

PILOTAGE DE L'IRRIGATION À LA PARCELLE BASÉ SUR L'UTILISATION DE SONDES CAPACITIVES DE MESURE DE L'EAU DANS LE SOL



PROGRAMME DE FORMATION POUR LES IRRIGANTS

Octobre 2025

SOMMAIRE

1. Introduction	1
2. Principes de base	2
2.1. Teneur en eau du sol	2
2.2. Besoins en eau des cultures	3
2.2.1. Eau stockée dans le sol	3
2.2.2. La pluie efficace	4
2.2.3. L'irrigation	4
2.3. Influence des conditions météorologiques	4
3. Équipements de mesure de l'eau dans le sol	6
4. Composants et architecture	11
4.1. Composants d'un point de contrôle type	11
4.1.1. Capteurs	11
4.1.2. Dataloggers	12
4.1.3. Compteur volumétrique	12
4.2. Technologies de communication : <i>Internet des objets</i>	13
5. Station de contrôle ou de mesure	18
5.1. Choix de l'emplacement	18
5.2. Installation des capteurs dans le profil du sol	19
5.3. Mise en service des points de contrôle	21
5.4. Plateformes et accès aux données	21
5.5. Entretien	21
5.6. Avantages des capteurs d'humidité du sol	22
6. Interprétation des données pour le pilotage de l'irrigation	22
6.1. Notions préalables	23
6.2. Comment irriguer	28
7. Résumé	30

1. Introduction

En Espagne, 70 % de l'eau utilisée est destinée à l'agriculture. Les grandes surfaces agricoles d'Espagne se trouvent généralement dans des zones au climat semi-aride présentant un bilan hydrique naturel négatif. L'apport d'eau d'irrigation est donc nécessaire pour obtenir des rendements optimaux. Le changement climatique, avec le réchauffement global et la modification du régime des précipitations, a rendu plus difficiles les conditions de l'agriculture en Espagne. L'augmentation de la température modifie les cycles des cultures, en les allongeant dans certains cas, et accroît les besoins en eau instantanés des cultures pour assurer leurs fonctions physiologiques. Cette augmentation des besoins en eau de l'agriculture s'accompagne d'une diminution des réserves en eau. Les épisodes prolongés de sécheresse, la diminution des réserves d'eau sous forme de neige, l'absence de gestion de forêts de plus en plus consommatrices d'eau, la surexploitation et le manque de contrôle des aquifères, la concurrence pour la ressource avec d'autres secteurs économiques et les exigences de préservation des milieux aquatiques ont entraîné une diminution significative de la qualité et de la disponibilité de l'eau dans les réservoirs où nous la stockons pour les différents usages : les barrages-réservoirs et les aquifères.

C'est pourquoi une utilisation efficace et efficiente de l'eau dans le secteur de l'irrigation est essentielle pour maintenir la production alimentaire et préserver le bon état écologique des milieux naturels liés à l'eau, tout en adaptant le secteur à une disponibilité en eau réduite du fait du changement climatique et des autres usages.

Les technologies numériques permettent d'améliorer les processus et la gestion propres aux exploitations agricoles. Il existe aujourd'hui une large offre commerciale de technologies numériques très matures qui permettent de gérer, voire de piloter, efficacement l'irrigation à la parcelle pour un coût de plus en plus faible. Ces technologies permettent d'accroître l'efficacité de l'utilisation de l'eau, la ressource la plus critique pour l'agriculture dans les zones soumises à la pénurie. Elles permettent aux agriculteurs d'optimiser leurs ressources en eau, en améliorant la productivité des cultures et en réduisant l'impact que l'activité agricole peut avoir sur l'environnement.

Ce document du programme de formation pour les agriculteurs du projet *Smart Green Water* présente les notions fondamentales pour apprendre à gérer l'irrigation à l'échelle de la parcelle à partir de capteurs numériques de mesure de la teneur en eau du sol. Ces capteurs permettent de programmer l'irrigation en réduisant au minimum les pertes d'eau et en maintenant la zone racinaire à un niveau d'hydratation optimal qui ne compromette pas le rendement de la culture.

2. Principes de base

2.1. Teneur en eau du sol

Ce chapitre explique quelques notions fondamentales liées à l'humidité du sol. Les termes présentés sont essentiels pour comprendre l'équilibre hydrique du sol et le moment opportun pour irriguer, afin de garantir le bon développement des cultures et une utilisation responsable de la ressource en eau.

Capacité au champ (CC) : teneur en eau maximale qu'un sol est capable de retenir après ressuyage. À ce stade, le sol est humide mais non saturé. Elle correspond approximativement à la teneur en eau retenue par un échantillon de sol saturé puis soumis à une tension de -33 kPa.

Point de flétrissement permanent (PFP) : niveau d'humidité du sol auquel les plantes ne peuvent plus extraire suffisamment d'eau et commencent à flétrir de manière irréversible. Il correspond habituellement à une tension de -1500 kPa.

Réserve utile pour les plantes (RU) : fraction de l'eau présente dans le sol qui peut être effectivement absorbée et utilisée par les racines des plantes pour assurer leurs fonctions vitales. Cette valeur se calcule comme la différence entre la CC et le PFP. En dehors de cette plage, soit il y a trop d'eau, soit il y en a si peu que la plante ne peut pas l'absorber.

Réserve facilement utilisable (RFU) par les plantes: partie de la RU dont l'utilisation n'entraîne aucun effort ni stress pour les cultures.

L'objectif principal de la gestion de l'irrigation est donc de maintenir la teneur en eau du sol dans la plage de la RU. Cette notion sera très importante pour interpréter les données des capteurs d'eau du sol et pour prendre les décisions de programmation de l'irrigation (Figure 1).

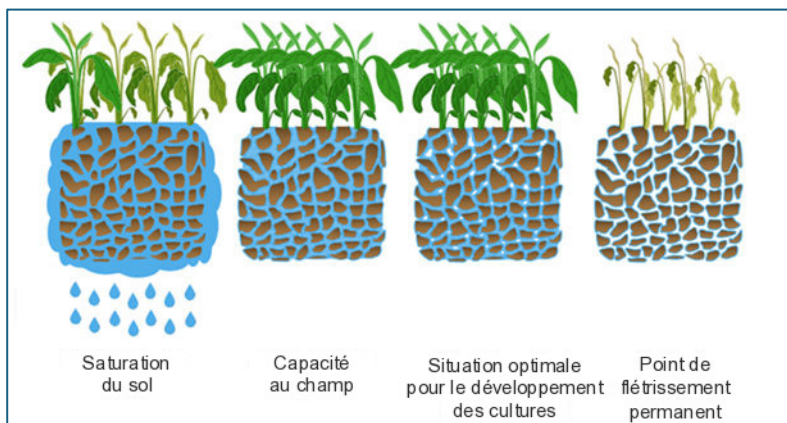


Figure 1 : Différents niveaux d'eau contenue dans le sol et leurs conséquences.

2.2. Besoins en eau des cultures

Pour déterminer la quantité d'eau dont une culture a réellement besoin en fonction des conditions climatiques et de son stade de développement, il est fondamental de comprendre les notions d'évapotranspiration de référence (ET_0), d'évapotranspiration de la culture (ET_c) et de coefficient cultural (K_c).

ET_0 : représente la quantité d'eau que consommerait un couvert végétal de référence par les processus combinés d'évaporation et de transpiration, dans des conditions atmosphériques standard.

ET_c : besoin en eau spécifique d'une culture donnée, obtenu en multipliant l' ET_0 par un facteur appelé K_c .

K_c : coefficient qui varie selon le type de culture, son développement et son stade phénologique (début de cycle, croissance, floraison, maturité, etc.), ce qui permet d'ajuster précisément les besoins en irrigation.

Il est important de bien comprendre que les besoins en eau des cultures peuvent être satisfaits par trois voies différentes, non exclusives entre elles :

2.2.1. Eau stockée dans le sol

Le sol est un réservoir d'eau qui n'est pas toujours vide. Connaître l'état d'hydratation du sol avant le semis, dans le cas des grandes cultures, ou avant le débourrement, dans le cas des arbres fruitiers à feuilles caduques, permet donc de définir le moment optimal pour démarrer l'irrigation.

Pour les grandes cultures d'été et les arbres fruitiers, les années où le printemps est pluvieux, cette quantité d'eau stockée dans le sol peut être importante, selon la capacité de rétention en eau disponible du sol, et l'on considère généralement que le sol est à la capacité au champ (réservoir plein) en début de campagne. À l'inverse, les années où l'hiver et le printemps sont secs, l'eau stockée dans le sol peut être nettement inférieure à la capacité au champ, ce qui signifie que la culture commence son cycle en situation de stress hydrique, avec pour conséquence une réduction de sa vigueur et de son potentiel de production. Au fur et à mesure que la campagne avance, la culture utilise l'eau du sol (elle vide le réservoir) ; cette eau sera restituée totalement (jusqu'à la capacité au champ) ou partiellement par les pluies ou l'irrigation. Dans ce contexte, la présence de capteurs d'eau dans le sol fournit des informations sur l'eau stockée dans le sol et sur ses variations, ce qui évite l'excès d'irrigation (au-delà de la capacité au champ) ou un déficit hydrique non souhaité.

2.2.2. La pluie efficace

La pluie réellement utilisable par la culture est appelée pluie efficace. Les pluies peu abondantes (<3 mm) sont considérées comme non efficaces, car elles ne mouillent que la couche superficielle du sol et sont très probablement évaporées. Les pluies très abondantes sur de courtes périodes favorisent le ruissellement de surface et sont très difficiles à estimer. Les pluies très abondantes sur une longue période sont considérées comme capables de remplir effectivement le profil du sol jusqu'à la capacité au champ, dans le volume de sol exploré par les racines de la culture, qui constitue un réservoir limité. L'installation de capteurs d'humidité dans le sol permet d'obtenir une information précise sur la quantité de pluie réellement disponible pour la plante, ainsi que sur la quantité d'eau perdue par drainage.

2.2.3. L'irrigation

La dose d'irrigation est la quantité d'eau que nous devons apporter au sol pour compenser l'évapotranspiration de la culture et l'inefficience du système d'irrigation lui-même. Elle se calcule à l'aide de l'équation suivante :

$$DR = \frac{ETc - Pe}{Eff} \pm \Delta SWC$$

Où :

DR = Dose d'irrigation (mm)

ETc = évapotranspiration de la culture (mm) calculée comme $ETc = ET_o * kc$

ETo = évapotranspiration de référence obtenue auprès d'une station météorologique proche

kc = coefficient cultural issu de tables de référence

Pe = précipitation efficace (mm)

Eff = efficience du système d'irrigation (environ 0.9 pour l'irrigation localisée ; 0.8 pour l'irrigation par aspersion ; 0.6 pour l'irrigation gravitaire)

ΔSWC = excédent ou déficit de l'épisode d'humectation précédent. Cette valeur peut être estimée en analysant les pentes des valeurs minimales des capteurs d'humidité du sol

D'un point de vue conceptuel, l'évapotranspiration de la culture (ETc) comprend deux composantes principales : la transpiration, qui est la diffusion de l'eau de la plante vers l'atmosphère à travers les feuilles, et l'évaporation, qui correspond à la diffusion de l'eau du sol vers l'atmosphère.

2.3. Influence des conditions météorologiques

Les journées plus ensoleillées et les températures élevées augmentent l'évapotranspiration, ce qui se traduit par des besoins en eau plus importants pour la culture. C'est pourquoi la prise

en compte des conditions météorologiques actuelles, et en particulier des prévisions pour la zone, permet de prendre des décisions fondées, qu'elles reposent sur des données passées, en temps réel ou qu'elles anticipent des situations futures.

Comme nous le verrons plus loin, de nombreux systèmes de gestion de l'irrigation sont capables d'intégrer les données météorologiques d'une station proche pour ajuster leurs calculs, en réduisant la quantité d'eau appliquée si des pluies sont prévues, ou en l'augmentant en cas de vagues de chaleur ou d'autres conditions qui accroissent la demande en eau.

3. Équipements de mesure de l'eau dans le sol

Il existe différentes façons de programmer l'irrigation. On peut irriguer de manière constante pendant toute la campagne, se fonder sur l'expérience de l'agriculteur sans données très précises, utiliser une méthode scientifique fiable appelée bilan hydrique, employer des technologies avancées qui facilitent la prise de décision, ou combiner ces différentes méthodes et technologies.

D'un point de vue technique, nous pouvons estimer les besoins en irrigation d'une culture uniquement à partir du bilan hydrique du sol. Cette estimation consiste à calculer l'eau que la culture utilise par évapotranspiration, un processus naturel et nécessaire pour les plantes, et à la comparer avec l'eau disponible, qui provient de la pluie, de l'irrigation et de l'eau disponible dans le sol. Bien que la méthode du bilan hydrique soit assez fiable, elle présente souvent quelques erreurs. Parmi les erreurs les plus courantes figurent la surestimation de l'évapotranspiration, qui entraîne souvent une irrigation excessive et l'éloignement de l'eau de la zone racinaire par percolation profonde ou ruissellement de surface, ainsi que la sous-estimation de la quantité de pluie. À l'inverse, la méthode du bilan hydrique peut aussi sous-estimer les besoins en eau des cultures, provoquant le dessèchement du sol et l'entrée de la culture en zone de stress hydrique, avec la baisse de rendement qui en découle.

Grâce aux informations fournies par les capteurs d'humidité du sol, il est possible d'ajuster la méthode du bilan hydrique et de maintenir la culture dans une zone de confort hydrique. Ces informations permettent d'analyser les schémas d'absorption de l'eau par les plantes ainsi que les pertes par percolation profonde, ce qui nous aide à déterminer quand (fréquence) et combien (quantité) irriguer, en évitant l'excès comme le déficit d'irrigation. En général, l'utilisation de capteurs d'eau du sol pour irriguer se traduit par une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau, en réduisant le volume d'irrigation sans affecter le rendement de la culture. De plus, la réduction du volume d'eau d'irrigation diminue les coûts de l'irrigation en termes d'énergie, de coût direct de l'eau ou de lessivage des engrais, ce qui peut rendre ces équipements économiquement rentables pour une exploitation à moyen terme.

L'utilisation d'équipements permettant de déterminer la teneur en eau du sol facilite le suivi de l'état hydrique du sol pratiquement en temps réel. Ils nous apportent donc une information immédiate, ce qui accélère la prise de décisions pertinentes. Ces outils ne se contentent pas d'enregistrer les données : ils les envoient vers le cloud grâce à la technologie de *l'Internet des objets (IoT)*, ce qui facilite leur consultation et leur analyse ultérieure depuis un ordinateur ou un téléphone portable, sans avoir à se déplacer sur la parcelle. En plus de suivre l'état hydrique du sol, les équipements de capteurs peuvent alerter sur des défaillances du système

d'irrigation avant qu'il ne soit trop tard. Les équipements sont conçus pour rester en plein air et durer de longues périodes au champ sans supervision. Ils sont robustes et leur conception vise à optimiser la consommation d'énergie (ils fonctionnent habituellement avec des piles classiques, mais parfois aussi avec de petits panneaux solaires).

En résumé, comme le montre l'ensemble de ce document, ces systèmes, placés aux endroits appropriés et représentatifs d'une parcelle, peuvent fournir une information précise, fiable, immédiate et accessible à distance. Cette information est d'une grande valeur pour améliorer la prise de décision dans la programmation de l'irrigation, en augmentant l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans les parcelles.

Bien qu'il existe différents types de capteurs d'humidité du sol -tels que les capteurs diélectriques, les capteurs à résistance et les tensiomètres-, ce document se concentre sur les capteurs diélectriques, en raison de leur coût modéré, de leur faible besoin d'entretien, de leur grande fiabilité, de leur réponse rapide dans les parcelles irriguées et de leur longue durée de vie. Ces capteurs mesurent la capacité du sol à stocker une charge électrique (ou diélectrique) afin d'estimer sa teneur en humidité. La constante diélectrique de l'air et du sol est bien plus faible que celle de l'eau ; les variations de la constante diélectrique du sol peuvent donc être assimilées à des variations de sa teneur en eau.

Il existe différents types de capteurs diélectriques :

Capteurs à technologie FDR (*Frequency Domain Reflectometry*) : ils utilisent le sol comme condensateur pour mesurer la fréquence de résonance maximale du circuit électrique et relier cette fréquence de résonance à la teneur en eau (Figure 2).



Figure 2 : Capteur FDR, 10HS ECHO Decagon

Capteurs à technologie TDR (*Time Domain Reflectometry*) : un capteur TDR mesure le temps de parcours d'une onde d'énergie électrique réfléchi le long d'une ligne de transmission. Ce temps de parcours est lié à la capacité de stockage de charge du sol et à la teneur volumique en eau.

Les capteurs TDR sont plus chers que les FDR ; c'est pourquoi les premiers sont davantage utilisés dans les parcelles expérimentales, et les seconds plutôt dans les exploitations commerciales.

Capteurs capacitifs : ils utilisent le sol comme élément de condensateur et exploitent la capacité de stockage de charge du sol pour étalonner la teneur en eau (Figure 3). Ce sont des capteurs très fiables, dont les mesures sont peu influencées par le type de sol, la densité apparente et la salinité. Les capteurs capacitifs sont conçus pour être faciles à installer, à condition que l'installation soit réalisée avec soin. Ils nécessitent un entretien minimal, ce qui les rend adaptés à une large gamme d'environnements agricoles. Cela permet à l'utilisateur de les installer lui-même si nécessaire, même si, dans la plupart des cas, ce service est déjà prévu et assuré par les entreprises elles-mêmes.

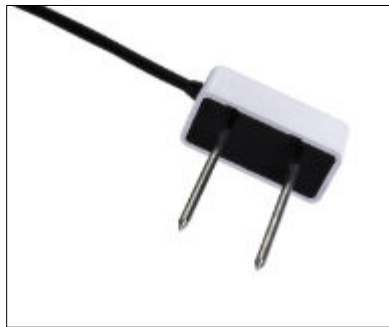


Figure 3 : Capteur capacitif TEROS 10 de METER

L'installation de ces capteurs au champ est un point critique. Un très bon contact avec la matrice du sol est indispensable, si possible sans compactage ni perturbation aux points de mesure. Il existe deux types de capteurs ou de sondes qui diffèrent par leur installation : les sondes tubulaires et les capteurs modulaires :

Sondes tubulaires : elles contiennent une série de capteurs répartis verticalement le long d'un tube, à des distances fixes les uns des autres. Ces sondes s'installent à l'aide d'une tarière et s'insèrent verticalement (Figure 4). Leur avantage est leur facilité d'installation ; leur inconvénient est que la répartition des capteurs est fixée par le fournisseur et qu'elles doivent être installées hors de portée des machines agricoles.



Figure 4 : Image d'une sonde tubulaire et de son installation.

Capteurs modulaires : ils peuvent être installés individuellement en creusant une fosse à la bêche, en perturbant le moins possible la paroi du sol dans laquelle les capteurs seront insérés horizontalement, ou à la tarière (Figure 5), en évitant dans les deux cas les éventuels chemins d'écoulement préférentiel de l'eau. Une fois les capteurs installés, il faut tasser le sol au fur et à mesure que l'on rebouche la fosse, sans force excessive.



Figure 5 : Installation de capteurs modulaires.

Le tableau comparatif ci-dessous (Tableau 1) résume les types les plus courants ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Tableau 1 : Synthèse des types de capteurs.

Technologie	Principe de fonctionnement	Avantages	Inconvénients
FDR	Mesure la constante diélectrique du sol au moyen de signaux haute fréquence	Rapide et précis Bonne sensibilité Faible consommation d'énergie	Nécessite un étalonnage spécifique selon le type de sol Peut être affecté par la salinité
TDR	Mesure le temps que met une impulsion électromagnétique à se réfléchir dans le sol	Grande précision Indépendant de la salinité Très stable	Coûteux Équipements plus complexes et plus fragiles
Capacitive	Semblables aux FDR, ils mesurent la capacité électrique, qui varie avec la teneur en eau	Économiques Installation facile Faible consommation d'énergie	Moins précis que les TDR Affectés par le type de sol et la salinité

4. Composants et architecture

Ce chapitre décrit les principaux composants d'un système type de mesure de l'humidité du sol.

4.1. Composants d'un point de contrôle type

Même s'il existe de nombreux modèles et options, et même de nombreuses entreprises qui proposent ce type de produits, les points de contrôle présentent habituellement des caractéristiques plus ou moins communes. Chacun de ces points se compose principalement de 3 éléments : (1) les capteurs d'humidité du sol, (2) l'enregistreur de données (datalogger), qui enregistre les données et, dans certains cas (ce qui est recommandé), les envoie vers le cloud et, dans la plupart des cas (ce qui est vivement recommandé), (3) un compteur d'irrigation. Beaucoup de systèmes capables d'envoyer des données à distance sont associés à des logiciels ou à des applications mobiles dont les interfaces facilitent l'interprétation, par l'irrigant, de l'information issue des données des capteurs.

4.1.1. Capteurs

Les types de capteurs disponibles sur le marché ont déjà été présentés dans le chapitre précédent. Leur installation à la verticale, en suivant le profil du sol à différentes profondeurs, est une configuration très courante. Par exemple, pour les arbres fruitiers à enracinement peu profond et irrigués à haute fréquence, on place généralement 3 sondes à 20, 40 et 60 cm de profondeur. Cela permet de suivre la dynamique de l'eau d'irrigation ou de pluie le long du profil du sol, dans la zone d'absorption racinaire et en dessous. En revanche, pour les cultures en irrigation d'appoint et à forte capacité de pénétration racinaire, cette répartition des capteurs peut ne pas être la plus adaptée. En revanche, pour les grandes cultures ou les cultures maraîchères à enracinement superficiel, il est également courant d'utiliser 2 à 3 capteurs, mais souvent à une profondeur moindre (15, 30 et 45 cm), car il n'y aurait pas de sens à mesurer plus en profondeur si le système racinaire de la culture ne se développe pas dans cette zone.

Outre l'emplacement en fonction de la culture, l'emplacement en fonction du système d'irrigation est également très important (un verger irrigué au goutte-à-goutte n'est pas comparable à un champ de maïs irrigué par aspersion). Dans un système d'irrigation goutte-à-goutte, des capteurs placés juste sous le goutteur renseigneront sur la zone saturée du sol, tandis qu'en les éloignant (toujours à l'intérieur de la surface humide), ils fourniront une information détaillée sur la manière dont le bulbe humide s'étend et se réduit à chaque épisode d'irrigation.

4.1.2. Dataloggers

Les données recueillies par les capteurs sont enregistrées dans le datalogger. Ces systèmes suivent et stockent les données et se chargent de les envoyer vers le cloud (ou non, selon la technologie choisie) par différentes méthodes : directement depuis le datalogger ou par l'intermédiaire d'une passerelle (gateway) ou d'un concentrateur (ce que l'on appelle une transmission en étoile ou en maillage). Les boîtiers auxquels les capteurs sont raccordés (Figure 6) fonctionnent habituellement avec des piles (bien qu'il existe aussi des modèles fonctionnant avec des panneaux solaires ou des batteries), et permettent de configurer, entre autres, la fréquence à laquelle nous souhaitons enregistrer ou envoyer les données. Plus la fréquence de mesure et d'envoi est élevée, plus le datalogger consomme d'énergie, mais plus les données sont précises. La nécessité de rester de longues périodes en plein air, sous la pluie et d'autres intempéries, impose aux dataloggers un fonctionnement robuste et étanche, défini par les normes IP (IP65 minimum).



Figure 6 : Vue de face d'un datalogger Em500 alimenté par piles, avec un compteur d'eau à impulsions, dans un verger de pommiers.

4.1.3. Compteur volumétrique

Le compteur volumétrique d'irrigation permet de connaître l'eau appliquée sur la parcelle. Il est habituellement installé en tête d'une rampe d'irrigation dans le cas des arbres fruitiers

irrigués au goutte-à-goutte, ou sur un asperseur individuel dans le cas de l'irrigation par aspersion. Grâce aux informations du compteur et à la surface irriguée qu'il contrôle, nous pouvons connaître l'irrigation de la parcelle en m³/ha ou en mm. Le compteur permet de vérifier si l'irrigation respecte la programmation établie, ce qui facilite la détection d'éventuels écarts. En outre, la lecture simultanée des compteurs et des capteurs d'humidité du sol sur un même datalogger simplifie considérablement l'interprétation des données des capteurs (Figure 7), car elle permet de visualiser l'arrivée du front d'humectation et de distinguer les épisodes d'irrigation des pluies.

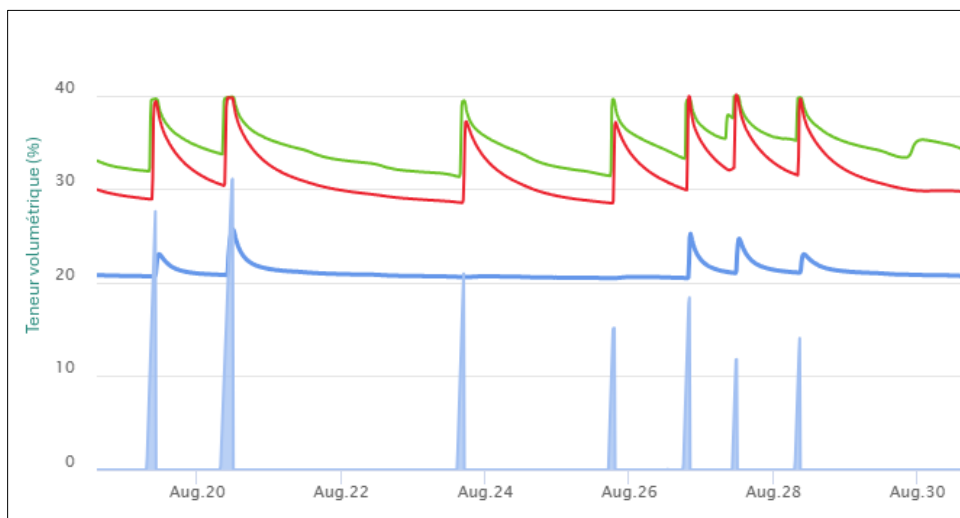


Figure 7 : Données de 3 capteurs d'humidité à différentes profondeurs (vert à 20 cm, rouge à 40 cm et bleu à 60 cm) avec un débitmètre installé sur la ligne de goutteurs (triangles bleus).

4.2. Technologies de communication : *Internet des objets*

Il y a quelques années, l'absence de connexion internet des dispositifs d'enregistrement de données (capteurs et dataloggers installés sur les parcelles agricoles) obligeait à stocker l'information localement, ce qui impliquait de se rendre physiquement au champ pour télécharger les données avec un ordinateur. Cela limitait fortement l'immédiateté de l'information, ralentissait donc la prise de décision et créait une forte dépendance à l'égard du personnel chargé de la collecte manuelle des données. Aujourd'hui, la plupart des *dataloggers* intègrent déjà un système de transmission des données vers le cloud par différentes voies et selon une périodicité configurable, même si ce service a un coût. Les principaux systèmes de communication disponibles, les technologies utilisées ainsi que leurs avantages et inconvénients sont présentés ci-après.

Le paradigme de l'IIoT (Internet des objets) offre la possibilité de connecter à internet un grand nombre de dispositifs à faible consommation (machines, capteurs ou « objets ») depuis n'importe quel endroit grâce à l'utilisation de cartes SIM. Leur capacité de transmission de données et leur périodicité sont limitées, ce qui garantit une grande autonomie et des frais de connectivité réduits (en raison du coût appliqué par mégaooctet reçu ou envoyé, comme nous le connaissons aujourd'hui avec les réseaux 3G/4G/5G).

Le Tableau 2 présente une synthèse des avantages, des inconvénients et des exigences générales d'un réseau IIoT appliqué à une parcelle agricole.

Tableau 2 : avantages, inconvénients et exigences générales d'un réseau IIoT.

Avantage	Inconvénient	Exigences
Faible entretien	Faible débit de transmission des données	Couverture d'un opérateur mobile
Permet des connexions filaires ou sans fil entre plusieurs dispositifs d'une exploitation	Portée limitée des connexions sans fil en raison du type de terrain	Les dispositifs doivent être bien protégés pour « survivre » en extérieur
Connexion à internet		Carte SIM (le nombre dépendra du type de réseau installé)
Coûts d'infrastructure abordables		Alimentation par panneau solaire/piles
Faible consommation de batterie		
Faible consommation de données (SIM)		

Pour mettre en place un réseau, nous pouvons utiliser (et combiner) différentes technologies IIoT, comme la 3G bien connue, le NB-IIoT (NarrowBand IIoT), le LTE-M, LoRa, le WiFi ou le BLE (Bluetooth), conçues pour offrir une faible consommation d'énergie, une meilleure portée et des tarifs optimisés pour de petits volumes de données.

Voici une brève liste de caractéristiques et d'exemples d'utilisation pour chacune de ces communications sans fil :

2G/3G/4G/5G

- Types de réseaux les plus connus.
- Chaque dispositif doit disposer d'une carte SIM.
- La connexion dépend de la couverture de l'opérateur mobile (Vodafone, Movistar, Orange, etc.).

- Permet la transmission de grands volumes de données (images, vidéo, etc.) à haut débit et en temps réel. Le débit et la couverture dépendent de la technologie disponible :
 - o 2G : de 30 à 50 kbps (aujourd'hui en voie d'abandon).
 - o 3G : de 5 à 8 Mbps, entre 3 et 11 km de couverture.
 - o 4G : de 50 à 80 Mbps, environ 8 km de couverture.
 - o 5G : de 50 Mbps à 5 Gbps, entre 300 et 450 m de couverture.
- La fréquence et le débit élevés de transmission des données impliquent une forte consommation d'énergie, ce qui rend cette solution peu adaptée aux dispositifs alimentés par batterie (autonomie de quelques heures ou de quelques jours).
- Usages typiques : connecter à internet des dispositifs ayant de forts besoins de transmission de données (téléphones portables, caméras vidéo, etc.)

NarrowBand-IoT

- Chaque dispositif doit disposer d'une carte SIM.
- La connexion dépend également de l'opérateur.
- Consommation de batterie plus faible (les batteries peuvent durer des années)
- Débit de transmission des données plus faible (jusqu'à 250 Kbps).
- Optimisé pour programmer l'envoi de données à intervalles réguliers (pas en temps réel).
- Conçu pour faire communiquer des dispositifs fixes. En cas de changement d'emplacement, la reconnexion peut prendre du temps.
- Large couverture grâce à l'utilisation de bandes radio longue portée, jusqu'à 10 km.
- Usages typiques : connecter à un serveur web différents capteurs d'humidité, stations météorologiques, etc.

LTE-M

- Chaque dispositif doit disposer d'une carte SIM.
- La connexion dépend également de l'opérateur.
- Réseau destiné aux dispositifs mobiles : en mouvement, ils peuvent changer d'antenne sans perdre la connexion, ce qui offre une connectivité plus stable.
- Consommation d'énergie légèrement supérieure à celle du NB-IoT (les batteries durent des mois).
- Transmissions jusqu'à 1 Mbps, avec une portée pouvant atteindre 10 km dans des conditions favorables.
- Permet d'envoyer des données en quasi temps réel, y compris de l'audio ou des localisations fréquentes.
- Usages typiques : suivi de tracteurs, du bétail, de drones, etc.

LoRa

- Les dispositifs n'intègrent pas de carte SIM ; un réseau « purement LoRa » n'a donc pas de connexion à internet.
- Les réseaux LoRa sont privés (car ils ne sont connectés à aucun autre réseau) ; quelqu'un doit donc installer les dispositifs émetteurs et récepteurs « à partir de zéro ».
- Les dispositifs doivent être équipés d'une puce LoRa pour pouvoir communiquer entre eux.
- Il faut ajouter un autre dispositif (habituellement appelé Gateway ou passerelle) disposant d'un accès à internet pour répondre au paradigme IoT, ce qui permet de ne payer qu'une seule carte SIM. Cela réduit considérablement le coût de transmission des données.
- Communication radio longue portée (généralement entre 5 et 15 km selon les irrégularités du terrain).
- Très faible consommation de batterie (elle peut durer des années).
- Débit plus faible, entre 0.3 et 50 Kbps. Ne permet pas la communication en temps réel.
- Usages typiques : capteurs répartis sur de grandes exploitations (humidité, vannes, stations météorologiques).

WiFi

- Réseau sans fil classique. Les dispositifs équipés d'une puce WiFi doivent se connecter à un routeur de l'exploitation disposant d'une connexion internet.
- Facile à installer si l'exploitation dispose déjà d'un réseau WiFi.
- Débit de transmission des données élevé (idéal pour transmettre des images et des vidéos en temps réel). Il peut varier selon la bande du routeur installé, par exemple :
 - o 2.4 GHz : jusqu'à 100 Mbps, avec une portée pouvant atteindre 100m dans des conditions idéales en milieu rural.
 - o 5 GHz : jusqu'à 1 Gbps, avec une portée de 30 à 60m dans des conditions idéales en milieu rural.
- Forte consommation d'énergie (donc peu adapté aux dispositifs alimentés par batterie).
- Usages typiques : caméras de vidéosurveillance, capteurs en environnement contrôlé ou raccordés au secteur.

Bluetooth Low Energy (BLE)

- Variante basse consommation (Low Energy) du Bluetooth traditionnel.
- Courte portée, jusqu'à 10m (selon les caractéristiques du terrain).

- Très faible consommation (les batteries pourraient durer des années).
- Débit très réduit, jusqu'à 1 Mbps.
- Les dispositifs BLE doivent se connecter à un HUB ou à un téléphone portable (dispositifs récepteurs) situé à proximité pour accéder à internet.
- Usage typique : capteurs dont les relevés peuvent être obtenus avec un téléphone portable, ou capteurs situés à l'intérieur d'une serre.

Le Tableau 3 ci-dessous résume les caractéristiques de chaque technologie.

Tableau 3 : Comparaison des caractéristiques de différentes technologies IoT

Caractéristiques	3G/4G/5G	NB-IoT	LTE-M	LoRa	WiFi	BLE
Débit	Entre 5 Mbps et 5 Gbps	Jusqu'à 250 Kbps	Jusqu'à 1 Mbps	Jusqu'à 50 Kbps	De 100 Mbps à 1 Gbps	Jusqu'à 1 Mbps
Portée	Entre 300m et 11km	Jusqu'à 10 km	Jusqu'à 10 km	Entre 5 et 15 km	Entre 30 et 100 m	Jusqu'à 10 m
Autonomie de la batterie	Très faible (jours)	Très élevée (années)	Élevée (mois)	Très élevée (années)	Très faible (jours)	Très élevée (années)
Carte SIM requise sur chaque dispositif	OUI	OUI	OUI	NON	NON	NON
Exigences ou limites	Disponibilité de l'opérateur mobile	Envois ponctuels de données	Disponibilité de l'opérateur	Gateway	Routeur	HUB

5. Station de contrôle ou de mesure

5.1. Choix de l'emplacement

Décider où installer chaque point de contrôle est l'une des décisions les plus importantes. On ne peut pas multiplier les équipements par parcelle, au risque de réduire la rentabilité de l'exploitation en raison du coût de l'instrumentation. Si les entreprises spécialisées savent généralement repérer les meilleurs points de contrôle, personne ne connaît mieux que l'agriculteur lui-même les particularités de son exploitation. Sa connaissance du terrain est essentielle pour bien positionner les points de contrôle.

Le premier aspect à prendre en compte est la variabilité du terrain et la répartition des secteurs d'irrigation. Dans certaines exploitations, le sol peut avoir un comportement homogène, y compris sur plusieurs secteurs d'irrigation. Dans ce cas, un seul ou quelques points de contrôle peuvent suffire à représenter correctement l'ensemble de l'exploitation. En revanche, dans les exploitations plus complexes (en raison du relief ou des types de sols), la variabilité peut être élevée, même au sein d'un seul secteur d'irrigation. Dans ce cas, il peut être recommandé d'installer plusieurs points de contrôle par exploitation, voire par secteur, ou bien de prendre une décision fondée sur le type de sol et le relief qui minimise l'erreur si l'on souhaite gérer l'irrigation à partir des données obtenues par les capteurs.

Dans chacune de ces situations, l'expérience de l'agriculteur et les connaissances des techniciens doivent suffire pour choisir le nombre idéal de capteurs et leurs emplacements dans l'exploitation. Au sein de chaque parcelle ou secteur d'irrigation, une fois l'installation commencée, il convient également de choisir un point représentatif où, de manière générale, les cultures ont un aspect homogène et une bonne vigueur. L'utilisation d'images satellites antérieures avec un indicateur de vigueur des cultures est très utile pour déterminer les zones les plus représentatives ou celles que l'on souhaite utiliser comme référence. Il est également important de vérifier que le système d'irrigation fonctionne bien à cet endroit, faute de quoi des erreurs peuvent apparaître. Pour cela, il faut réaliser une analyse de l'uniformité de l'irrigation.

Il est conseillé de prélever des échantillons de sol (de nombreuses entreprises l'incluent déjà dans leur protocole) afin de réaliser une analyse des caractéristiques physiques et texturales du sol, de connaître son comportement hydraulique, d'ajuster les valeurs de capacité au champ et de point de flétrissement permanent et de définir les courbes caractéristiques qui relient la tension avec laquelle le sol retient l'eau à la teneur volumique en eau du sol.

5.2. Installation des capteurs dans le profil du sol

La bonne installation des capteurs d'humidité dans le profil du sol est un facteur déterminant pour obtenir des données fiables et représentatives de l'état hydrique de la culture. Une installation défectueuse peut entraîner des lectures erronées, une perte de contact entre le capteur et le sol, ou des dommages à l'équipement. Il est donc fondamental de réaliser la mise en place en suivant les recommandations du fabricant, en utilisant des outils adaptés pour éviter de perturber la structure du sol et en garantissant un bon contact entre le capteur et le sol.

La profondeur d'installation doit être définie en fonction du type de culture, du système racinaire et des objectifs du suivi. Pour les cultures à enracinement profond, comme les arbres fruitiers ou les grandes cultures, il est courant d'installer des capteurs à différentes profondeurs (par exemple 20, 40 et 60 cm) afin de saisir la dynamique de l'humidité sur l'ensemble du profil actif. Pour les cultures maraîchères ou à enracinement plus superficiel, un ou deux points de mesure suffiront. Il est également important de tenir compte de la texture du sol, car elle influe sur la rétention de l'eau et donc sur l'interprétation des données. Dans le cas des sondes modulaires, la profondeur d'installation de chaque sonde n'est pas déterminée par la configuration de la sonde. En revanche, dans le cas des sondes tubulaires ou multiprofondes, l'utilisateur doit bien connaître la configuration de la sonde à installer, car celle-ci est fixée par le fabricant.

Pour garantir une installation optimale, il est recommandé de mettre en place la sonde lorsque le sol présente une teneur en humidité optimale, car cela aide à éviter l'effondrement du sol et à limiter la formation de poches d'air et de fissures qui peuvent apparaître ensuite lorsque le sol sèche. Pour limiter les dégâts aux racines des cultures, il est recommandé d'installer les capteurs lorsque les cultures ne sont pas en activité. Il est important d'éviter les zones trop caillouteuses, car elles rendent difficile le forage à la mèche ou à la bêche, peuvent laisser des cavités d'air autour du capteur ou provoquer des interférences dues à la proximité de grosses pierres, ce qui peut fausser les lectures. Les sondes tubulaires s'installent normalement à la mèche ou à la tarière. Pour ce type de sondes, il est important, une fois la sonde placée dans le trou, d'ajouter autour d'elle une partie du sol extrait, humidifié jusqu'à saturation, pour éviter que des poches d'air restent piégées autour de la sonde et faussent les lectures. Pendant le forage, il faut maintenir un angle de 90° par rapport à la surface du sol pour assurer une insertion verticale et précise. Les sondes modulaires peuvent s'installer à la tarière ou à la bêche. Dans ce cas, lors du forage ou du creusement de la fosse, il faut retirer soigneusement le sol extrait afin de le remettre en place, de préférence en respectant l'ordre des horizons du sol d'origine, lorsque la sonde est enterrée, en perturbant le moins possible

les conditions naturelles du terrain. Il est en outre fondamental de tenir compte des travaux agricoles prévus à proximité du point d'installation et de protéger le câblage si nécessaire, afin d'éviter les dommages causés par les machines ou le piétinement. L'installation des capteurs est un point critique ; il est donc vivement recommandé de se faire conseiller par des techniciens spécialisés dans l'installation de sondes, voire de confier l'installation à des entreprises de sondes d'humidité, pour obtenir des résultats fiables.

Même s'il peut toujours y avoir des exceptions selon le type de culture, le système d'irrigation et les caractéristiques du sol, en irrigation localisée et par aspersion, il est conseillé de suivre les critères d'installation suivants (Figure 8) :

- ✦ Installer le dispositif dans la zone intermédiaire entre la verticale d'un goutteur et la limite de la zone humide en surface.
- ✦ Profondeur du capteur toujours à l'intérieur de la zone racinaire de la culture. Le capteur le plus profond à la limite de cette zone (pour détecter les flux de lixiviation), le capteur intermédiaire dans la zone de plus forte densité racinaire (pour détecter les prélèvements maximaux de la culture) et le capteur superficiel à mi-distance entre le capteur intermédiaire et la surface du sol (pour détecter la pluviométrie efficace).

Par exemple, dans les vergers intensifs de pommiers (2.000 arbres/ha), ils sont couramment placés à 15, 30 et 45 cm de profondeur.

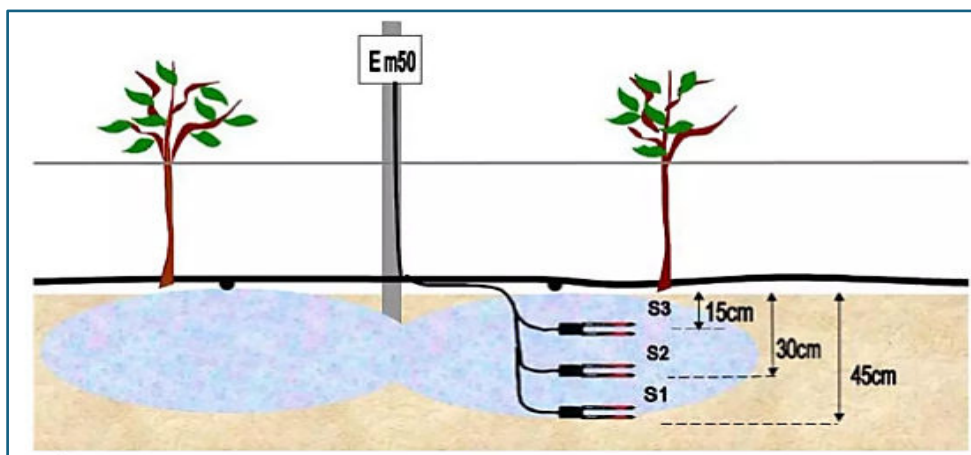


Figure 8 : Schéma d'installation de capteurs modulaires dans une plantation de cultures ligneuses (original de SAF Sampling Water)

5.3. Mise en service des points de contrôle

Une fois le point de contrôle installé et l'envoi des données activé, celles-ci commencent immédiatement à être enregistrées. Il peut souvent être utile de réaliser une irrigation abondante après l'installation des capteurs afin de tasser le sol et de s'assurer que les capteurs détectent le front d'humectation et que les données sont correctement transmises. Cette irrigation ou une pluie abondante peut servir de donnée de référence pour déterminer la capacité au champ de chaque capteur et ainsi étalonner les mesures en fonction de cette valeur.

Il faut garder à l'esprit que chaque capteur se trouve dans un environnement différent (présence de pierres, de racines, texture du sol, compacité...) et qu'une même valeur pour différents capteurs n'indique pas un même état d'humidité du sol. Il est donc recommandé d'étalonner chaque capteur selon sa propre valeur de référence.

L'entreprise d'installation nous fournira les informations nécessaires à la consultation des données, telles que les emplacements, les identifiants permettant de consulter les données sur le site web ou la plateforme et les autres détails nécessaires.

5.4. Plateformes et accès aux données

Une fois l'installation terminée et l'accès à la plateforme obtenu, nous pourrions visualiser toutes les informations fournies par les capteurs. En général, cela comprend une carte indiquant l'emplacement des capteurs dans les parcelles (souvent modifiable), la liste des points de contrôle enregistrés et, surtout, une visionneuse affichant les courbes d'humidité du sol de chaque capteur ou point de contrôle. Une section ultérieure explique en détail comment interpréter ces courbes et comment les utiliser pour ajuster plus efficacement la programmation de l'irrigation.

En ce qui concerne le service, il est habituel de payer un abonnement annuel à l'entreprise fournisseuse, qui couvre généralement l'envoi et le stockage des données ainsi que l'accès à la plateforme du fournisseur.

5.5. Entretien

L'effort d'entretien qu'un point de contrôle demande à l'irrigant est généralement faible. Il se limite normalement à remplacer les piles lorsqu'elles sont épuisées et à faire attention aux travaux au champ susceptibles d'endommager les équipements. L'avantage d'un contrat

d'abonnement avec l'entreprise qui fournit les équipements et le service de visualisation est que, dans certains cas, elle prend en charge l'entretien courant et la résolution des incidents non provoqués. Il faut cependant prévoir la présence d'animaux sauvages susceptibles d'endommager les équipements, en particulier le câblage, ainsi que les travaux pouvant projeter des pierres (par exemple les faucheuses), et protéger les équipements en conséquence.

5.6. Avantages des capteurs d'humidité du sol

Quelle que soit l'origine de l'eau qui atteint le sol (pluie, irrigation, etc.), les sondes fournissent une valeur représentative et pratiquement en temps réel de l'état d'humidité du sol, du déplacement du front d'humectation, de la perte d'eau par percolation profonde, des dynamiques d'humectation et de dessèchement du bulbe humide... en un point représentatif de la parcelle. C'est comparable à une radiographie du sol à différentes profondeurs, qui permet d'étudier le comportement du profil hydrique pendant l'irrigation. Ces systèmes fournissent une grande quantité d'informations, ce qui facilite une analyse détaillée pour une gestion adaptée de la ressource en eau.

6. Interprétation des données pour le pilotage de l'irrigation

L'interprétation la plus simple de l'information passe par la représentation graphique de l'évolution des capteurs sur des périodes d'une ou deux semaines, ce qui donne des graphiques semblables à la Figure 9.

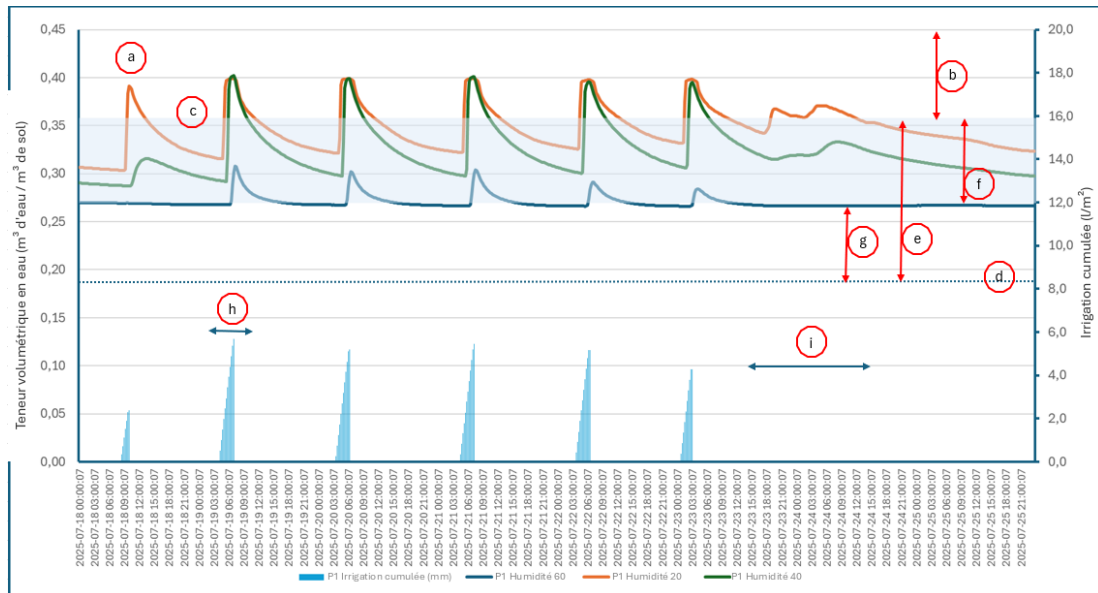


Figure 9.- Graphique type réalisé à partir des données de capteurs d'humidité du sol (axe de gauche), placés à 20, 40 et 60cm de profondeur dans une culture ligneuse intensive irriguée au goutte-à-goutte, avec compteur volumétrique de l'eau d'irrigation (axe de droite).

6.1. Notions préalables

Les aspects les plus importants pour l'interprétation des données des capteurs présentées dans la Figure 9 et dans quelques figures complémentaires sont décrits ci-après.

(Figure 9a) FRONT D'HUMECTATION. Après une pluie (i.-) ou une irrigation (j.-) les capteurs réagissent généralement par une augmentation marquée de leur valeur (presque une ligne verticale) jusqu'à atteindre un pic. Cela signifie qu'ils ont détecté le front d'humectation, c'est-à-dire le déplacement soudain de l'eau dans le sol dû à un épisode d'humectation. Un schéma typique est que les capteurs les plus proches du goutteur (verticalement comme horizontalement) détectent le front d'humectation avant les plus éloignés.

(Figure 9b) ZONE DE SATURATION. Après un épisode d'humectation, la valeur de pic des capteurs provoquée par l'arrivée d'un front d'humectation diminue rapidement (pente très négative de la courbe du capteur). En l'absence de culture active (hors campagne ou la nuit), la quasi-totalité de la diminution de l'eau est due au déplacement vertical de l'eau, c'est-à-dire au drainage. La zone comprise entre le front d'humectation et la stabilisation de la courbe de lecture du capteur (lorsque la pente commence à tendre vers zéro) est appelée zone de saturation.

(Figure 9c) **CAPACITÉ AU CHAMP (CC)**. Lorsque nous réalisons une irrigation ou qu'il tombe une pluie abondante en l'absence de culture active, et que la lecture du capteur commence à se stabiliser (pente tendant vers 0) un ou deux jours après l'épisode d'humectation (à condition que le sol ait été saturé), on peut considérer que le sol retient toute l'eau disponible (Figure 10). Ce point est appelé capacité au champ du capteur ; il sert de valeur de référence du sol « plein » et il est très important pour prendre les décisions d'irrigation. Lorsqu'une culture est présente, on utilise plutôt le point d'inflexion entre deux pentes de la courbe du capteur pour déterminer le point de CC (Figure 11).

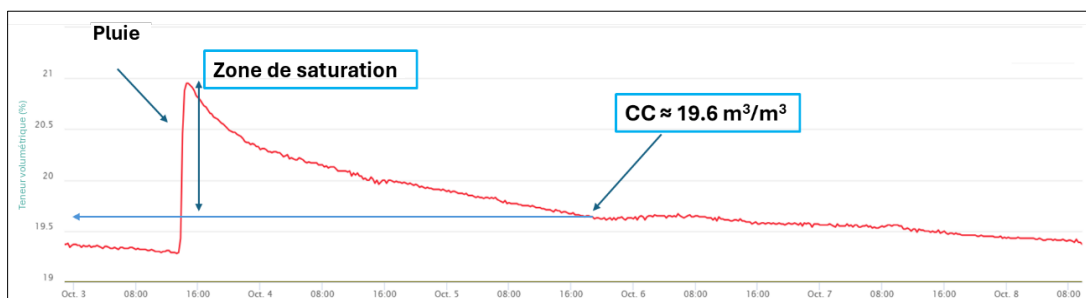


Figure 10.- Détermination des points de capacité au champ des capteurs par la méthode de saturation du sol.

(Figure 9d) **POINT DE FLÉTRISSEMENT PERMANENT (PFP)**. Il se définit comme le niveau minimal d'humidité du sol dont la plante a besoin pour ne pas flétrir. Si l'humidité du sol descend jusqu'à ce point ou en dessous, et que nous ne corrigeons pas la situation, la plante ne pourra pas retrouver sa turgescence, car elle ne parviendra plus à absorber l'eau du sol. Ce point est généralement estimé en fonction de la texture du sol et par référence à la capacité au champ du capteur. Dans le cas de la figure 9, on retient une valeur de PFP de $0.27 \text{ m}^3/\text{m}^3$ pour tous les capteurs. Il n'est pas souhaitable de s'approcher du PFP.

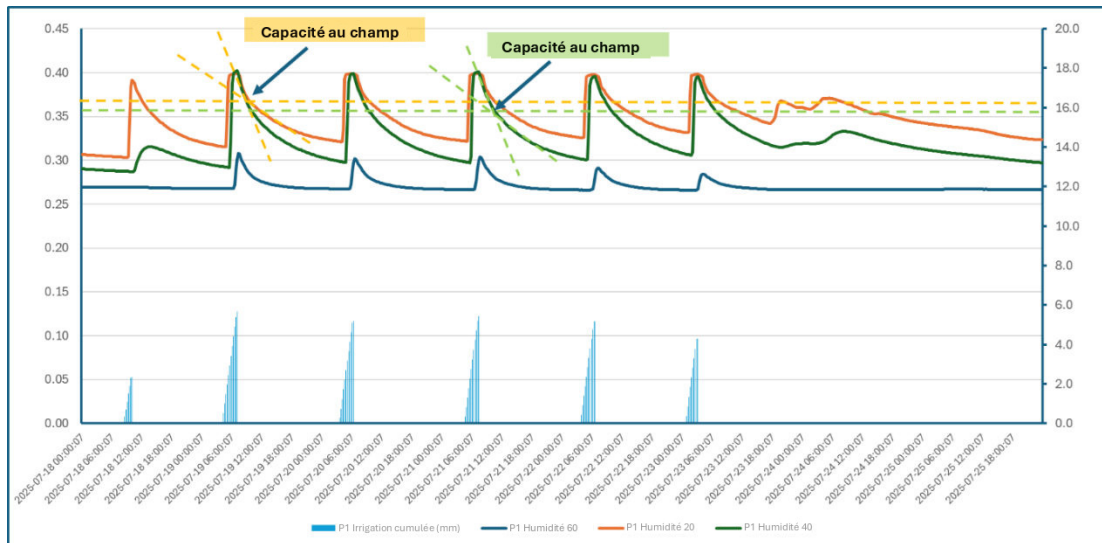


Figure 11.- Détermination des points de capacité au champ pour les capteurs placés à 20 et 40 de profondeur dans une culture ligneuse intensive irriguée au goutte-à-goutte, avec compteur volumétrique de l'eau d'irrigation (axe de droite).

(Figure 9e) RÉSERVE UTILE (RU). C'est la différence entre la Capacité au Champ (CC) et le Point de Flétrissement Permanent (PFP).

(Figure 9f) RÉSERVE FACILEMENT UTILISABLE. (RFU). C'est la teneur en eau du sol pour laquelle les cultures n'entrent pas en zone de stress hydrique. Elle se définit comme la différence entre le point de CC du capteur et le point à partir duquel l'eau cesse d'être facilement utilisable par la culture, c'est-à-dire exige un effort de sa part. Ce point dépend des caractéristiques de chaque culture, comme la profondeur explorée par les racines et la capacité d'absorption de l'eau, ainsi que de la demande en eau de l'atmosphère. C'est une notion empirique qui va généralement de 50 % de la RU épuisée pour les cultures sensibles au stress comme le pommier, jusqu'à 65 % de l'eau disponible épuisée pour les cultures résistantes comme l'olivier, pour une ETo de 5 mm. Dans le cas de la figure 9, on retient un seuil de stress de 50 % de l'eau disponible.

Tableau 4.- Fraction d'épuisement de l'eau disponible dans le sol en l'absence de stress hydrique (FAO, 2006. Évapotranspiration des cultures. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage 56).

Culture	Fraction d'épuisement	Culture	Fraction d'épuisement
Laitue	0.30	Pomme de terre	0.35
Amandier	0.40	Tournesol	0.45
Melon	0.45	Lentilles	0.50
Pommier	0.50	Agrumes	0.50
Orge / Blé	0.55	Maïs	0.55
Luzerne	0.55	Olivier	0.65

(Figure 9g) RÉSERVE DIFFICILEMENT UTILISABLE (RDU). C'est l'eau disponible pour la plante dont l'absorption implique d'entrer en zone de stress hydrique. Elle se définit comme la différence entre la RU et la RFU au-dessus du PFP.

ZONE DE CONFORT (trame bleue). Elle se définit comme la zone que l'irrigant considère comme non stressante et sans risque que la culture entre en stress hydrique. Il s'agit donc d'une plage comprise entre le point de CC et un point arbitraire mais sûr (choisi par le technicien ou l'irrigant). L'irrigation vise à ne pas descendre en dessous de la zone de confort. Elle se distingue de la RFU en ce qu'elle relève d'une décision de l'irrigant, même si elles peuvent parfois coïncider. Pour certaines cultures très sensibles au stress, on fixe parfois la limite inférieure de la zone de confort à 90-80% du point de CC.

(Figure 9h) IRRIGATION. Effets de l'irrigation sur les capteurs d'humidité du sol placés à 20, 40 et 60 cm de profondeur. Le front d'humectation atteint d'abord le capteur situé à 20 cm de profondeur puis, peu après, celui de 40 cm, les deux présentant une réponse similaire. En revanche, le front d'humectation atteint dans une moindre mesure le capteur de 60 cm, ce qui est souhaitable pour limiter le drainage profond et éviter les pertes d'eau.

(Figure 9i) PLUIE. Effets de la pluviométrie sur les capteurs d'humidité installés. La pluie efficace influe sur les capteurs de 20 et 40 cm de profondeur, tandis que son front d'humectation n'a aucune influence sur le capteur placé à 60 cm ; il n'y a donc pas de drainage. L'évolution des capteurs reflétant les prélèvements d'eau par la culture présente une pente nettement plus faible que celle des apports d'eau issus de l'irrigation.

ABSORPTION PAR LA PLANTE. Pendant la nuit, on peut considérer que la plante ne transpire pas ; une baisse de l'eau détectée par le capteur est donc attribuée au déplacement vertical de l'eau. En revanche, pendant la journée, si la lecture du capteur est inférieure à la

CC, une réduction de la teneur en eau du sol peut être attribuée à l'évapotranspiration de la culture. Cette information est précieuse pour déterminer la zone d'absorption racinaire, voire pour estimer le profil journalier de consommation d'eau de la culture. Par exemple, la figure 11 montre que l'absorption d'eau maximale a lieu à 20 et 40 cm de profondeur.

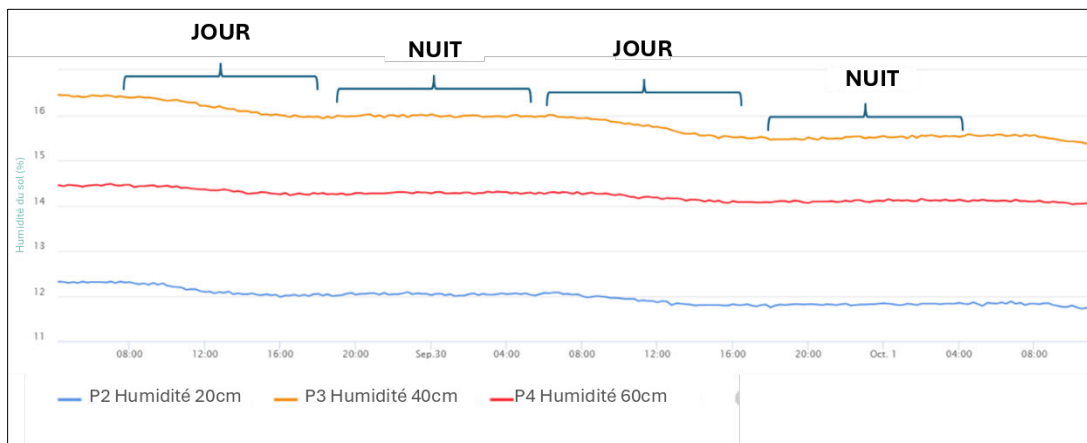


Figure 11.- Profil typique d'absorption racinaire de l'eau par la culture détecté par les capteurs.

En pratique, il est préférable de ne pas utiliser directement les données des capteurs (m^3/m^3) mais de les exprimer en pourcentage de la réserve utile pour les plantes (RU). Chaque capteur a un environnement (pierres, racines, porosité...) qui conditionne les valeurs mesurées. Pour une meilleure interprétation, les données sont rapportées à la capacité au champ et au point de flétrissement, et le résultat est exprimé en % de la réserve utile totale. La figure 12 présente des données relativisées avec un critère de zone de confort de 60 % de la RU. L'appui d'un technicien spécialisé est important pour relativiser les données.

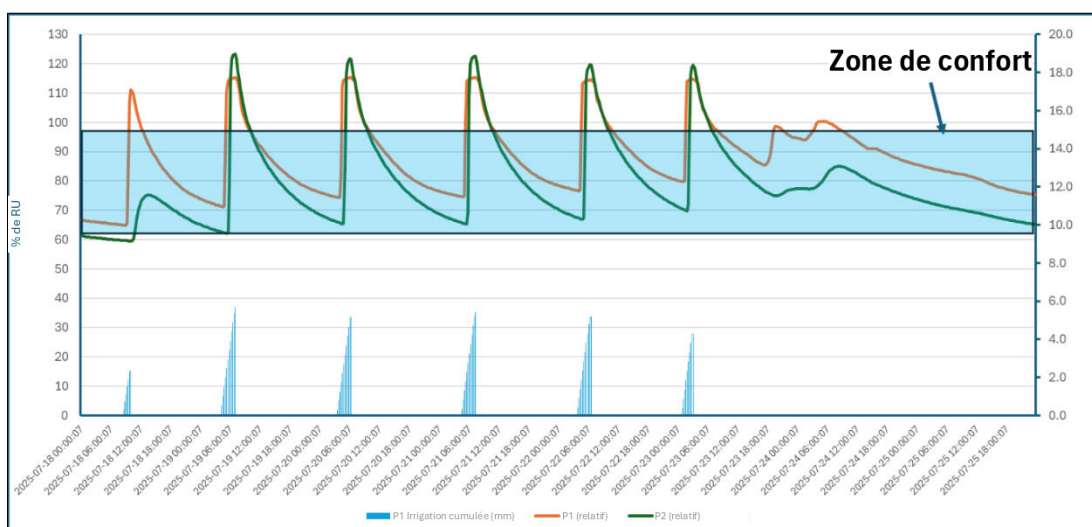


Figure 12.- Valeurs rapportées à la CC et au PFP pour les capteurs placés à 20 et 40 de profondeur dans une culture ligneuse intensive irriguée au goutte-à-goutte, avec compteur volumétrique de l'eau d'irrigation (axe de droite).

6.2. Comment irriguer

Pendant la journée, une culture active transpire, c'est-à-dire qu'elle absorbe l'eau liquide du sol par ses racines et la transporte jusqu'aux feuilles où elle s'évapore. Elle provoque donc une baisse de l'humidité du sol détectée par les capteurs, comme on l'observe entre les irrigations sur le graphique. Si cette baisse est détectée en dessous du point de CC et sans épisode d'humectation (irrigation ou pluie), on peut considérer que la totalité de la réduction de la teneur volumique en eau du sol est due à l'utilisation par la culture.

L'objectif de l'irrigation fondée sur les capteurs d'humidité du sol est de maintenir le capteur représentatif de la densité racinaire maximale de la culture dans la zone de confort hydrique. Pour cela, on veille à ce que le capteur installé le plus en profondeur ne se trouve pas près de la zone de saturation.

Si l'on irrigue plus que ce que la culture peut absorber ou que le sol peut stocker (ce qui peut varier selon la texture, la porosité et la teneur en matière organique du sol), les capteurs indiqueront que l'on se trouve en zone de saturation et, par conséquent, que l'eau se déplace verticalement. Dans une configuration verticale de capteurs, installer un capteur juste en dessous de la profondeur d'enracinement de la culture peut renseigner sur les pertes par percolation profonde. Lorsque ce capteur se trouve en zone de saturation, toute cette eau est perdue hors de la zone racinaire, ce qui indique un excès d'eau dans le cas d'un épisode d'irrigation.

En cas de pluies abondantes, la perte par percolation profonde peut être inévitable, et sa détection indique que l'ensemble du profil sera à la capacité au champ une fois la courbe des capteurs stabilisée. En cas d'utilisation d'eaux légèrement salines ou sur des sols présentant des problèmes de salinité, un drainage de lessivage est souhaitable. En cas d'utilisation d'engrais chimiques et/ou de fertirrigation, la percolation profonde entraîne également une perte d'engrais.

L'objectif de l'irrigation est d'apporter suffisamment d'eau pour maintenir l'humidité du sol dans la zone de confort, en évitant la percolation profonde (sur-irrigation) et le stress hydrique (déficit d'irrigation). Pour cela, on tient généralement compte de la lecture de la sonde située dans la zone de plus forte absorption racinaire, qui est habituellement la sonde intermédiaire (p. ex. 40 cm pour la culture ligneuse intensive de la Figure 9).

Les irrigations déficitaires contrôlées constituent une exception d'une complexité supplémentaire. Pendant les phases de déficit hydrique contrôlé, on travaille en dessous de la zone de confort en fixant un seuil de déficit maximal selon la culture (par exemple, réduire de 20 % la RDU). Toutefois, pour recourir à ce type de stratégies, il est vivement recommandé d'utiliser des mesures de l'état énergétique de l'eau dans le sol (potentiel hydrique) ou des mesures directes d'indicateurs de stress hydrique sur la plante, et de s'appuyer sur les conseils de techniciens spécialisés.

Même si nous n'effectuons aucune irrigation, les précipitations peuvent nous aider et apporter de l'eau à la culture, bien que la pluie soit un facteur très variable dans l'espace. Pour cela, il est vivement recommandé de relever les données manuellement ou de disposer d'un pluviomètre raccordé au datalogger de l'exploitation. Sans aucune de ces données, nous pourrions voir la hausse des capteurs (plus ou moins marquée selon la pluie) sans qu'aucune irrigation ne soit enregistrée, mais nous ne pourrions pas la quantifier.

7. Résumé

Le présent document fait partie de la documentation du programme de formation pour les irrigants du projet *Smart Green Water*, destiné à former les irrigants à la technologie numérique d'utilisation de sondes capacitatives de mesure de l'eau dans le sol pour la programmation de l'irrigation à la parcelle.

Il comprend une description des principes agronomiques de l'eau utilisable pour l'irrigation des cultures, des différents équipements et composants disponibles sur le marché pour la mesure de la teneur volumique en eau, des principaux critères et aspects à prendre en compte lors de l'installation au champ, ainsi que de l'interprétation graphique des données pour piloter l'irrigation à la parcelle.