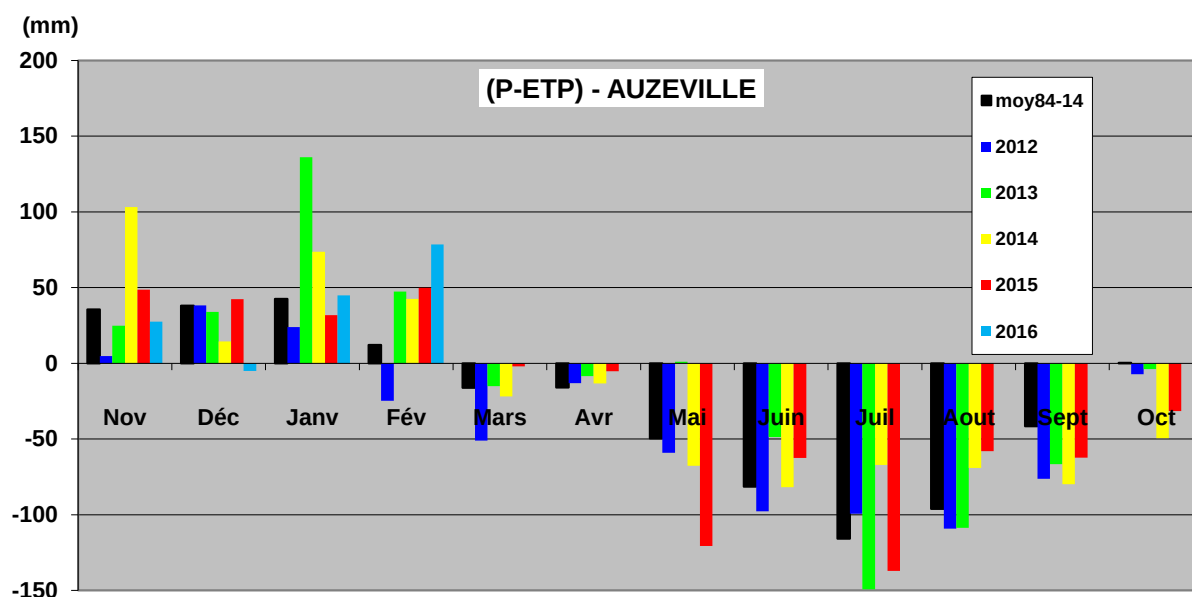
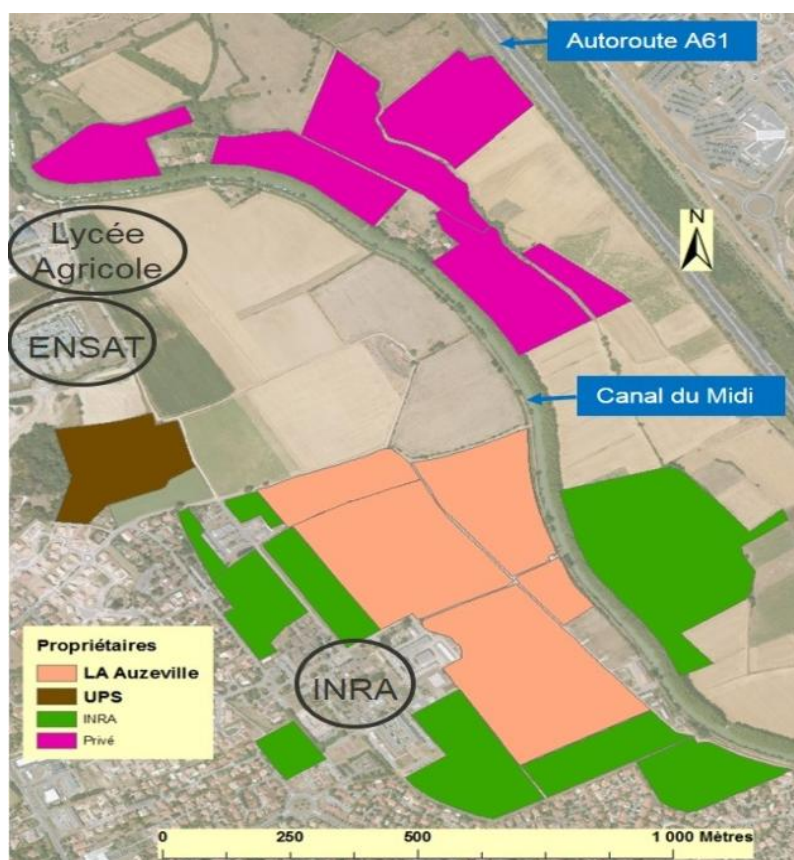


Figure 2. Déficit hydrique sur Auzeville.



Carte 1. Parcellaire de l'UE d'Auzeville.

Le domaine géré par l'UE d'Auzeville se situe au sud-est de Toulouse, en zone péri-urbaine et aux débuts du Lauragais, zone traditionnelle de grande culture où la rotation culturale dominante est blé-tournesol.

Les terres exploitées par l'INRA sont séparées en deux par le Canal du Midi : à l'ouest 48,5 ha (16 ha en propriété INRA, 28 ha au Lycée Agricole d'Auzeville et 4,5 ha à l'Université Paul Sabatier) à proximité des bâtiments INRA et à l'est 34 ha (dont 11 ha à l'INRA et 23 ha loués à un privé).

Spécificité de la plateforme AGROPHEN

La plateforme Agrophen permet de recevoir l'essentiel des grandes cultures, blé dur et blé tendre, tournesol, sorgho, pois, soja et maïs. Des variantes de conduites pour la fertilisation azotée et la protection phytosanitaire sont régulièrement mises en place et scrupuleusement enregistrées dans un SIG (système d'information géographique) pour en garder la trace et ne pas compromettre les utilisations ultérieures des parcelles. Des variantes d'irrigation peuvent également être mises en place pour les cultures d'été. Mais même en l'absence de variantes d'irrigation, le climat toulousain est tel que le déficit hydrique estival est extrêmement variable d'une année à l'autre et doit donc être caractérisé. Cette caractérisation utilise d'une part les données de la station météorologique du réseau agroclim et d'autre part l'outil BilH qui permet de les synthétiser sous la forme d'une courbe de satisfaction du besoin ETR/ETM de la culture.

2. Suivi de l'état hydrique du sol

Le suivi de l'état hydrique du sol est indispensable quelle que soit la thématique propre à la plateforme. Il permet d'assurer une gestion précise de l'expérimentation, de gérer le cas échéant les apports hydriques, de réaliser des bilans hydriques en dynamique, tout en caractérisant l'état hydrique (avec ou sans contrainte) des géotypes dont les micro-parcelles sont équipées de capteurs.

Ces deux plateformes mettent à disposition des équipes de recherche des outils de bas, moyen et haut débit pour le phénotypage instrumenté non destructif. Elles mettent également à leur disposition des capteurs permettant de suivre en temps réel l'évolution de la teneur en eau du sol dans les micro-parcelles expérimentales grâce à des sondes capacitatives. Ces sondes étant installées pour chaque campagne sur les espèces annuelles, il a été nécessaire de mécaniser leur pose. Les données collectées par les capteurs sont transmises en temps réel via des centrales d'acquisition (Agribases), vers un serveur dédié localisé à l'INRA de Montpellier. Les équipes de recherche peuvent ainsi consulter en temps réel les valeurs acquises par les sondes installées dans leur expérimentation via une connexion internet sur le serveur Agriscope/INRA.

Cartographie fine des sols : une étape indispensable

Sur le domaine expérimental d'Auzeville, les sols sont plutôt fertiles mais il convient de les connaître et d'en maîtriser l'hétérogénéité pour réussir les essais.

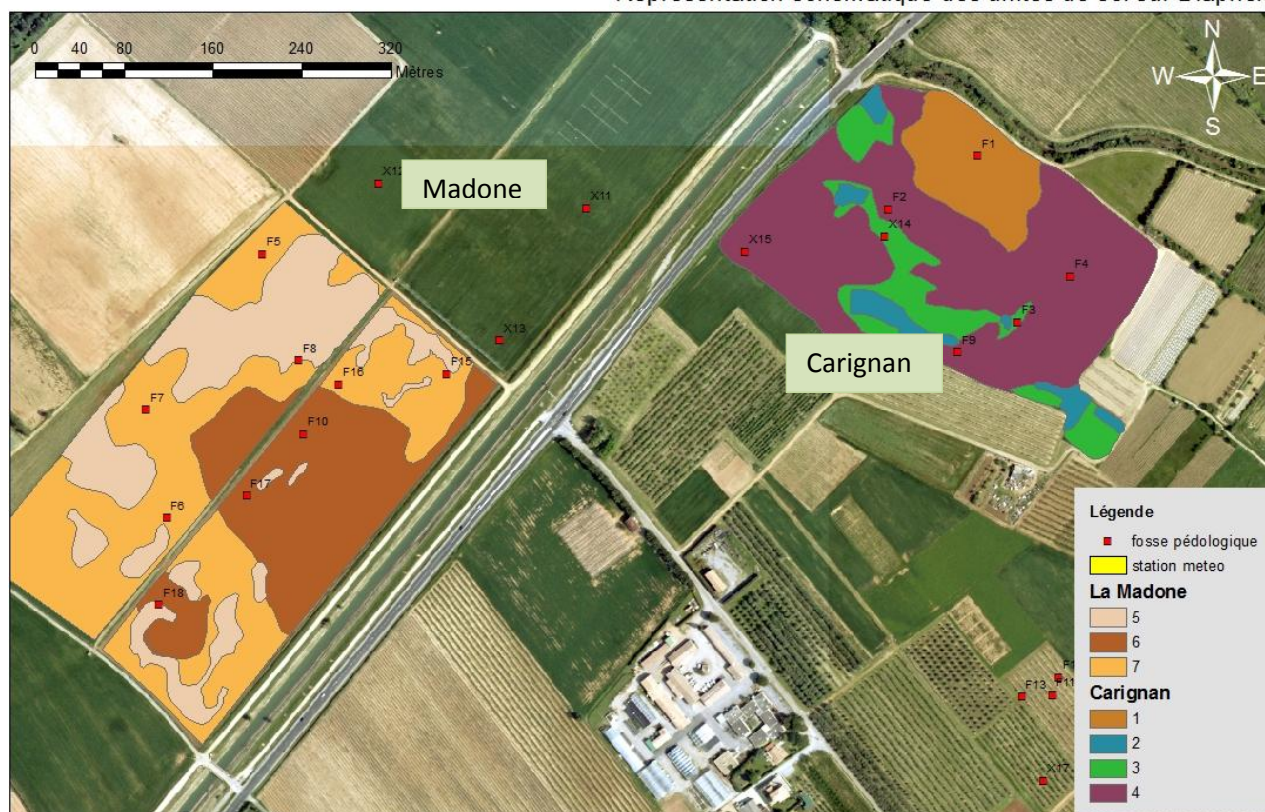
Les terres sont situées sur une zone d'alluvions récentes de l'Hers-mort (zone sans relief d'altitude 150 m). Les sols, globalement profonds et fertiles, présentent une certaine hétérogénéité : texture argilo-limoneuse à argileuse avec localement quelques graves, pH variant de 6,5 à 8,5. La teneur en argile peut être très variable (20 à 40 %) au sein d'une même parcelle. Ces sols sont classés comme « typic hapludalf » suivant la classification USDA, ce qui peut être assimilé à un sol brun lessivé dans la classification CPC ou luvisol dans la classification RPF ou WRB (Colomb et al., 2007).

Une cartographie est en cours de réalisation depuis 2016. La prospection pédologique est orientée par les cartes de résistivité électrique (réalisées par Géocarta⁸) et les cartes de rendement des cultures d'homogénéisation des années précédentes. Des sondages à la tarière ont été réalisés pour décrire le sol, les échantillons ont fait l'objet d'analyses de terre et *in fine* des fosses pédologiques ont été réalisées dans chaque unité de sol afin de mesurer les caractéristiques hydriques sur des échantillons non remaniés et la densité apparente. La carte des sols devrait être finalisée en 2017.

⁸ Géocarta propose un service de cartographie de la résistivité des sols par méthode galvanique en continu avec le procédé breveté ARP®. Cette méthode permet de cartographier l'intégralité du proche sous-sol jusqu'à une profondeur moyenne de 1,70 m avec une résolution métrique. Plus précisément cette méthode permet de connaître les variations horizontales de la résistivité électrique apparente pour trois profondeurs d'investigation différentes (classiquement 0,5 m ; 1,0 m et 1,5 m).

Sur l'UE Diascope, une carte des grands types de sols du domaine a été établie par G. Augé (1981), mettant l'accent sur la répartition de ces sols et leur distribution en relation avec la topographie et la distance aux cours d'eau : le Salaison et la Balaurie. Des travaux complémentaires plus localisés ont été menés pour préciser certaines propriétés des sols (Voltz, 1986). Récemment, dans la double optique de mieux connaître les propriétés des sols et d'installer la plateforme champ Diaphen sur des parcelles le moins hétérogène possible, des mesures des propriétés géophysiques des sols en surface ont également été réalisées par la société Géocarta). De plus, l'équipe du LISAH (Laboratoire d'étude des interactions sol- agrosystème – hydrosystème) Montpellier a été sollicitée pour associer toutes ces données à des propriétés physico-chimiques sur les secteurs pressentis pour accueillir la plateforme Diaphen. Une cartographie des zones de sol présentant des propriétés proches en termes de réserve utile pour chaque catégorie de sol a pu ainsi être obtenue. Cette cartographie est une aide précieuse pour positionner les expérimentations. Le sol reste un milieu difficile d'accès et variable dans quatre dimensions (trois dimensions spatiales et une dimension temporelle), et malgré toutes les précautions possibles, l'expérimentation peut être positionnée sur un sol « hétérogène ». La connaissance de cette variabilité permettra à terme de la traiter comme une co-variable pour l'interprétation des traits d'intérêt. La carte ci-dessous donne une représentation schématique des unités de sol décrites par G. Coulouma (pédologue au LISAH) sur les parcelles Diaphen sur Carignan et La Madone (G. Coulouma, 2012, 2013 et 2014) au travers de l'analyse des données de géologie, de résistivité, de fosses pédologiques anciennes et récentes, complétées par des transects de tomographie et des carottages.

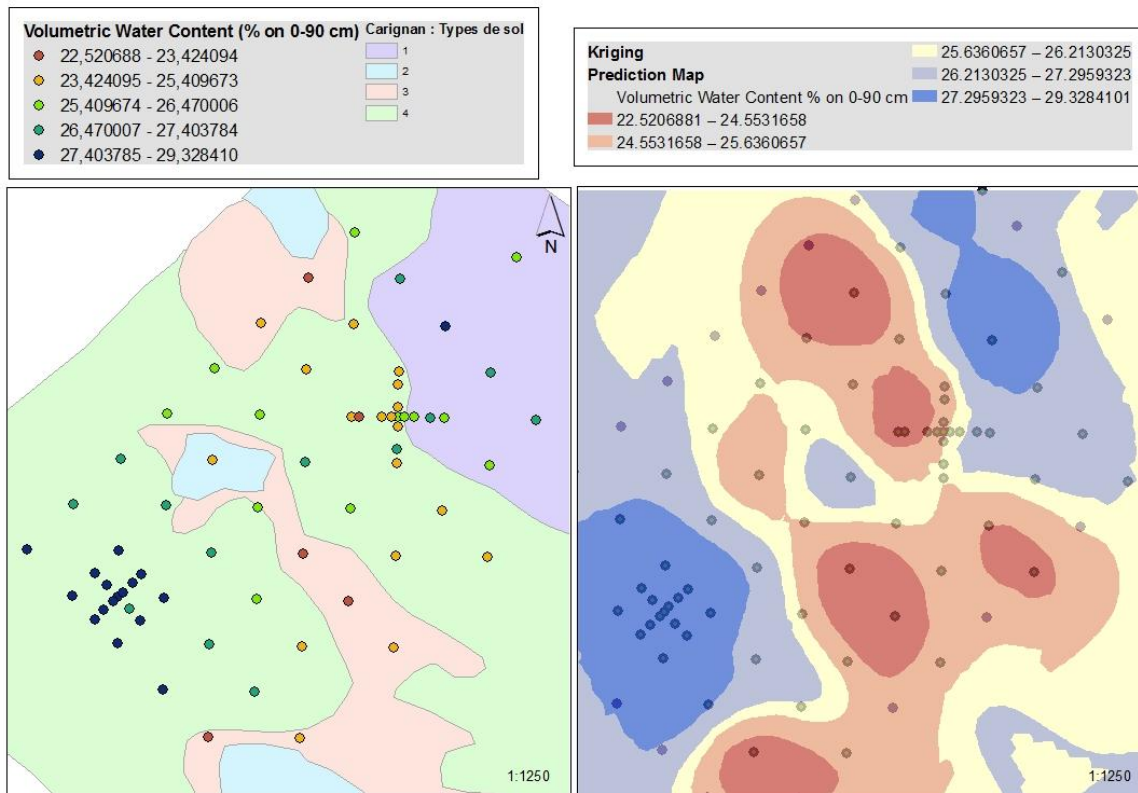
Représentation schématique des unités de sol sur Diaphen

**Carte 2.** Cartographie des grandes classes de sol sur Diaphen (d'après G. Coulouma, 2012 et 2014).

Au printemps 2015, une étude complémentaire a été réalisée pour connaître la variabilité spatiale de la teneur en eau à une date donnée (28 et 29 mars 2015) sur la zone Diaphen située sur Carignan. Soixante-dix points de prélèvement ont été identifiés sur la parcelle (maillage régulier de 20 m x 20 m, plus 2 crois pour la détection de variations plus fines). Le sol a été échantillonné sur 3 horizons (0-30 cm ; 30-60 cm et 60-90 cm) et les contenus gravimétrique et volumétrique en eau ont été calculés. A partir de ces données des modèles de prévision par krigeage simple (modèle stable sans anisotropie) ont été calculés à l'aide du module geostatistical analyst d'ArcGIS pour les teneurs en eau gravimétrique et volumétrique. La teneur en eau volumétrique de la parcelle est globalement assez homogène (**Tableau 1**). On remarquera que cette carte de prédiction se rapproche de la carte des sols (carte 2), mais qu'il existe également une variation intra type de sol. On retrouve la zone la plus humide au sud-ouest de la zone de sol caillouteuse de type 3, dont l'effet « barrière » à l'écoulement des eaux vers le Salaison est visible en ce début de printemps. On retrouve également une zone plus séchante sur l'ancien lit du Salaison.

Tableau 1. Teneur en eau volumétrique sur la parcelle Carignan10, 28-29 mars 2015, par horizon

Horizon	min	Max	moy	STD	Q1	Médiane	Q3
H1 (0-30)	21,78	29,78	24,99	1,72	23,80	24,89	25,92
H2 (30-60)	19,22	29,51	25,80	2,051	24,56	26,32	27,28
H3 (60-90)	22,61	32,88	27,88	2,36	25,87	27,75	29,56
<i>Moyenne/Hz</i>	22,52	29,33	26,22	1,513	25,18	26,34	27,40



Carte 3. Comparaison de la carte des classes de sol et des valeurs moyennes de teneur en eau du sol sur les 3 horizons du profil (0-90 cm) (à gauche) et de la carte de prédiction des teneurs en eau volumétrique obtenue par krigeage (à droite).

3. Choix des capteurs et disposition dans l'expérimentation

Sur Diaphen, l'objectif du suivi en temps réel de la teneur en eau des sols dans des essais soumis à des stress hydriques conséquents a éliminé les tensiomètres de la liste des outils de référence à cause de leur gamme de mesure trop limitée (0 à -0.7 bars). Ils y ont cependant une place pour l'information complémentaire qu'ils apportent. Nous avons opté pour l'utilisation de sondes capacitatives Enviroscan (marque Sentek) comme capteur de référence. Bien que présentant des biais liés d'une part au faible volume de sol exploré et d'autre part à la température du sol (Giot et Cousin, 2013) non mesurée par les « enviroscan », ces capteurs présentent l'avantage de pouvoir être installés depuis la surface, en insérant un tube dans le sol (sans creuser de fosse). Les capteurs, accrochés sur un support de sonde, peuvent être disposés verticalement tous les 10 cm, puis le support est enfilé dans le tube. Les valeurs collectées permettent d'obtenir des informations individuelles sur chaque capteur et de reconstituer les variations du stock en eau sur le profil en sommant les valeurs de chaque capteur. La mise en place annuelle permet de s'adapter au design expérimental et aux variations connues du sol. Leur installation / désinstallation n'est pas source de perturbation du sol, elles peuvent donc être installées au sein même des mico-parcelles expérimentales. Les inconvénients de ce type de sonde sont de deux sortes : temps d'installation/désinstallation et qualité de l'installation qui doit être excellente pour que les valeurs soient les moins biaisées possibles. La plateforme Agrophén a également opté pour ce type de capteur.

La plateforme Diaphen étant relativement grande (plus de 20 ha), elle recouvre plusieurs unités de sol : des sols sur alluvions du ruisseau du Salaison (sols de texture LAS, peu caillouteux en surface, avec une couche caillouteuse apparaissant dès 140 cm) et des sols rouges en position légèrement

surélevée par rapport aux autres sols, avec une charge caillouteuse très variable en surface et en profondeur (texture SAL, avec des taux d'argiles variables, pierrosité importante) et surtout la présence d'un horizon caillouteux très épais situé à une profondeur variable (Coulouma, 2012, 2013, 2014). Ces sols présentent des densités différentes (sur Carignan, les densités apparentes varient de 1,41 à 1,70 g/cm³ ; sur La Madone de 1,43 à 1,86 g/cm³) mais également des textures, des structures et une conductivité différentes, si bien que pour pouvoir obtenir des courbes de calibration le plus juste possible, il est nécessaire d'étalonner les capteurs pour chaque type de couple « sonde/sol », voire potentiellement chaque couple « capteur/horizon ».

Afin de pallier les biais liés à la variation de température dans le sol, des sondes de température sont positionnées dans le sol à -30 et -50 cm pour les 2 types de sol principaux (en sol rouge, et en sol alluviaux). Au niveau des sondes de température de sol, on dispose également des pluviomètres automatiques. L'ensemble des données est collecté par des centrales d'acquisition (Agribases) et ces dernières sont accessibles en temps réel sur le serveur dédié.

Au sein d'une expérimentation, nous implantons un minimum de 3 sondes par traitement hydrique si le sol est homogène, et 3 sondes par couple « type de sol x traitement hydrique » si le sol est hétérogène.

Références bibliographiques

Auge G (1981) Etude pédologique du domaine de Mauguio. DAA Science du sol et du bioclimat, ENSAM, Montpellier.

Colomb B, Debaeke P, Jouany C, Nolot J (2007) Phosphorus management in low input stockless cropping systems : Crop and soil responses to contrasting P regimes in a 36-year experiment in southern France. *Europ J Agron* 26 : 154-165.

GEOCARTA (2010, 2012, 2013, 2014) Rapports de géophysique, INRA Domaine de Mauguio.

Coulouma G (2012) Caractérisation des propriétés de sol de parcelles expérimentales, INRA Mauguio. Rapport d'expertise.

Coulouma G (2013) Géophysique appliquée à la caractérisation des propriétés du sol de parcelles expérimentales, Inra Mauguio. Rapport d'expertise.

Coulouma G (2014) Caractérisation des propriétés de sol de parcelles expérimentales, complément parcelle 4, INRA Mauguio. Rapport d'expertise.

Giot G, Cousin I (2013) Etalonnage des réflectomètres de teneur en eau CS616 pour la mesure de l'humidité du sol. Poster UR Science du Sol, INRA, Orléans.

Voltz M (1986) Variabilité spatiale des propriétés physique du sol en milieu alluvial. Thèse de Science du sol et du bioclimat, ENSAM, Montpellier.

Installation du dispositif de collecte et de transmission des données

Florence Meunier, Rémy Marandel, Guillaume Miglionico, Sébastien Fargier, Magalie Delalande

1- Les sondes capacitives

Le choix des instruments pour la mesure en continu de la variation de teneur en eau dans le sol, s'est porté sur les sondes capacitives Enviroscan de la marque australienne Sentek®. Ces sondes fonctionnent sur un principe de méthode électromagnétique : la mesure de la permittivité diélectrique du sol, décrit dans le paragraphe mesures indirectes du chapitre précédent.

Avantages

Ces capteurs permettent la réalisation de mesures peu invasives et non destructives sur une grande gamme de teneur en eau du sol. Connectables à des centrales d'acquisition, ils autorisent l'accès aux données en temps réel. Leur pose ne perturbe pas le sol, elle peut donc être réalisée après semis, les capteurs sont ainsi implantés directement au sein de la micro parcelle expérimentale.

Inconvénients

Les teneurs en eau délivrées par ce type de capteur peuvent dans certains cas être biaisées. Giot et Cousin (2013) ont montré l'influence de la température du sol sur les valeurs délivrées par un réflectomètre Campbell CS616. Ils ont montré également, dans le cas où la densité apparente du sol est supérieure à $1,5 \text{ g.cm}^3$, qu'une correction d'offset est indispensable pour améliorer la justesse des sondes.

D'autre part, La permittivité du sol peut être influencée par la texture, la structure et la conductivité du sol, il sera donc plus prudent, si l'on souhaite travailler sur des valeurs absolues (faire un bilan hydrique quantitatif par exemple), de réaliser un étalonnage pour chaque « couple » sondes/sol (voir « capteur/horizon »).

Enfin un dernier point important à garder en mémoire avec ces outils est que le volume de mesure des sondes est proportionnel à la taille des électrodes du capteur. En sol hétérogène, le problème de la représentativité de la mesure pourra être problématique et nécessitera de bien réfléchir à la stratégie de localisation des sondes pour représenter au mieux les variations du sol.

2-Installation des sondes

2.1 Comment est constituée la sonde capacitive ?

Une sonde capacitive (**Photo 1**) est composée d'un ensemble de capteurs capacitifs (qui peuvent mesurer soit uniquement la teneur en eau : capteur Enviroscan, soit la teneur en eau et en éléments minéraux : capteur Triscan) montés sur un support de sonde et connectés à une carte SDi12. Cette barrette de capteurs (neuf capteurs maximum soit une profondeur explorée de 90 cm, chaque capteur explorant 10 cm de sol) est introduite dans un tube en pvc, de diamètre extérieur de 60 mm, et connectée à une centrale d'acquisition. Dans notre cas nous avons choisi d'utiliser des « agribases », développées par la société française Agriscope®.

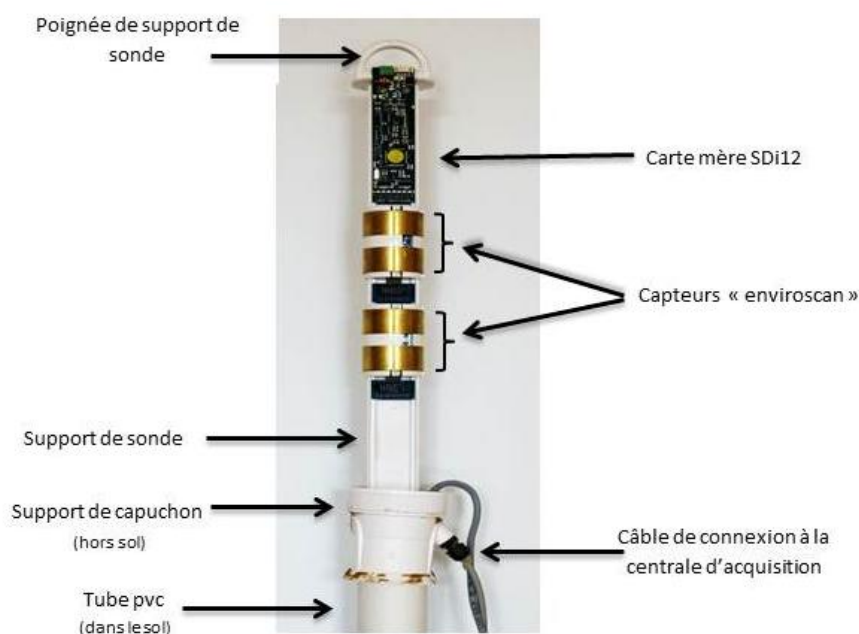


Photo 1. Eléments d'une sonde capacitive (Photo : M. Delalande).

Pour s'adapter au mode d'installation et au type de sol (notamment la présence ou l'absence de cailloux dans le profil) il existe deux types de bouchons et deux types de capuchons (**Photo 2**).

2.2- tubes, bouchons et capuchons

	Capuchons Le capuchon est la partie sommitale du tube. Il peut être situé au-dessus du sol (classique), affleurant (flat-cap) ou enterré (flat-cap) flat-cap (gauche) et classique (droite)
	Bouchons Le bouchon est la partie basale du tube. Semelle coupante « cutting-edge » (gauche) Semelle conique (droite)

Photo 2. Différents types de capuchons et de bouchons (photos : M. Delalande).

a) Tubes à bouchons coniques

L'utilisation de tubes à bout conique est préconisée dans des sols difficiles (présence potentielle de cailloux dans le profil). Deux méthodes d'insertion du tube dans le sol sont possibles : la **méthode manuelle** avec le kit tarière et la gouge adaptée au diamètre externe du tube, et la **méthode mécanisée** en utilisant un préleveur de sol qui permet de réaliser un pré-trou puis une finition manuelle avec le kit tarière adapté.

Il est important de poser le tube bien à la verticale. Dans la **méthode manuelle** la tarière est guidée grâce à un trépied muni d'un niveau à bulle et d'un guide vertical.

Pour que les valeurs des capteurs soient le plus juste possible, il faut veiller à ce que le contact soit le plus parfait possible entre le sol et le tube. Pour cela, après avoir creusé le sol, il faut tamiser la terre enlevée, puis l'humidifier afin d'obtenir une boue qui va être introduite dans le trou jusqu'à environ 70% de sa hauteur. Le tube est ensuite introduit dans le trou rempli de boue et enfoncé (à l'aide d'un percuteur en Téflon®) faisant ainsi remonter la boue contre les parois du tube, chassant l'air et assurant un bon contact entre le tube et le sol. Selon le capuchon utilisé on laissera ou non dépasser le tube hors du sol (5 cm au-dessus du sol pour le capuchon classique et la sortie des câbles au sommet du tube). Il suffit alors d'introduire la barrette de capteur dans le tube et de le refermer avec le capuchon. En cas d'utilisation d'un flat cap, le tube peut affleurer au niveau du sol. Il faut dans ce cas veiller à bien insérer le flat cap dans la découpe dédiée au sommet du tube pour en assurer l'étanchéité.

b) Tubes avec semelle coupante (cutting edge)

Ce type de tubes est à réserver aux sols souples sans cailloux. L'idée est d'enfoncer le tube dans le sol grâce à la semelle coupante dont il est équipé à la base, et de retirer la terre par l'intérieur du tube.

Méthode manuelle. Cette méthode nécessite l'installation du trépied pour une pose bien verticale du tube, et l'utilisation de la petite tarière (celle dont le diamètre est égal au diamètre intérieur du tube PVC). Avec la tarière, prélever 10 cm de sol puis positionner le tube dans le guide et l'enfoncer dans le sol en utilisant le percuteur téflon et le maillet. Insérer la tarière à l'intérieur du tube, prélever de nouveau environ 10 cm de sol, et ainsi de suite, jusqu'à ce que le tube ne dépasse plus que de 5 cm de la surface du sol (si capuchon classique). Remplacer alors la gouge par un goupillon et nettoyer l'intérieur du tube (résidus de terre). Remplacer le goupillon par le visse-bouchon et accrocher y le bouchon bloquant. Insérer le bouchon dans le tube et visser légèrement pour écraser le caoutchouc et le descendre jusqu'au fond du tube. Visser à l'aide du visse-bouchon jusqu'à ce qu'il ne puisse plus bouger (pour assurer l'étanchéité). La pose de la barrette de capteur et du capuchon est identique au cas précédent.



<= La gouge est introduite dans le tube pvc. Un marquage tous les 10 cm est réalisé sur le tube avec de l'adhésif, pour guider la profondeur d'enfoncement du tube avec le maillet et le Téflon®.



Goupillon pour nettoyage intérieur du tube pvc



bouchon étanche



<= insertion du
bouchon
sur le visse
bouchon

Visse bouchon

Photos 3,4,5,6,7 : M. Delalande

Avantages de la semelle coupante par rapport au bouchon conique :

- le tube étant enfoncé par la force dans le sol, le contact tube/sol est optimal,
- la texture et la structure du sol au contact du tube ne sont pas dénaturées comme c'est le cas lorsqu'on réalise une boue.

Inconvénient : impossible à installer dans un sol caillouteux .

2.3 - Utilisation d'un préleveur de sol pour faciliter la pose des tubes

La méthode manuelle peut rapidement s'avérer pénible et longue à mettre en œuvre. L'utilisation d'un préleveur de sol pour réaliser les pré-trous s'avère rapidement rentable. Le principe est de réaliser un avant trou avec le préleveur de sol muni d'une gouge de diamètre égal au diamètre intérieur du tube, puis de procéder comme dans la méthode manuelle. La difficulté dans ce cas est de bien gérer la verticalité du pré-trou et celle du trépied avec le guide d'enfoncement du tube. A Toulouse, Jean-François Lievin, Didier Campergue et Rémy Marandel ont aménagé le préleveur de sol (photos 9 et 10) avec un guide fixé sur la base du préleveur permettant de conserver le même axe lors du carottage et de la pose du tube. De plus, des bouchons à semelles coupantes sont collés au fond du tube, permettant d'utiliser la force du préleveur pour insérer le tube dans le sol (à l'aide d'une barre en fer plein prenant appuis au fond du tube, poussé par la tête du préleveur).

Précautions pour l'installation : la pose des sondes s'effectue une fois les cultures levées (stade plantule). Il est impératif de limiter le piétinement autour de la sonde et de préserver la micro-parcelle expérimentale intacte (sans détruire ni endommager les plantules aux environs de la sonde). Dans une culture de maïs dont l'inter-rang est de 80 cm, il est relativement aisé de travailler sans abîmer les plantules, par contre dans un essai de type blé, avec un inter-rang d'environ 15 à 20 cm, il faut trouver des solutions pour ne pas piétiner les plantules [pose de planches au sol, aménagement d'une plateforme suspendue sur le préleveur de sol (**photo 10**)].



<=

Photo 8. On peut **guider la gouge à la main** pour un début d'insertion bien vertical. Cette méthode nécessite d'être très précautionneux (et très prudent) quand à l'alignement du bras de levage du préleveur (photo : M. Delalande).

=>

Photo 9. Pour limiter le tassement des cultures une **plateforme suspendue** a également été fabriquée à Toulouse et permet de supporter plus de 200 kg de charge (deux techniciens en plus du matériel) (photo R. Marandel).





Photo 10. Pose de tubes sans tassement des cultures (ici, du blé, à Auzeville) (Photo : R. Marandel).

2.4 Etalonnage des capteurs

Les capteurs capacitifs sont programmés avec une équation de calibration calculée pour un sol « moyen ». Utilisés avec cette calibration, il est possible de suivre les variations de l'état hydrique du sol « en relatif ». Mais la comparaison directe entre valeurs issues des différents capteurs est difficile.

Pour un travail sur des valeurs absolues, il est nécessaire d'établir une courbe de calibration des capteurs dans nos propres sols. Pour cela, Sentek propose une méthode assez rapide, précise mais destructrice : pose de 2 fois 3 sondes en situations contrastées - humide, sèche et intermédiaire - acquisition de données puis gravimétrie via des fosses autour des sondes. Nous avons adopté une démarche similaire, non destructrice, moins précise, qui s'appuie sur les variations naturelles de la teneur en eau du sol, pour étalonner nos capteurs. Nous disposons une série de quatre tubes par type de sol, séparés de 2 m minimum. Une seule sonde est nécessaire pour chaque série de tube. Les valeurs acquises sont scrutées au quotidien, et en fonction de la météo et des valeurs lues, quatre mesures gravimétriques sont réalisées sur des échantillons de sol non remaniés collectés avec le préleveur de sol le plus près possible du tube. La zone prélevée devient alors impropre aux mesures capacitives. Nous déplaçons alors la sonde dans le tube suivant qui se trouve à une distance telle que le mouvement de l'eau dans le sol n'est pas impacté par les prélèvements précédents réalisés. Des valeurs de teneur en eau et de gravimétrie sont ainsi collectées à quatre dates, correspondant à quatre niveaux d'humidité pondérale (transformable en humidité volumique puisque nous connaissons les densités de sol sur ces parcelles). Les valeurs de la sonde sont alors converties en Scale Frequences (SF) selon la formule

$$SF = (F_A - F_S)/(F_A - F_W)$$

Avec les valeurs de calibration initiales F_A = fréquence dans l'air, F_W = fréquence dans l'eau, et F_S = fréquence de la valeur mesurée dans le sol.

Une courbe est alors tracée entre les valeurs de teneur en eau volumétrique en abscisses et les SF en ordonnées, afin d'établir la courbe de régression non linéaire de type $Y = A \times (X^B + C)$ [similaire à l'équation par défaut].

Lorsque les coefficients A, B et C seront déterminés, il sera possible soit d'entrer ces coefficients dans les capteurs afin de pouvoir lire en temps réel les valeurs calibrées, soit laisser les coefficients A, B et C de l'équation par défaut dans les capteurs, et calculer les valeurs calibrées en différé. Cette seconde méthode présente plusieurs avantages : i) la gestion de nombreux capteurs ayant une seule équation est plus simple que la gestion de capteurs ayant chacun une équation différente, ii) les coefficients vont pouvoir être affinés au cours du temps par densification de la courbe de calibration, il sera alors possible de recalculer les valeurs avec une précision accrue en fin d'expérimentation si elle est pluriannuelle.

Référence

Sentek technologies. Calibration manuel for Sentek Soil Moisture Sensors, version 2.0.

3- Données : de la transmission à la consultation

3.1- Centrale d'acquisition

Les Agribases sont les centrales d'acquisitions choisies par Toulouse et Montpellier. Elles sont développées par la société française Agriscope®, basée à Montpellier. Plusieurs versions d'Agribases existent à ce jour, de la plus simple, ne possédant que deux entrées SDI12, jusqu'à la version la plus complète, également équipée d'entrées Courant, Tension, Compteur, Résistance, etc. On peut compter jusqu'à 14 entrées par Agribase.

Les Agribases sont disponibles avec des tensions d'alimentations en version 6 V ou 12 V.

A Mauguio, le choix s'est porté sur une alimentation de 6 V à partir de piles en série. L'autonomie du système, assez élevée, ne demande que peu d'intervention. Un suivi de l'état des piles est disponible via le webservice.

A Toulouse, c'est la version 12 V qui a été retenue. Le site étant clos, donc peu sensible aux vols et dégradations, des panneaux solaires ont pu être installés. Connectés à des batteries en plomb rechargeables, ils permettent de gagner en autonomie (aucune intervention).

En version SDI12, la mémoire de la centrale limite le nombre de capteurs connectés à 50 « éléments » comprenant les adresses mères et filles. Une limitation à trois adresses mères et neuf adresses filles par adresse mère laisse néanmoins une certaine liberté. Ainsi on pourra connecter au maximum trois sondes équipées de neuf capteurs chacune $((9+1)*3 = 30)$.

La fréquence d'échantillonnage est fixe (15 min) et les données sont émises par radio (868 MHz, 500 mW) jusqu'à une passerelle internet. Les données, qu'elles proviennent de Toulouse ou de Montpellier, sont hébergées sur un serveur INRA à Montpellier. Elles sont consultables en temps réel en ligne via le web service d'Agriscope® grâce à un compte propre à chaque utilisateur.

Les Agribases sont placées en bord de micro-parcelle, sur un mât de 1 m ou 2 m suivant le type de culture, afin que la portée de l'antenne soit maximale. Les nouvelles Agribases (2016) possèdent une antenne déportée, ce qui permet de laisser les centrales sur les petits mâts – facilitant le travail de maintenance – tout en disposant l'antenne émettrice en hauteur, au-dessus des cultures.

Une coordination avec le personnel intervenant dans les champs pour la réalisation des itinéraires techniques est de mise pour réaliser un positionnement pertinent qui limite les manipulations sur les centrales ou les antennes et pour éviter les dégâts lors du passage des outils dans les parcelles.



Photo 11. Agribase équipée d'un panneau solaire, localisée en bord de micro-parcelle à Toulouse (photo : R. Marandel).

3.2 - Accès aux données : temps réel et différé

L'accès aux données issues des capteurs connectés se fait via internet, à travers le logiciel serveur d'Agriscopes®, installé à l'INRA de Montpellier et dédié exclusivement aux données INRA. Agriscopes Serveur permet deux modes de connexion : mode Administrateur et mode Utilisateur.

a) Mode Administrateur

Ce mode permet : i) La gestion des utilisateurs (création et suppression des utilisateurs, attribution des droits de consultation sur les agribases) et ii) la configuration des agribases (déclaration des capteurs présents, nom et type des capteurs, profondeur de positionnement, éventuellement position GPS de l'agribase). Le système admet plusieurs administrateurs : chaque plateforme peut ainsi gérer ses propres utilisateurs et ses propres configurations.

Bien entendu, le mode Administrateur permet également de réaliser toutes opérations du mode Utilisateur

b) Mode Utilisateur

Les utilisateurs, où qu'ils soient localisés, ont accès en temps réel aux valeurs collectées par les capteurs, pour peu qu'ils aient accès à une connexion internet.

Les données peuvent être consultées et/ou importées (en CSV, TXT ou SDB : format propriétaire de Sentek pour l'envoi des valeurs dans leur logiciel IRRIMAX). Bien entendu les utilisateurs peuvent également faire des interrogations en temps différé, mais uniquement sur les essais en cours.


 magalie
 clore la session

Dernières données reçues

Indicateurs

Accueil

Editeur
D'indicateurs

Batteries

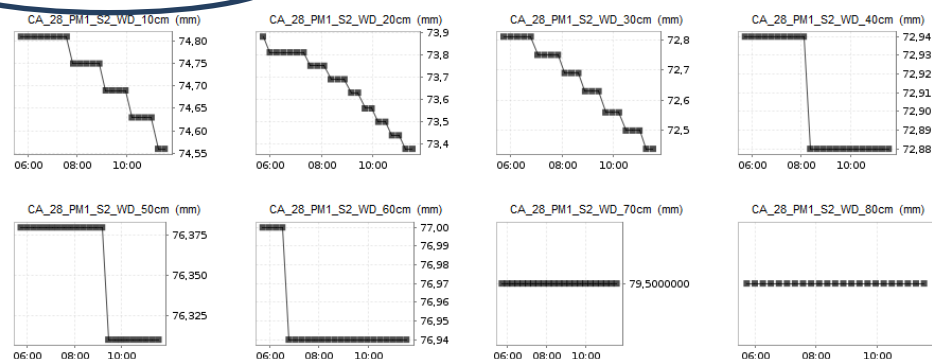
Alertes

Rapports

Résumé Météo

Agribase	Active	Temp réel Hygrométrie	Temp réel Pluvio du jour	Temp réel Température	Temp réel Vitesse du vent	Temp réel Rafale vent	Hier Pluvio	Hier T° min	Hier T° max	Hier Ray. Global
*S01110 *	✓	0.0 %	0.0mm	0.0 °	0.0km/h	0.0km/h	0.0mm	0.0°C	0.0°C	0.0Mj/m²
*S01111 *	✓	0.0 %	0.0mm	0.0 °	0.0km/h	0.0km/h	0.0mm	0.0°C	0.0°C	0.0Mj/m²
*S01112 *	✓	0.0 %	0.0mm	0.0 °	0.0km/h	0.0km/h	0.0mm	0.0°C	0.0°C	0.0Mj/m²
*S01113 *	✓	0.0 %	0.0mm	0.0 °	0.0km/h	0.0km/h	0.0mm	0.0°C	0.0°C	0.0Mj/m²
*S01117 *	✓	0.0 %	0.0mm	0.0 °	0.0km/h	0.0km/h	0.0mm	0.0°C	0.0°C	0.0Mj/m²
*S01118 *	✓	0.0 %	0.0mm	0.0 °	0.0km/h	0.0km/h	0.0mm	0.0°C	0.0°C	0.0Mj/m²
*S01119 *	✓	0.0 %	0.0mm	0.0 °	0.0km/h	0.0km/h	0.0mm	0.0°C	0.0°C	0.0Mj/m²
*S01120 *	✓	0.0 %	0.0mm	0.0 °	0.0km/h	0.0km/h	0.0mm	0.0°C	0.0°C	0.0Mj/m²
*S01121 *	✓	0.0 %	0.0mm	0.0 °	0.0km/h	0.0km/h	0.0mm	0.0°C	0.0°C	0.0Mj/m²
*S01122 *	✗	0.0 %	0.0mm	0.0 °	0.0km/h	0.0km/h	0.0mm	0.0°C	0.0°C	0.0Mj/m²
*S01123 *	✓	0.0 %	0.0mm	0.0 °	0.0km/h	0.0km/h	0.0mm	0.0°C	0.0°C	0.0Mj/m²

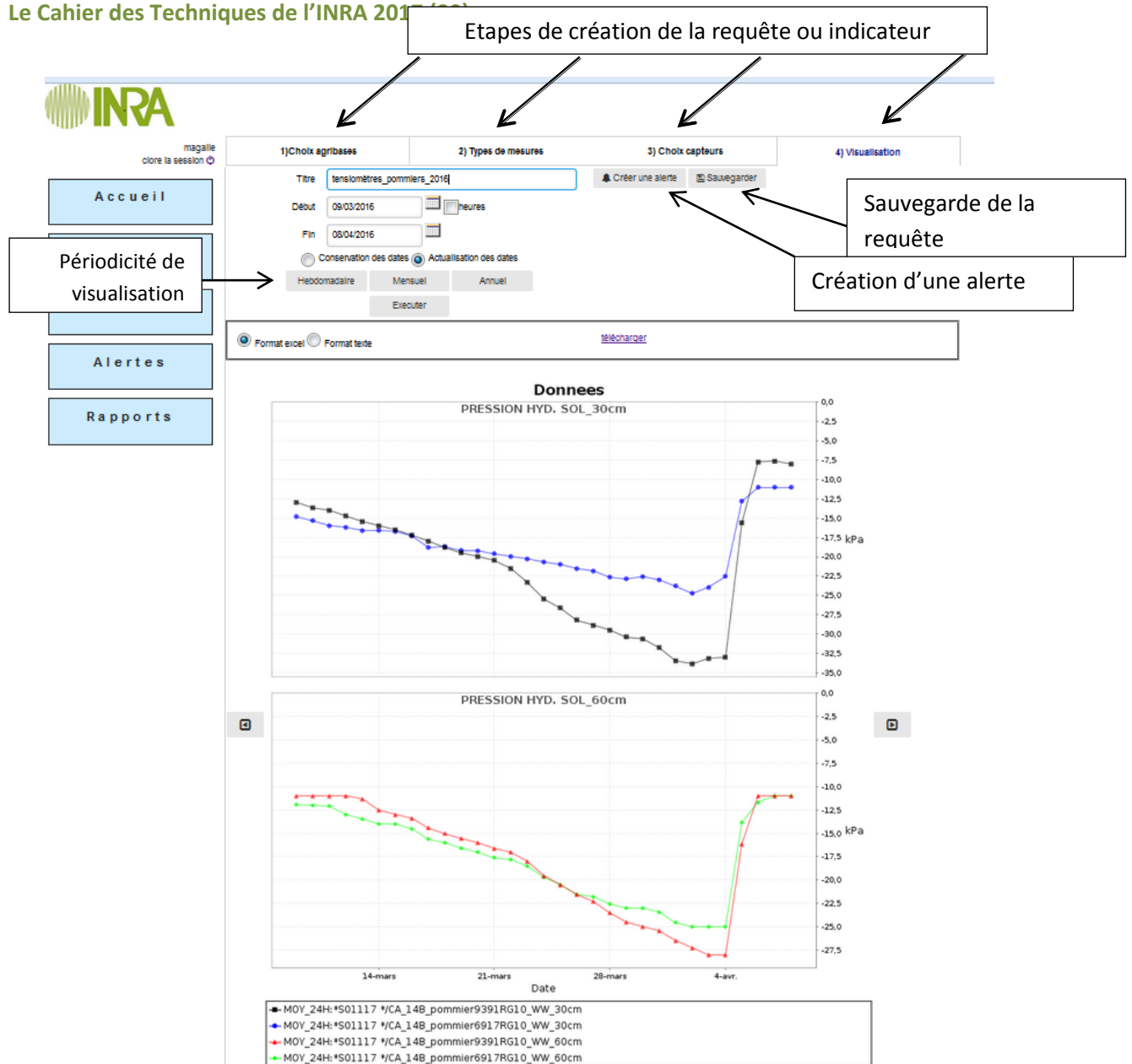
*S01110 *(1110) active il y a 10 minutes(s)



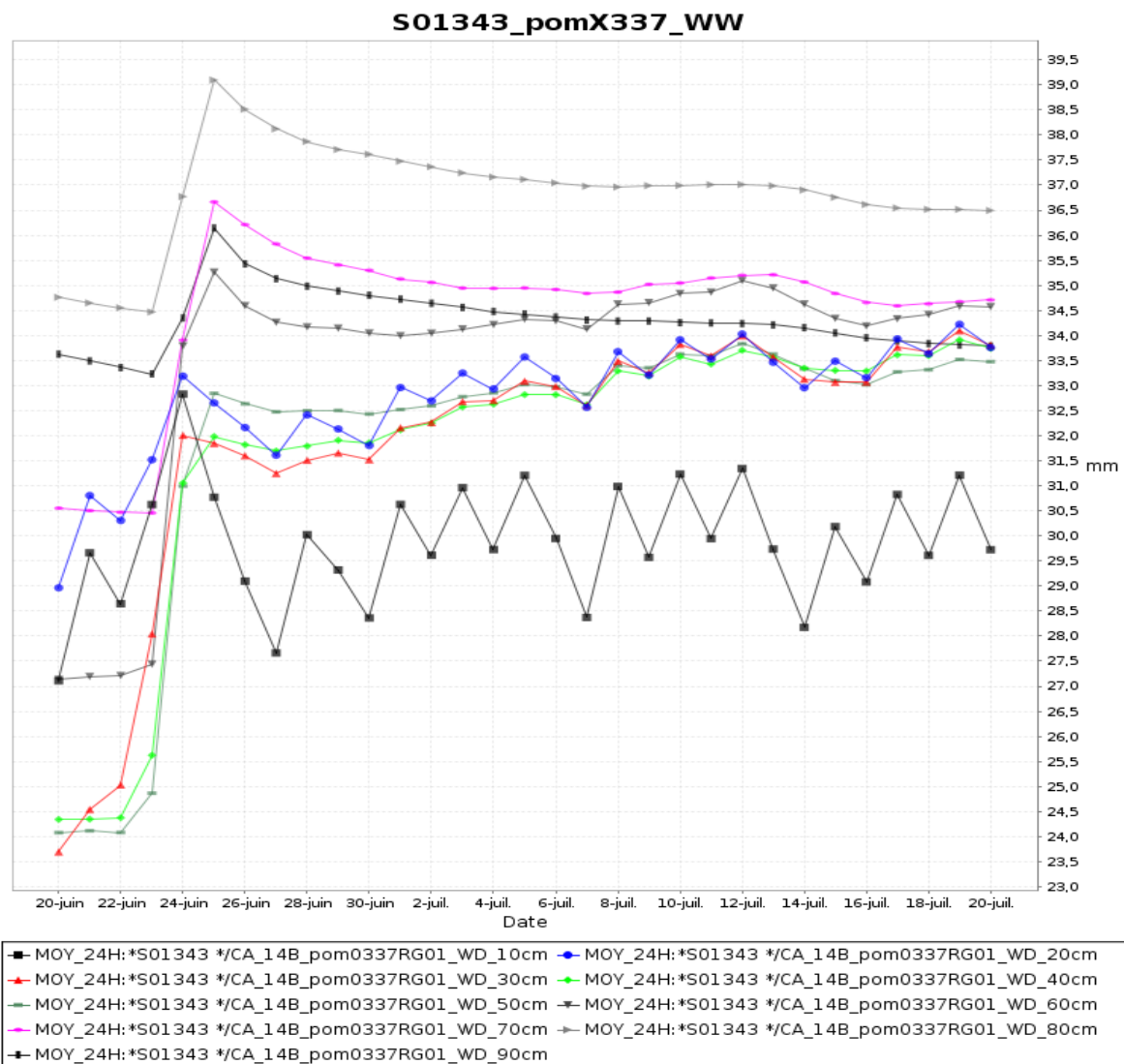
*Vue de la page d'accueil utilisateur de l'agriscope serveur INRA. Sur cette page, dans l'onglet **dernières données reçues**, on trouve la liste des agribase consultables par cet utilisateur ainsi qu'un aperçu de l'activité des capteurs sur les 4 dernières heures (ici pour la 1^{ère} agribase de la liste).*

Chaque utilisateur peut sauvegarder ses propres requêtes. Les requêtes sont éditables pour pouvoir paramétrer la consultation des données sur des pas de temps divers (hebdomadaire, mensuel, annuel, ou sur une période donnée). Elles peuvent être regroupées par catégories et un assistant à la création d'indicateur est disponible.

Une page **Editeur d'indicateur** permet de créer les requêtes (ou indicateurs) : on y choisit le *type des mesures* (teneur en eau, tension en eau, pression en eau, pluviométrie, température...selon les capteurs connectés), les *données à visualiser* (par capteur individuel ou cumul de capteurs sur le profil), le type de données (brutes, moyennes horaire ou quotidienne). Après avoir déterminé la *visualisation* la plus pertinente la requête peut être sauvegardée. On peut à ce moment décider de créer une alerte.



Exemple de visualisation de données **tensiométriques** (exprimées en pression hydrique) sur une expérimentation de pommier à Mauguio : ici le suivi de deux arbres, chacun étant équipé de deux tensiomètres (à -30 cm et -60 cm) : on remarque que l'eau dans le sol était de moins en moins facilement accessible aux arbres entre le 9 mars et le 4 avril. La courbe (ainsi que la facilité d'accès à l'eau) remonte suite à la pluie du 4 avril.



Exemple de visualisation des données issues d'une sonde composée de 9 capteurs capacitifs enviroscan® disposés entre -10 et -90 cm, sur des pommiers pour lesquels un apport d'irrigation est réalisé en période estivale. On voit nettement le rythme de 3 apports par semaine sur les capteurs positionnés à -10 et à -20cm. Cet apport demeure perceptible sur les capteurs à -30 et -40 cm, et on note par ailleurs que la quantité d'eau disponible auprès du génotype X0337 est en augmentation du 27 juin au 12 juillet. Cette augmentation se fait sentir jusqu'aux capteurs positionnés à -70cm. En début de graphe on peut observer l'impact d'une pluie de 19 mm sur les capteurs : sur un sol régulièrement alimenté en eau, cette pluie a pu pénétrer jusqu'au capteur le plus profond (-90cm)

Même si la visualisation des données est aisée et rapide par le biais de requêtes, il est vite fastidieux de se connecter chaque jour pour suivre les évolutions quotidiennes des teneurs en eau de chaque outil. Le serveur offre une possibilité d'alerte sur seuil très pratique qui permet d'être averti pour chaque mouvement important d'un capteur. L'alerte peut être transmise par sms ou mail.

Il est également possible de demander l'émission d'un rapport automatique par mail, sur la fréquence sélectionnée pour l'actualisation de la requête.



florence
clôturer la session

Accueil

Editeur
D'indicateurs

Batteries

Alertes

Rapports

1) Choix agrisbases

2) Types de mesures

3) Choix capteurs

4) Visualisation

Titre

pommiers_30cm

Créer une alerte

Sauvegarder

Début

01/03/2016

heures

Fin

08/04/2016

Conservation des dates

Actualisation des dates

Hebdomadaire

Mensuel

Annuel

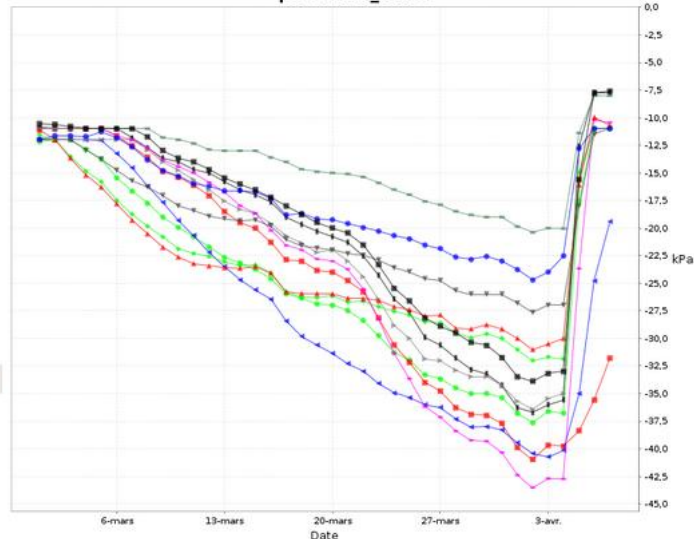
Exécuter

Format excel

Format texte

Télécharger

pommiers_30cm



MOY_24H:*S01117*/CA_148_pommier9391RG10_WW_30cm
MOY_24H:*S01117*/CA_148_pommier6917RG10_WW_30cm
MOY_24H:*S01118*/CA_148_pommier9179RG10_WW_30cm
MOY_24H:*S01118*/CA_148_pommier8416RG10_WW_30cm
MOY_24H:*S01119*/CA_148_pommier0337RG08_WW_30cm
MOY_24H:*S01119*/CA_148_pommier8717RG08_WW_30cm
MOY_24H:*S01120*/CA_148_pommier0342RG01_WD_30cm
MOY_24H:*S01120*/CA_148_pommier0337RG01_WD_30cm
MOY_24H:*S01121*/CA_148_pommier9179RG05_WD_30cm
MOY_24H:*S01121*/CA_148_pommier9190RG05_WD_30cm
MOY_24H:*S01123*/CA_148_pommier8705RG03_WD_30cm
MOY_24H:*S01123*/CA_148_pommier8717RG03_WD_30cm

makeAnAlert

Agriscope 2007-2017, droits réservés

Exemple de rapport mensuel: valeurs des 12 tensiomètres positionnés à -30 cm dans la collection pommiers. L'impact de la pluie (17mm) des 4 et 5 avril est immédiat sur les valeurs relevées par les tensiomètres à cette profondeur.

Gestion des données à court, moyen et long terme

Magalie Delalande

Pour assurer la fiabilité données collectées et leur gestion à différents termes, le traitement des données extraites du serveur Agriscope/INRA va suivre trois grandes étapes :

- ✓ nettoyage et sauvegarde à court terme des données,
- ✓ rangement, sauvegarde et accessibilité les données à court et moyen terme,
- ✓ préparation à l'archivage pour le long terme.

Les données reçues sur le serveur Agriscope/INRA permettent la consultation des valeurs des capteurs environnementaux et la création de certains graphiques prédéfinis (personnalisable par chaque utilisateur) en temps réel. Au-delà de la durée de l'expérimentation, il est important que les données soient extraites du serveur afin d'être dans un premier temps sauvegardées et transmises aux équipes de recherche, puis dans un deuxième temps archivées.

1- Nettoyage et sauvegarde à court terme des données

Lors de l'extraction des données, les valeurs issues des capteurs sont identifiées par leur date+heure de mesure et une codification du capteur (notamment sa profondeur). Mais il n'y a pas de référence immédiate à l'expérimentation sur laquelle elles ont été collectées. La première étape après l'extraction consiste donc à raccrocher les données à une expérimentation par exemple BFF_sorgho_2017_WW et BFF_sorgho_2017_WS pour les données issues des essais du programme BFF sur le sorgho en 2017 respectivement en modalités de confort hydrique et de stress hydrique. Cette information est stockée uniquement dans le nom du fichier Excel.

Une fois les fichiers correctement identifiés, la deuxième étape consiste à « nettoyer » les données. La fréquence théorique d'acquisition des données est de 15 min. Une vérification de l'intervalle réel entre les mesures va permettre de repérer les données éventuellement manquantes ainsi que des doublons et d'ajuster (ou non) ces données en tenant compte des mouvements des valeurs sur ces périodes particulières. Cette phase nécessite une connaissance experte de l'expérimentation et des capteurs. Les données aberrantes (00000 ou 99999) sont également supprimées.

Les données identifiées et nettoyées peuvent, dans un premier temps, être conservées au format .xls ou .csv.

2- Ranger, sauvegarder et rendre accessibles les données à court et moyen terme

Une base de données a été créée afin d'assurer la sauvegarde des valeurs issues de l'ensemble des capteurs environnementaux (principalement des sondes capacitives, mais également des sondes températures, pluviomètres ainsi que tout autre capteur connecté à une agribase). La base de données, dont les tables ont été créées sous phpMyAdmin, est adossée à un site web pour en faciliter l'utilisation lors des opérations courantes (sans avoir recours à la création de requêtes SQL).

Ce site web propose des menus pour gérer les équipements (capteurs et centrales d'acquisition), constituer les sondes capacitives (en indiquant les x capteurs positionnés sur le support de sonde et identifier la profondeur de chaque capteur), créer des groupes de capteurs en indiquant l'ensemble des capteurs (température, pluviométrie, rayonnement...) et des sondes regroupées sur une même centrale d'acquisition, déclarer les expérimentations et affecter des centrales d'acquisition et des

groupes de capteurs à des expérimentations. Lorsque les groupes de capteurs et les sonde capacitatives sont constitués, les capteurs ne sont plus disponibles. Il est ainsi possible de connaître en temps réel le stock de capteurs et de centrales d'acquisition disponibles.

Lorsque les données extraites des centrales ont été nettoyées, elles peuvent être envoyées dans la base, sans modification du format de fichier obtenu lors de l'extraction, ce qui limite considérablement les risques d'erreurs. L'expérimentation ayant été déclarée avant la mise en place des capteurs, le codage du capteur et la référence date+heure de la valeur (extraite) sont nécessaires et suffisants pour une identification unique des données dans la base.

Il est ensuite possible d'extraire rapidement et exhaustivement l'ensemble des données collectées au cours des 2,3... ou 7 ans d'un projet, par simple requête sur les capteurs ayant été connectés sur une centrale d'acquisition affectée à un projet (PIA Biomass For the Future -BFF- par exemple).

L'expérimentation étant elle-même localisée sur une sole du parcellaire, il est également possible d'extraire l'ensemble des capteurs ayant été localisés sur une parcelle. Les données en entrée sont les données « brutes » (sortie des capteurs) après simple nettoyage des données doublons/aberrantes. Les données des sondes capacitatives sont issues de la courbe de calibration fabricant, non recalculées par nos propres courbes de calibration. Cette opération se fera dans un premier temps manuellement puis dans un deuxième temps une automatisation pourra être envisagée et les données ainsi calibrées pourront être stockées dans une table spécifique.

La base gère également la métrologie des capteurs. C'est-à-dire qu'il est possible de savoir quels capteurs ont été affectés à quelles expérimentations, et ce tout au cours de la durée de vie des capteurs. La traçabilité sur la calibration est également gérée.

Il est bien sûr possible de créer ses propres requêtes en langage SQL.

Deux options de développement sont envisagées : le couplage avec le SIG qui contient la géolocalisation des sondes, et la gestion des différentes équations de calibration qui sont en cours de développement sur la plateforme.

3- Préparer à archiver pour long terme (PHENOME)

Au-delà de la conservation active des données, un archivage doit être organisé sur le long terme. Il sera mis en place dans le cadre du PIA Infrastructure PHENOME (<https://www.phenome-fppn.fr/>).

Conclusion

La journée technique du 3 octobre 2014 à Mauguio a permis de dégager les points essentiels quant à la mesure de l'eau dans le sol et au suivi de l'état hydrique par capteurs des expérimentations :

1- Choisir un capteur de mesure de l'eau du sol c'est d'abord :

- Définir précisément la question que l'on se pose.
 - Veut-on **quantifier** un **stock d'eau** sur une profondeur de sol ?
 - Veut-on **localiser** et **quantifier** un **stock d'eau**, **analyser les flux**, **mesurer l'eau disponible** ?
 - Veut-on suivre des **variations du stock d'eau** au cours d'un cycle de culture (pilotage irrigation) ?
 - Veut-on **analyser des processus**, comprendre le **fonctionnement hydrique** d'un sol (remontées capillaires, écoulement préférentiel...) ?

- Définir la **précision attendue** de la mesure (en mm) et la **gamme de variation** à mesurer.
- Définir l'**échelle de travail** (échelle du profil ou par horizon, à l'échelle de la parcelle /micro-parcelle) pour réfléchir aux nombres de capteurs à mettre en place
- Définir la **fréquence des mesures** pour réfléchir au mode d'acquisition des mesures (manuel, automatisé).
- **Connaître et mobiliser quelques propriétés du sol** dans lequel on souhaite effectuer les mesures (variabilité spatiale texture et profondeur, éléments grossiers, densité apparente (masse volumique), humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement).

2- Il est très important de procéder à l'étalonnage du capteur dans la parcelle par rapport à une méthode de référence sur une gamme d'humidités représentative des conditions de l'expérimentation. Les courbes de calibration fournies par les constructeurs sont insuffisantes car non adaptées aux types de sol des parcelles expérimentales. Les méthodes à mettre en œuvre dépendent de la technologie utilisée.

Au final cette journée a permis :

- ✓ d'entamer une réflexion sur la faisabilité de la création d'un banc d'étalonnage utilisable par les UE pour les capteurs effectuant des mesures électromagnétiques ou diélectriques (qui mesurent une permittivité électrique : TDR, FDR, capacitif) ;
- ✓ de faire le point sur les capteurs disponibles pour la mesure de l'eau du sol avec leurs atouts et contraintes ;
- ✓ de créer du lien entre agents intéressés par la problématique et initier des échanges et transfert de compétence entre unités ;
- ✓ d'ouvrir le serveur agriscope INRA aux autres unités intéressées ;
- ✓ de faire partager la base de données Capteurs aux autres unités intéressées.