



CARACTÉRISATION DES
SOLUTIONS NUMÉRIQUES
UTILISÉES DANS L'IRRIGATION

Unión de Pequeños
Agricultores y Ganaderos



Juin 2024

Diffusion publique

Livrable 2.5.1

Activité : Développement conjoint d'une méthode de présentation des solutions disponibles sur le marché

Table des matières

Introduction	4
Différents niveaux de technification dans la numérisation de l'irrigation	6
Solutions numériques d'irrigation en agriculture	9
Niveau 1. Programmation de l'irrigation	9
Niveau 2. Surveillance	9
Niveau 3. Irrigation de précision	10
Niveau 4. Systèmes d'irrigation intelligents	10
1- Présentation des principales solutions numériques d'irrigation	11
Systèmes d'irrigation automatisés	11
Programmeur d'irrigation	11
Capteurs	12
<i>Capteurs distants ou éloignés</i>	12
<i>Capteurs de proximité</i>	16
SiAR (Système d'Information Agroclimatique pour l'Irrigation)	34
SAGRA (Système agrométéorologique pour la gestion de l'irrigation dans l'Alentejo)	36
Autres	41
<i>Capteurs de surveillance du système d'irrigation</i>	43
2- Logiciels de gestion de l'irrigation	46
Quelques exemples de logiciels de gestion de l'irrigation.	47
3- Entreprises du secteur de l'irrigation	48
MODÈLE DE PRÉSENTATION DES SOLUTIONS NUMÉRIQUES D'IRRIGATION	49
Bibliographie	53

Index des illustrations

<i>Illustration 1. Approche très simple de suivi et de gestion de l'irrigation fondée sur des données.</i>	6
<i>Illustration 2. Approche de suivi et de gestion de l'irrigation fondée sur des données à l'aide d'un ensemble d'outils et de sources de données disponibles en ligne</i>	7
<i>Illustration 3. Approche de suivi et de gestion de l'irrigation à l'aide d'une plateforme intégrée de prescription d'irrigation, qui évite à l'irrigant les tâches quotidiennes de téléchargement et de traitement des données</i>	8
<i>Illustration 4. Principaux programmes de données ouvertes. Source : María José Checa Tragsatec</i>	14
<i>Illustration 5. Principaux programmes commerciaux. Source : María José Checa Tragsatec</i>	15
<i>Illustration 6. Architecture de l'agriculture 4.0. Source : Carmen Flores Cayuela, Université de Córdoba</i>	17
<i>Illustration 7. Dendromètre. Source : Fernando Casares, Université de Cordoue</i>	19
<i>Illustration 8. Capteurs de flux de sève. Source : Fernando Casares, Université de Cordoue</i>	21
<i>Illustration 9. Capteur de turgescence foliaire. Source : Francisco Casasres, Université de Córdoba</i>	22
<i>Illustration 10. Système de contrôle continu du potentiel hydrique du tronc, composé de micro tensiomètres installés sur le tronc des vignes</i>	23
<i>Illustration 11. Outil de l'entreprise « Vegetal signal », Hydroscore, une application pour contrôler en temps réel l'état hydrique des vignes</i>	24
<i>Illustration 12. Capteur capacitif</i>	26
<i>Illustration 13. Capteur FDR</i>	26
<i>Illustration 14. Capteur TDR</i>	27
<i>Illustration 15. Évolution de la teneur en humidité d'un sol à différentes profondeurs, montrant le moment où l'irrigation est effectuée</i>	27
<i>Illustration 16. Installation de sondes d'humidité à différentes profondeurs</i>	28
<i>Illustration 17. Tensiomètres</i>	31
<i>Illustration 18. Capteur capacitif de tension matricielle du sol</i>	31
<i>Illustration 19. Capteur résistif de tension matricielle du sol</i>	32
<i>Illustration 20. Station agroclimatique complète</i>	33
<i>Illustration 21. Réseau SIAR. Source : Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation</i>	35
<i>Illustration 22. Exemples d'informations fournies par une station agroclimatique du réseau SIAR</i>	36
<i>Illustration 23. Méthodologie de fonctionnement du service de notification d'irrigation</i>	38
<i>Illustration 24. Réseau de Stations Météorologiques Automatiques - SAGRA</i>	38
<i>Illustration 25. Utilisateur SAGRA-NET pour consulter les données quotidiennes (www.cotr.pt)</i>	39
<i>Illustration 26. Utilisateur MOGRA</i>	40
<i>Illustration 27. Le réseau de stations météorologiques actuellement en service en France</i>	41
<i>Illustration 28. Outils de Sencrop</i>	42
<i>Illustration 29. Station météorologique d'Isagri</i>	42
<i>Illustration 30. Outil de gestion de l'irrigation de Weenat</i>	42
<i>Illustration 31. Illustration Digimapa. Plateforme Tierra. Recherche entreprises d'irrigation</i>	48

Introduction

Les solutions numériques pour les exploitations agricoles irriguées contribuent à une gestion efficace de la ressource la plus stratégique en agriculture, **l'eau**.

Il convient de noter que 70 % de l'eau utilisée en Espagne est destinée à l'agriculture ; ce secteur joue donc un rôle essentiel pour économiser cette ressource dans la production alimentaire.

La technologie est importante pour optimiser les intrants en agriculture, en particulier l'eau qui est une ressource rare. En Espagne, les processus de modernisation des systèmes d'irrigation déployés depuis vingt ans ont progressivement remplacé les systèmes traditionnels d'irrigation par canaux à ciel ouvert par des systèmes d'irrigation en conduites sous pression (par aspersion et localisé), plus efficaces, ce qui a permis de réduire la consommation d'eau de 15 % ces dix dernières années.

Afin d'optimiser l'efficacité de l'utilisation de l'eau des systèmes d'irrigation actuels, il est indispensable que la conception de l'installation et sa gestion soient adaptées. Le progrès technologique permet de plus en plus de mesurer, de collecter des données et d'analyser la gestion de l'irrigation. Grâce à l'utilisation de différents types de capteurs et d'algorithmes, il est possible de calculer automatiquement les besoins en irrigation d'une culture, de manière à lui apporter la quantité d'eau dont elle a besoin au moment le plus opportun.

C'est ainsi qu'apparaît le concept d'irrigation de précision, qui repose sur l'utilisation des technologies disponibles pour connaître, au cours de la période d'irrigation, l'état du système sol-eau-plante et de contrôler l'apport en eau, en fournissant la quantité d'eau requise par la culture au bon moment.

De nombreuses solutions technologiques existent et constituent des éléments

fondamentaux des systèmes d'irrigation de précision, qu'il s'agisse des systèmes dans lesquels l'irrigant prend la décision finale d'irrigation que des systèmes d'irrigation de précision autonomes (irrigation intelligente). C'est pourquoi le présent document a été élaboré, dans le cadre du projet européen SUDOE **Smart Green Water**, comme un outil d'aide aux agriculteurs dans le processus de sélection de la technologie la plus adaptée à leur exploitation.

Ce rapport présente les principales caractéristiques des technologies numériques appliquées à l'irrigation. Il a été élaboré dans le cadre de l'activité « *Élaboration conjointe d'une méthode de caractérisation des solutions existantes sur le marché* » de **Smart Green Water**. Rédigé par l'Union de Petits Agriculteurs et Éleveurs (Espagne), il a également bénéficié de la collaboration de l'Université de Cordoue (Espagne), de l'Institut de Recherche et de Technologie Agroalimentaires (Espagne), du Centre Opérationnel et de Technologie de l'Irrigation (Portugal), d'Agri Sud-Ouest Innovation (France) et de l'Eurorégion Pyrénées-Méditerranée (France/Espagne).

Différents niveaux de technification dans la numérisation de l'irrigation

Concrètement, la gestion de l'irrigation consiste à veiller au bon fonctionnement de l'installation d'irrigation, afin d'intervenir rapidement en cas de panne ou d'autres anomalies, et à mettre à jour régulièrement les programmes d'irrigation pour les adapter aux conditions météorologiques et au développement de la culture. Dans ce contexte, une gestion de l'irrigation fondée sur les données apporte de l'objectivité aux processus concernés.

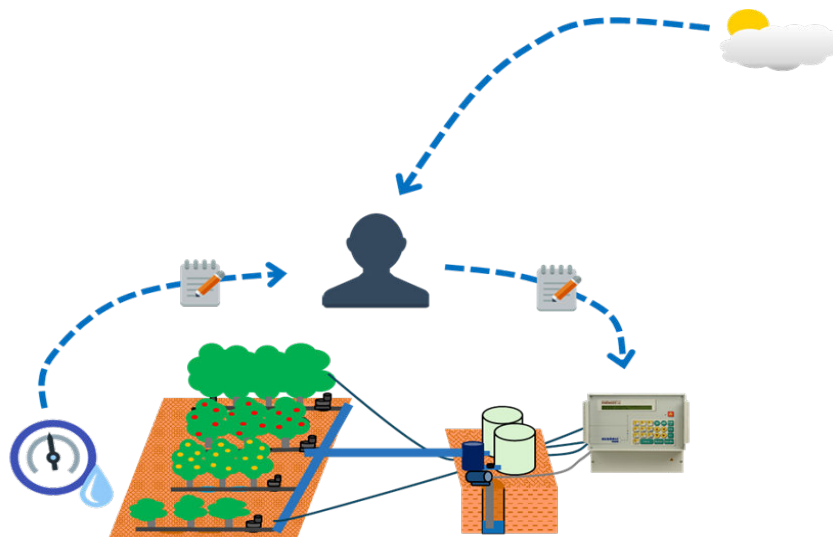


Illustration 1 : approche très simple de suivi et de gestion de l'irrigation fondée sur les données.

Une solution numérique plus complète peut s'appuyer sur les télécommunications pour suivre et gérer l'irrigation à distance, tout en exploitant un éventail plus large de données disponibles grâce à diverses technologies. D'une part, les programmeurs d'irrigation sont généralement accessibles à distance, via des plateformes en ligne ou des applications mobiles. Cela permet une meilleure interaction avec l'utilisateur, ainsi qu'une gestion fondée sur les données bien plus approfondie. Le contrôleur d'irrigation génère de nombreuses données qui peuvent

être utilisées pour suivre le processus, l'optimiser, et assurer la traçabilité de la gestion de l'irrigation. Par ailleurs, les capteurs installés sur le terrain sont généralement connectés à une plateforme en ligne, qui permet à l'utilisateur d'accéder aux données, de les visualiser, de les télécharger et de les traiter. Il existe également des plateformes en ligne permettant de consulter ou de télécharger des données météorologiques. Il en va de même pour les données de télédétection, qui contribuent au suivi du développement des cultures. Enfin, il existe des plateformes en ligne proposant des recommandations dans le domaine de l'irrigation. Tout cela permet de disposer d'une grande variété de données pour la gestion de l'irrigation.

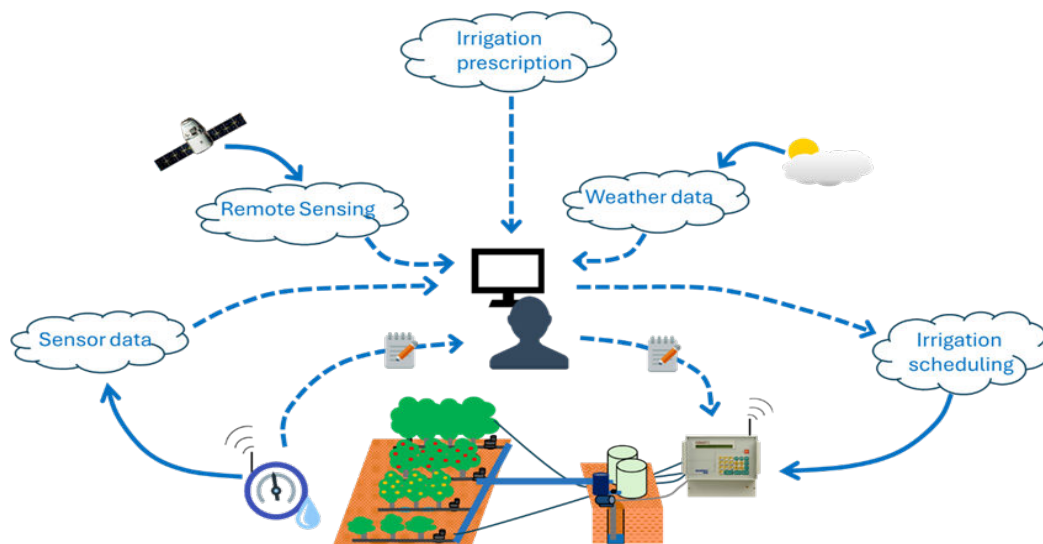


Illustration 2 : approche de suivi et de gestion de l'irrigation fondée sur les données à l'aide d'un ensemble d'outils et de sources de données disponibles en ligne

Le grand nombre de plateformes et de solutions, publiques ou commerciales, qui peuvent, d'une manière ou d'une autre, contribuer au suivi et à la gestion de l'irrigation, constitue justement l'une des principales difficultés. L'utilisateur se retrouve souvent submergé par la quantité de données et d'outils à sa disposition. Cela peut s'avérer d'autant plus complexe et fastidieux si l'utilisateur doit télécharger des données depuis certains outils pour les saisir dans d'autres.

Face à la diversité et à la complexité croissantes des technologies et des sources de

données pouvant être utilisées pour la gestion de l'irrigation, il est désormais possible de mettre en place des plateformes intégrant l'ensemble du circuit de données, évitant à l'irrigant les tâches quotidiennes de téléchargement, de traitement, etc. Ces plateformes accèdent aux données météorologiques, aux capteurs installés sur le terrain et/ou aux données de télédétection, puis procèdent à leur traitement afin de générer des instructions d'irrigation pouvant être transmises directement, d'une machine à l'autre, au programmeur d'irrigation.

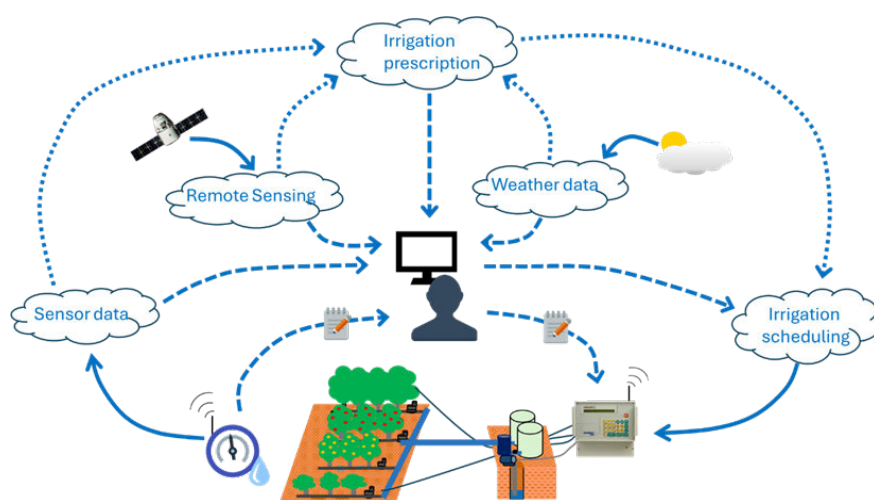


Illustration 3 : approche de suivi et de gestion de l'irrigation à l'aide d'une plateforme intégrée de prescription d'irrigation, qui évite à l'irrigant les tâches quotidiennes de téléchargement et de traitement des données

Cette méthode, beaucoup moins chronophage pour l'irrigant, permet d'étendre plus facilement le processus de suivi et de contrôle à un grand nombre de parcelles et de le mettre à jour plus fréquemment.

Solutions numériques d'irrigation en agriculture

Comme indiqué précédemment, les solutions numériques d'irrigation sont essentielles pour accroître l'efficacité de l'utilisation de l'eau en agriculture, un enjeu crucial dans de nombreuses régions du monde en raison de la pénurie croissante des ressources hydriques. Ces technologies permettent aux agriculteurs d'optimiser leurs ressources en eau, d'améliorer la productivité des cultures et de réduire l'impact environnemental.

Compte tenu des différents niveaux de technification dans la numérisation de l'irrigation, expliqués précédemment, voici les niveaux de numérisation dans la gestion de l'eau :

Niveau 1. Programmation de l'irrigation

Grâce aux programmeurs d'irrigation, les agriculteurs peuvent planifier leur calendrier d'irrigation et automatiser l'arrosage. Le programmeur peut être commandé manuellement ou à distance via des appareils mobiles ou des ordinateurs, offrant ainsi flexibilité et contrôle en temps réel, sans qu'il soit nécessaire d'être physiquement présent sur le terrain.

Niveau 2. Surveillance

Des informations sur les variables clés de la gestion de l'irrigation sont enregistrées à l'aide de capteurs (dispositifs de mesure) situés soit sur l'exploitation (par exemple, capteurs d'humidité du sol, capteurs climatiques ou capteurs de plantes), soit à distance (satellites et drones). Ces dispositifs enregistrent les informations en temps réel et transmettent les données via des systèmes de communication sans fil basés sur l'Internet des Objets (IoT), soit vers un ordinateur, soit vers un téléphone portable/une tablette, soit vers le cloud. De cette manière, le gestionnaire de l'irrigation peut suivre l'évolution des différentes variables liées à l'irrigation sur son exploitation.

Niveau 3. Irrigation de précision

La programmation de l'irrigation tient compte, entre autres, des données recueillies par le système de surveillance, du comportement hydraulique du système d'irrigation, des caractéristiques de la culture et du sol, de la stratégie d'irrigation à suivre, et elle est effectuée de manière à appliquer la quantité d'eau strictement nécessaire à la culture, au moment opportun pendant la période d'irrigation, réduisant les flux de retour d'eau par ruissellement et percolation.

Niveau 4. Systèmes d'irrigation intelligents

Ce sont des systèmes d'irrigation de précision avancés qui analysent automatiquement les données enregistrées par les différents types de capteurs (de proximité et distants) afin de déterminer autonomement la quantité d'eau à fournir, le moment et la durée de l'irrigation. Ces systèmes peuvent ajuster dans l'espace l'arrosage au sein de la parcelle en tenant compte de son hétérogénéité. Ils contrôlent automatiquement le début et la fin de chaque épisode d'irrigation.

Ces systèmes peuvent également intégrer des modèles prédictifs des besoins en irrigation à différentes échelles temporelles, basés sur l'analyse des données historiques des variables liées aux besoins en eau de la culture stockés dans le système de surveillance. Ils aident les agriculteurs à utiliser efficacement les ressources en eau tout au long de la saison d'irrigation en fonction de leur disponibilité en eau, en s'adaptant aux conditions environnementales et peuvent même intégrer d'autres facteurs tels que les aspects énergétiques.

En tenant compte des différents niveaux de numérisation de l'irrigation, nous présentons ci-dessous les principales solutions numériques d'irrigation actuellement commercialisées.

1- Présentation des principales solutions numériques d'irrigation

Systèmes d'irrigation automatisés

Programmateurs d'irrigation

Le programmeur d'irrigation est un dispositif électronique spécialement conçu pour doser l'eau et les engrais destinés aux cultures. Il s'agit généralement d'un équipement indispensable dans les exploitations agricoles équipées de systèmes d'irrigation sous pression, et son degré de sophistication varie en fonction du secteur, de la taille de l'exploitation et de son niveau technologique. Le programmeur d'irrigation constitue le cerveau d'une tête d'irrigation qui regroupe un ensemble de composants hydrauliques (vannes, pompes, réservoirs d'engrais, doseurs, etc.), coordonnés par le programmeur d'irrigation.

Concrètement, les programmeurs d'irrigation sont chargés d'exécuter les programmes d'irrigation et de fertigation. Ils activent ainsi les vannes d'irrigation, aux horaires convenus, en coordonnant les systèmes de pompage et d'injection d'engrais. En général, les irrigants définissent les heures de démarrage de l'irrigation et sa durée, ainsi que la quantité d'engrais à injecter. Lors d'une saison d'irrigation, les irrigants doivent modifier régulièrement la programmation de l'irrigation et de la fertigation afin de les adapter aux conditions météorologiques et au développement de la culture.

Les programmeurs d'irrigation offrent un niveau élevé d'autonomie de fonctionnement, qui inclut la réponse programmée à différents types de capteurs locaux (sondes de niveau, pH, conductivité électrique, humidité du sol, etc.). En pratique, les programmeurs d'irrigation peuvent être connectés à Internet et l'interaction de l'utilisateur avec ces appareils se fait généralement via une application web. Ainsi, les capacités des programmeurs d'irrigation à assurer un certain contrôle autonome au niveau local peuvent être complétées par l'interopérabilité avec des systèmes distants plus complexes, qui prennent les

décisions implicites et stratégiques dans le cadre d'une gestion de l'irrigation fondée sur les données, offrant ainsi la possibilité de s'appuyer sur un large éventail de technologies pour la prise de décision.

Capteurs

Ce sont les principaux éléments du système de surveillance et ils constituent donc un outil essentiel en agriculture de précision, car ils permettent une gestion efficace de l'irrigation afin d'optimiser l'utilisation des ressources en eau dans l'agriculture.

Ce sont également de précieux alliés pour améliorer la santé des cultures et accroître la productivité de manière durable.

Il existe deux catégories de capteurs selon leur proximité avec l'objet d'étude : les capteurs distants (Remote Sensing) et les capteurs de proximité (Proximal Sensing).

Capteurs distants ou éloignés

Les capteurs distants collectent des données à une distance considérable, puisqu'ils sont installés sur des satellites ou des drones équipés de technologies avancées de capture d'images. Ces capteurs peuvent couvrir de vastes superficies. L'analyse des images obtenues fournit des informations sur la variabilité spatiale des variables mesurées, permettant d'identifier les zones de stress hydrique, le développement du couvert végétal, la présence de ravageurs ou les carences nutritionnelles. Nous distinguerons les images satellites des images de drone.

Images satellites

Elles utilisent différentes bandes du spectre électromagnétique pour recueillir des informations sur l'état des cultures, la teneur en humidité du sol, l'utilisation de l'eau et d'autres facteurs environnementaux. Elles sont utiles pour surveiller régulièrement de vastes étendues de terres.

Grâce à ces images, il est possible d'obtenir des informations sur les variations

d'humidité dans les différentes zones de la parcelle agricole. Les images peuvent mettre en évidence des dysfonctionnements dans les systèmes d'irrigation, telles qu'une distribution inégale de l'eau, et contribuer à optimiser ces systèmes d'irrigation afin d'assurer une couverture uniforme.

Il convient de mentionner, en raison de son utilité pour l'irrigation, le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Rouse et al., 1973). Le NDVI peut être utilisé pour détecter le stress hydrique des cultures avant qu'il ne soit visible à l'œil nu. Une diminution des valeurs de NDVI (qui varient entre -1 et 1) peut indiquer un besoin en eau non satisfait, ce qui permet aux agriculteurs d'ajuster leurs pratiques d'irrigation pour cibler spécifiquement les zones présentant des signes de stress. Ceci est particulièrement utile dans les grandes exploitations où la surveillance visuelle directe n'est pas pratique.

La principale limite de cet indice est qu'il a tendance à saturer lorsque le couvert végétal est très dense.

Il existe une série de logiciels open source permettant de visualiser des images satellites :

GRATIS



Proveedor	Sensor	Cobertura	Resolución espectral	Resolución espacial	Resolución temporal
NASA	MODIS	2330 Km	Ms: 36 bandas (visible e infrarrojo cercano a térmico)	250, 500 y 1000 m	2 diarias (4 combinada TERRA/AQUA)
NASA	LANDSAT 8, 9	185 Km	Pan y Ms 10 bandas (visible, infrarrojo cercano a térmico)	15 (Pan), 30 y 100 m	16 / 8 días
NASA	ASTER	60 Km	Ms 14 bandas (visible, infrarrojo cercano a térmico)	15, 30, 90 m	16 días
ESA	SENTINEL1	80, 250, 400 Km	Banda C-SAR (polarizaciones VV, HH, VV+VH, HH+HV)	5*5, 5*20, 20*40 m.	6 días
ESA	SENTINEL2	290 Km	Ms 13 bandas (visible e infrarrojo cercano y medio)	10, 20, 60 m	10 / 5 días
ESA	SENTINEL3	1270 Km	Ms 21 bandas (OLCI), SLSTR y SRAL	300 m	1 día

Illustration 4 : principaux logiciels open source. Source : María José Checa Tragsatec



Proveedor	Sensor	Cobertura	Resolución espectral	Resoluc. espacial	Resoluc. temporal
Airbus	Spot6- Spot7	60 Km	Pan y Ms: 4 bandas (visible, nir)	Pan 1,5 m y 6 m	4 días
Airbus	Pléiades 1A-1B	20 Km	Pan y Ms: 4 bandas (visible, nir)	Pan 50 cm Ms 2 m	4 días (2 días const.)
Airbus	Pléiades NEO	14 Km	Pan y Ms: 6 bandas (visible, nir)	Pan 30 cm Ms 1,2 m	2 veces al día
European Space Imaging (EUSI)	Maxar Worldview Constellation (4 activos)	16 Km	Pan y Ms: hasta 16 bandas (visible a irc)	Pan 30 cm	3 días
				Ms 1,2 m	
European Space Imaging (EUSI)	GeoEye	15 Km	Pan y Ms: 4 bandas (visible, nir)	Pan 50 cm	3 días
				Ms 2 m	
Planet	SkySat	8-5,5 Km	Pan y Ms: 4 bandas (visible, nir)	Pan 57 cm	<1 día
				Ms 75 cm	

Illustration 5 : principaux programmes commerciaux. Source : María José Checa Tragsatec

De plus, le programme *Copernicus* propose des services d'information fondés sur des données d'observation de la Terre par satellite (il utilise le satellite Sentinel) et sur des données *in situ* (non spatiales).

Les services et données de *Copernicus* sont fournis gratuitement aux utilisateurs

<https://www.copernicus.eu/fr>

Images de drone

Les drones sont des véhicules aériens sans pilote (UAV) de petite ou moyenne taille, qui doivent être gérés par du personnel qualifié.

Les drones peuvent embarquer différents types de capteurs tels que des caméras multi spectrales, thermiques et LiDAR (Light Detection and Ranging), ainsi que des capteurs proches infrarouge (NIR). Ils fournissent des informations similaires à celles des images satellites, mais ce sont des images haute résolution, dont la fréquence varie en fonction du moment où les vols sont effectués.

En agriculture, ils peuvent avoir différents usages :

- Les drones équipés de capteurs proches infrarouge (NIR) ou de caméras thermiques peuvent identifier les zones d'une parcelle présentant différents niveaux d'humidité.
- Ils peuvent également être équipés de capteurs capables de mesurer des indicateurs clés de la santé du sol et des cultures. Ces informations peuvent être utilisées pour irriguer et fertiliser de manière plus efficace, en maximisant l'absorption des nutriments et en minimisant le gaspillage.
- Dans certains systèmes plus avancés, les données recueillies par les drones peuvent être intégrées directement à des systèmes d'irrigation intelligents. Cela permet de déclencher automatiquement l'irrigation dans les zones où les données indiquent un déficit d'humidité.

Il convient de souligner que l'utilisation de drones est soumise à une série d'autorisations et de réglementations, dont il faut avoir connaissance avant toute utilisation.

Capteurs de proximité

Les capteurs de proximité sont en contact direct avec le sol, les plantes, le système d'irrigation, ou sont placés à proximité immédiate. Ils fournissent des mesures détaillées et spécifiques au site, qui sont essentielles pour les décisions de gestion au niveau de la parcelle.

À l'heure actuelle, la plupart des capteurs de proximité sont des capteurs sans fil de type IoT, car ils transmettent les informations enregistrées en temps réel via Internet. Les informations sont stockées sur des serveurs accessibles via internet, ou le cloud, auxquels les utilisateurs peuvent accéder depuis leurs ordinateurs, tablettes ou téléphones portables.

La figure suivante présente l'architecture du réseau de surveillance d'une exploitation irriguée, composée de capteurs environnementaux, de sol, de plante et

du système d'irrigation, qui transmettent les données au « cloud » afin qu'un logiciel spécifique puisse les analyser et fournir à l'utilisateur des recommandations d'irrigation, qu'il pourra ensuite saisir dans le programmeur. Ainsi, le programmeur/contrôleur d'irrigation pourra agir automatiquement en suivant les instructions reçues du logiciel de gestion de l'irrigation.

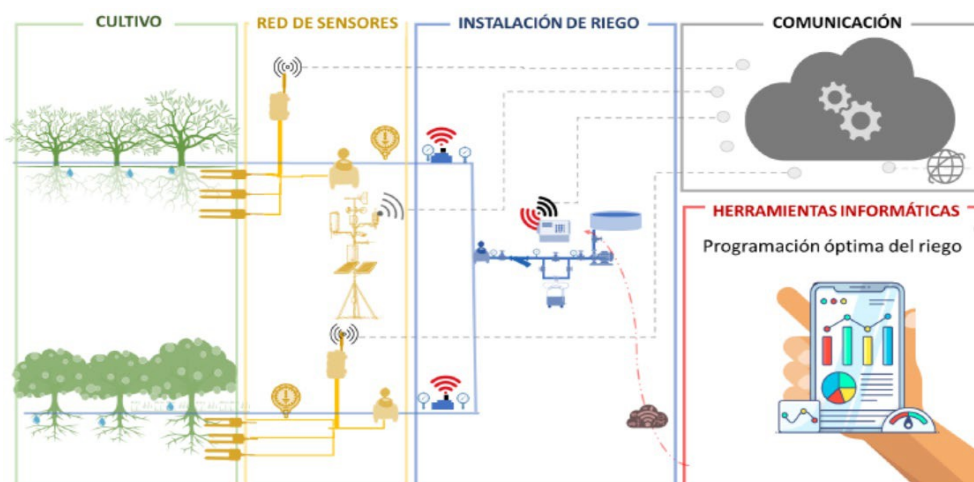


Illustration 6 : architecture de l'agriculture 4.0. Source : Carmen Flores Cayuela, Université de Cordoue

Les principales caractéristiques et les principaux usages des capteurs de proximité sont décrits ci-après.

Capteurs de plante

Parmi les capteurs de proximité utilisés pour les plantes, on peut citer :

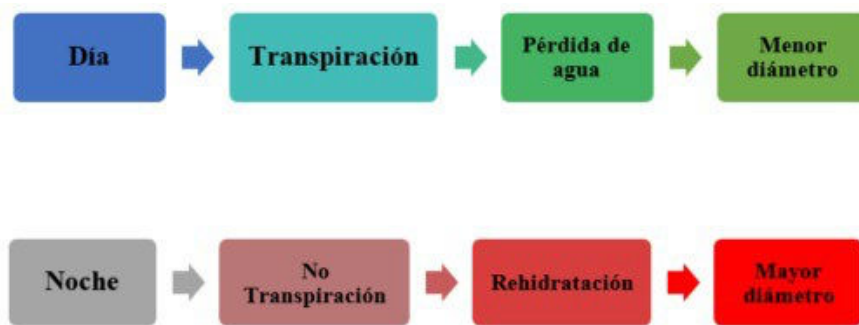
Les dendromètres : capteurs qui mesurent en continu le diamètre du tronc ou de toute autre partie de la plante (tige, branche, fruit, etc.).

Les variations du diamètre du tronc entre le jour et la nuit sont liées à l'état hydrique de la plante. La journée, l'arbre transpire et perd de l'eau, ce qui provoque la contraction du tronc. En revanche, la nuit, il n'y a pas de transpiration, mais il y a absorption d'eau par les racines. Ainsi, l'arbre se réhydrate, et le diamètre du tronc

augmente pendant la nuit.

Les dendromètres de précision permettent de mesurer les variations quotidiennes du diamètre du tronc, même si celles-ci sont très faibles (de l'ordre de quelques centaines de microns). Grâce à ces informations, il est possible de déterminer si l'arbre est plus ou moins stressé (plus la variation quotidienne du diamètre est importante plus le stress hydrique est élevé) et de programmer l'irrigation en conséquence.

De manière générale, on peut rechercher la corrélation suivante :



Ils sont placés sur le tronc ou sur la partie de la plante à mesurer, comme le montre l'image suivante.



Illustration 7 : dendromètre. Source : Fernando Casares, Université de Cordoue

Les dendromètres à bande ou périmétrique : ils se composent d'une bande en acier inoxydable (ou d'un câble) qui s'enroule fermement autour de la circonférence du tronc de l'arbre.

La bande est reliée au capteur de manière à convertir l'augmentation ou la contraction du périmètre de l'arbre en une variable électrique proportionnelle à ce changement. Il est recommandé d'utiliser des bandes ou des câbles en acier inoxydable ayant un coefficient thermique linéaire aussi faible que possible afin de minimiser l'influence de la température sur la qualité de la mesure.

Il s'agit de capteurs non invasifs, adaptés aux diamètres supérieurs à 5 cm. Ils peuvent être réutilisés sur différents arbres en changeant simplement la bande.

Les dendromètres ponctuels ou radiaux : ils mesurent la variation du rayon du tronc en un point précis.

Ces appareils se composent de deux tiges : l'une qui perce le tronc pour assurer la stabilité et la seconde qui est fermement appuyée contre le xylème du tronc. C'est sur la seconde tige que se trouve le capteur qui enregistre l'expansion et la contraction d'une tige en contact avec la surface du tronc et les convertit en un signal électrique. Il existe plusieurs types de technologie de capteurs : LVTD, potentiométrique, à jauges d'extensométrie, etc.

Capteurs de flux de sève

Ces capteurs mesurent en continu la vitesse d'écoulement de la sève dans le tronc et les branches afin de mesurer indirectement la transpiration. Ils permettent de calculer les besoins en eau de la culture à partir de coefficients de cultures déterminés pour les différentes phases de développement, sur la base de l'estimation de la transpiration.

Le fonctionnement de ces capteurs consiste à appliquer une source de chaleur constante au flux de sève brute (capteur invasif) ou à proximité de celui-ci (capteur externe), à l'aide d'une résistance électrique insérée dans une sonde et alimentée par une batterie. La température à proximité de cette source est influencée par l'intensité plus ou moins forte du flux de sève, la perte de chaleur étant directement proportionnelle à ce flux (débit).

Avec deux sondes ou plus, insérées radialement dans le xylème, on mesure les variations de température qui, grâce à une corrélation appropriée, permettent d'obtenir la valeur de la transpiration de façon continue et quasi en temps réel. Cette corrélation est influencée par le type de plante et diverses variables climatiques (rayonnement solaire, etc.) ; il est donc nécessaire de calibrer la sortie du capteur afin que la mesure soit proportionnelle au flux de sève. Sans calibrage, l'erreur dans l'estimation de la transpiration peut atteindre environ 34 %.

Il est nécessaire de dissocier l'effet de la demande évaporative de l'atmosphère des

données relatives au flux de sève, afin d'obtenir des informations réelles sur l'état de la culture.

Ces méthodes peuvent être utilisées sur des cultures ligneuses ainsi que sur certaines plantes herbacées à tige épaisse et robuste (maïs et tournesol).

Il existe différentes manières de déterminer les variations de température en fonction du flux de sève. Dans les conditions méditerranéennes, la méthode la plus adaptée est celle du quotient calorique, une variante de la méthode de l'impulsion thermique.

Jusqu'à présent, l'utilisation de ce type de capteurs se limite principalement à la recherche et au développement, et reste très limité au niveau commercial.



Illustration 8 : capteurs de flux de sève. Source : Fernando Casares, Université de Cordoue

Capteur de turgescence foliaire

Ils mesurent en continu l'état hydrique de l'arbre à travers la variation de pression que la sève cellulaire de la feuille exerce sur la paroi cellulaire.

L'enregistrement quotidien de la variation de pression dans les feuilles et de la température ambiante permet de déterminer si l'arbre est correctement hydraté ou s'il souffre de stress hydrique, et permet même de distinguer trois états de la plante :

- Bien irrigué
- Stress léger
- Stress sévère



Illustration 9 : capteur de turgescence foliaire. Source : Francisco Casasres, Université de Cordoue

Capteurs de température des plantes

La différence de température entre la feuille et l'air est liée au niveau d'hydratation de la feuille ; cette différence peut donc être utilisée pour mesurer l'état hydrique des plantes.

Inconvénients des capteurs de proximité des plantes :

- Précision : les réponses fournies par ce type de capteurs peuvent parfois être similaires, qu'il s'agisse d'une situation de stress hydrique que d'un excès d'eau. C'est pourquoi il est nécessaire de disposer d'informations complémentaires provenant d'autres types de dispositifs, tels que les capteurs d'humidité du sol.
- Coût : l'installation de ce type de dispositifs peut être coûteuse, en particulier sur de grandes superficies.
- Complexité technique : la configuration et l'entretien des capteurs nécessitent des compétences techniques spécifiques. Cela peut représenter un défi pour les agriculteurs ou techniciens si ces technologies ne leur sont pas familières.
- Dommages et durabilité : les capteurs sur le terrain sont exposés à des conditions environnementales susceptibles de les endommager ou de réduire

leur durée de vie, telles que la pluie, le vent et l'exposition directe au soleil.

Enregistrement continu du potentiel hydrique du tronc

Des capteurs permettant de contrôler en continu le potentiel hydrique du tronc, basés sur des micro tensiomètres, ont récemment fait leur apparition sur le marché.



Illustration 10 : système de contrôle continu du potentiel hydrique du tronc composé de micro tensiomètres installés sur le tronc des vignes

Le micro tensiomètre destiné au contrôle continu du potentiel hydrique du tronc des cultures fruitières permet de mieux comprendre les variations de l'état hydrique de la plante, car il intègre à la fois l'environnement aérien et celui du sol, ainsi que la physiologie et la gestion de la culture (Lakso et al., 2022). Les informations continues sur ce paramètre améliorent considérablement la capacité à déterminer les pratiques de gestion de l'irrigation, notamment pour les cultures en situation de déficit hydrique, comme le raisin de cuve, ou dans des situations où la disponibilité en eau pour l'irrigation est limitée. Les données de suivi sont disponibles en temps réel sur une plateforme facile à utiliser pour les gestionnaires de l'irrigation.

D'autres innovations sont en cours en France, portant sur l'analyse des signaux électriques émis par les plantes. Il s'agit du capteur de bio-interface VS8, qui permet d'enregistrer l'activité électrique des plantes. Cette activité des plantes permet l'échange d'informations à l'ensemble de l'organisme végétal. Elle est associée à la capacité de s'adapter rapidement aux stimuli externes, en particulier aux facteurs de stress environnementaux.

À l'heure actuelle, on considère qu'elle joue un rôle clé dans l'adaptation de la plante au stress biotique et abiotique (entreprise Vegetal signal, France).

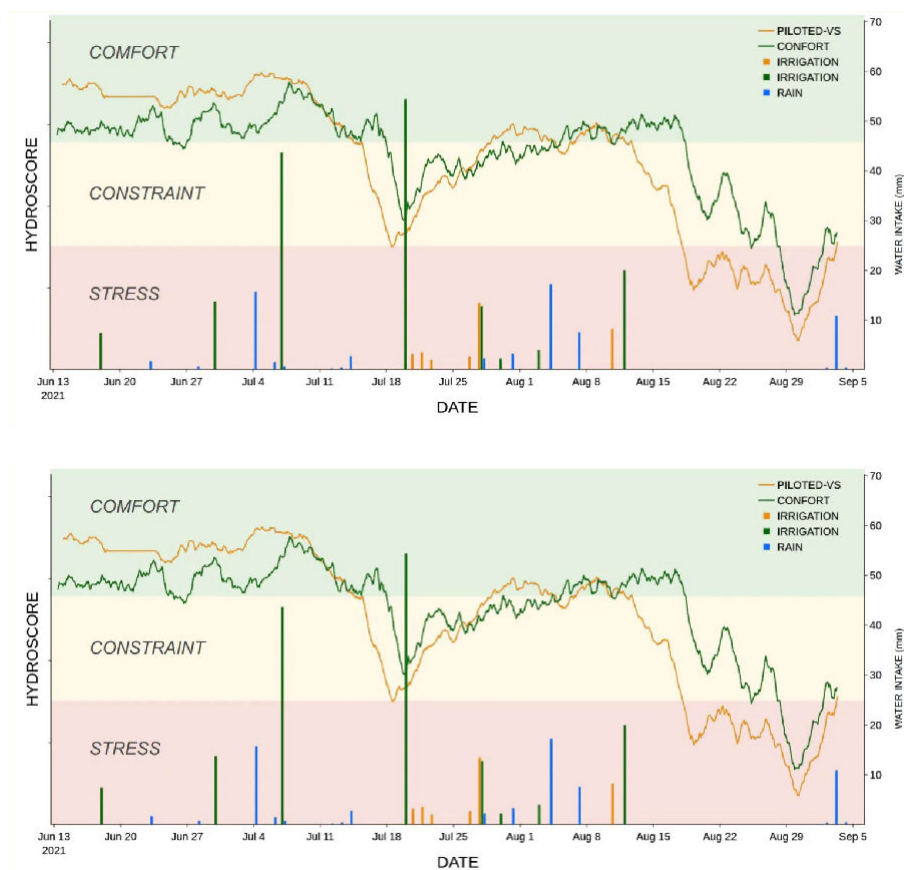


Illustration 11 : outil de l'entreprise « Vegetal signal », Hydroscore, une application permettant de contrôler en temps réel l'état hydrique des vignes

Capteurs de sol

Ces capteurs mesurent différentes variables intervenant dans l'irrigation et la fertilisation, telles que la teneur en humidité, le potentiel matriciel, la température, la conductivité électrique et la teneur en NPK. Les informations fournies facilitent la prise de décision pour réaliser des irrigations et des fertirigations de précision.

Capteurs de teneur en humidité

Ils permettent de mesurer la teneur volumétrique en eau, une information qui sera utilisée pour la programmation de l'irrigation. Il existe différents types de capteurs selon leur principe de fonctionnement, les plus utilisés étant les capteurs

diélectriques capacitifs, TDR (réflectométrie dans le domaine temporel) et FDR (réflectométrie dans le domaine fréquentiel).

Les différents types de capteurs diélectriques déterminent, par divers procédés, la constante diélectrique du sol (en tant que milieu dépourvu de conductivité électrique). La constante diélectrique d'un sol varie en fonction du pourcentage d'air et d'eau ; ainsi, les fluctuations de cette variable sont liées à la teneur volumétrique en eau.

Elles fournissent la teneur volumétrique en eau du sol au fil du temps. Généralement, la valeur de la teneur en eau enregistrée à une certaine heure de la journée est utilisée pour calculer le déficit hydrique du sol, donnée nécessaire à la programmation de l'irrigation.



Illustration 12 : capteur capacitif



Illustration 13 : capteur FDR



Illustration 14 : capteur TDR

La teneur en humidité du sol varie en fonction de la profondeur ; c'est pourquoi des mesures sont réalisées à différentes profondeurs afin de suivre l'évolution de l'humidité dans la zone la plus superficielle, dans la zone où se concentrent les racines de la culture, et dans la zone hors de portée des racines, afin d'observer s'il y a ou non percolation, comme le montre la figure suivante.

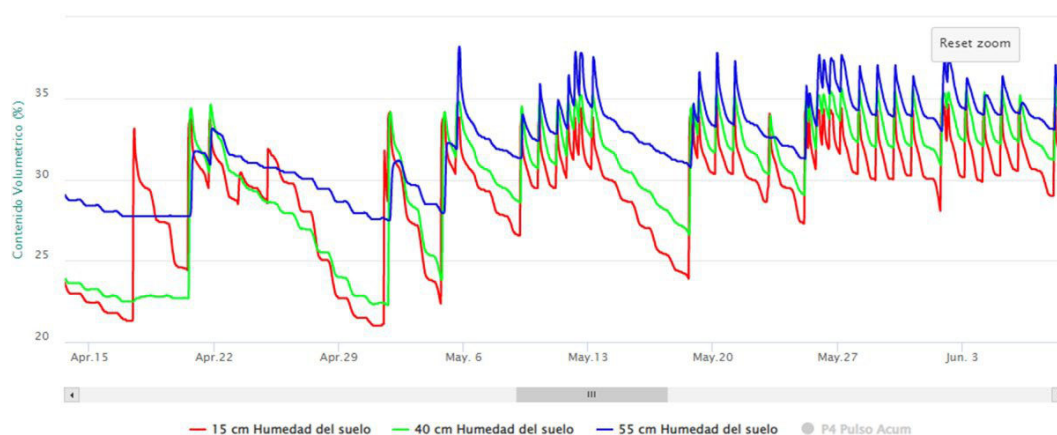


Illustration 15 : évolution de la teneur en humidité d'un sol à différentes profondeurs, où l'on distingue le moment où l'irrigation est effectuée

Sur l'image précédente, on peut voir que le capteur capacitif est de forme tubulaire, ce qui permet de mesurer la teneur en humidité à différentes profondeurs, tandis que les deux autres types de capteurs nécessitent l'installation d'une sonde à chaque profondeur que l'on souhaite mesurer. Le type de sol et les pratiques agricoles mises en œuvre sur la parcelle où la sonde est installée doivent être pris en compte lors du choix effectué, chacun de ces dispositifs étant fiable.



Illustration 16 : installation de capteurs d'humidité à différentes profondeurs

Il est important d'avoir à l'esprit, lors de l'utilisation des données fournies par les capteurs d'humidité du sol, qu'il s'agit de mesures ponctuelles de la teneur en humidité. Idéalement, il faudrait disposer d'au moins une sonde dans chaque secteur d'irrigation.

Ces appareils sont robustes et résistants aux conditions climatiques défavorables, comme les températures élevées et l'humidité, ce qui garantit leur fiabilité et une longue durée de vie en extérieur (ils peuvent être utilisés pendant plusieurs saisons).

Ils sont faciles à installer et nécessitent peu d'entretien, ce qui permet de les utiliser dans de nombreux milieux agricoles.

Afin d'obtenir des informations fiables, il est recommandé de respecter les critères d'installation suivants :

- Installer l'appareil à la verticale d'un goutteur afin de mesurer correctement la teneur en eau du sol après les apports d'irrigation.
- Dans la zone où le système racinaire de la culture est le plus développé afin de détecter les variations d'humidité du sol dues à l'absorption par la culture.

Dans les cultures ligneuses, autour de ≈ 50 cm.

- À différentes profondeurs ($\approx 15, 30$ et 45 cm selon la culture) :
 - $\Rightarrow 15$ et 30 cm $\rightarrow$ disponibilité en eau pour la plante.
 - $\Rightarrow 45$ cm $\rightarrow$ pertes par percolation
- Bon contact avec le sol
 - $\Rightarrow$ Veiller à ne pas altérer la structure du sol.

Capteurs de potentiel matriciel

Les capteurs de potentiel matriciel du sol (PMS) mesurent, directement ou indirectement, la force avec laquelle le sol retient l'eau. Ce potentiel reflète l'état hydrique du sol : plus la valeur est basse (plus elle est négative), plus la force avec laquelle le sol retient l'eau est grande, et inversement. La fonction qui relie le potentiel matriciel du sol à la teneur en eau est appelée « courbe caractéristique du sol ». Grâce à ces informations, il est possible de déterminer la valeur de la capacité au champ et du point de flétrissement permanent du sol cultivé, et ainsi de calculer avec précision le bilan hydrique du sol et, par conséquent, la dose d'irrigation.

Ces capteurs permettent de déterminer le moment optimal pour l'irrigation, mais ne détectent pas les excès d'irrigation.

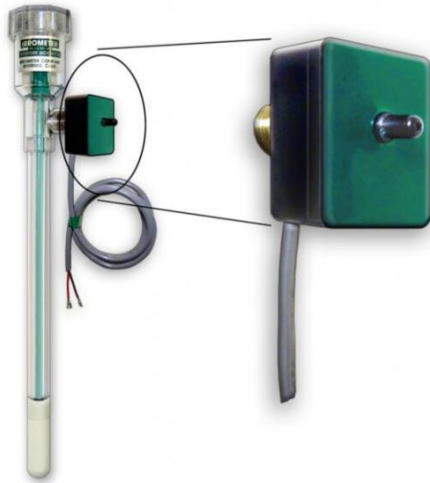
La capacité au champ, indépendamment de la texture ou du type de sol, est connue ; elle se situe entre -5 et -33 kPa, tandis que le point de flétrissement permanent se situe en dessous de -1500 kPa. Tous les appareils qui mesurent le potentiel matriciel ne conviennent pas à tous les types de sols ; il est donc essentiel de connaître la fourchette dans laquelle on se trouve pour choisir l'appareil approprié.

Il existe différents types de capteurs matriciels.

Tensiomètres. Le capteur se compose d'un tube rempli d'eau muni d'une capsule en céramique poreuse située à l'une de ses extrémités, qui est enterrée dans le sol à la profondeur souhaitée ; l'autre extrémité du tube est reliée à un capteur de pression négative (vacuomètre).

Lorsque le sol s'assèche, la tension matricielle augmente (la valeur absolue lue par le tensiomètre augmente), tandis qu'en cas d'humidification, celle-ci diminue (la valeur absolue lue par le tensiomètre baisse), pouvant atteindre des valeurs proches de zéro lorsque le sol est saturé en eau. À partir de cette propriété, il est possible d'estimer la teneur en eau du sol. Pour les sols maraîchers, on utilise généralement ce type de capteurs, car ce sont des sols qui présentent des niveaux d'humidité relativement

élevés, entre la saturation et la capacité au champ, et il est plus intéressant de mesurer la tension du sol que son humidité.



TENSIOMETROS con Salida: 4-20 mA
(Necesita alimentación, 24 Vcc)



TENSIOMETROS con Salida: 0 - 4,5 V
(Necesita alimentación, 5 Vcc)

Illustration 17 : tensiómetros

Capteurs résistifs et capacitifs en matériau poreux

Ils sont généralement utilisés dans les cultures ligneuses ou dans le cadre de stratégies d'irrigation déficitaire contrôlée, car ils permettent d'atteindre des niveaux de potentiel allant jusqu'à -230 kPa. Ils exploitent soit le principe de la résistance électrique variable due aux variations de l'humidité du sol, soit le calcul de la constante diélectrique du sol pour déterminer la tension hydrique du sol.



Illustration 18 : capteur capacitif de tension matricielle du sol



Illustration 19 : capteur résistif de tension matricielle du sol

Capteurs de conductivité électrique

Ils mesurent la salinité du sol, qui peut influencer l'absorption d'eau et de nutriments par les plantes.

Capteurs environnementaux

Ces capteurs enregistrent les variables climatiques nécessaires au calcul de l'évapotranspiration de référence, E_{To} , une donnée fondamentale pour la programmation de l'irrigation (température de l'air, humidité relative et pression relative de l'air, rayonnement, vitesse et direction du vent, précipitations). L'enregistrement des variables est continu.

Parmi ces types de capteurs, on peut distinguer les capteurs suivants :

- Capteur de rayonnement (pyranomètre)
- Capteur de température ambiante
- Capteur d'humidité relative
- Capteur de précipitations
- Capteur de vitesse du vent
- Capteur de direction du vent, etc.

Ces capteurs peuvent être intégrés dans une station agroclimatique (Illustration 18).

Équipés de capacités de communication sans fil, telles que le Wi-Fi, le Bluetooth ou la connectivité cellulaire, ces capteurs peuvent transmettre des données en temps réel vers un système central ou directement vers des appareils mobiles, permettant ainsi un suivi continu et des ajustements rapides dans la gestion de l'irrigation.

Ils offrent généralement une haute précision de mesure et sont robustes, ce qui leur confère une grande durabilité et résistance.

Ils peuvent être intégrés à des systèmes d'irrigation intelligente pour automatiser l'irrigation en fonction des conditions climatiques et des besoins spécifiques des plantes, améliorant ainsi l'efficacité de l'utilisation de l'eau et réduisant le gaspillage.

En général, les capteurs environnementaux sont faciles à installer et à entretenir. Leur conception permet une configuration rapide sur le terrain et un minimum d'entretien, ce qui les rend particulièrement adaptés à une utilisation agricole à grande échelle.



Illustration 20 : station agroclimatique complète

SiAR (Système d'Information Agroclimatique pour l'Irrigation)

Le ministère de l'Agriculture du Gouvernement espagnol, par l'intermédiaire de la Sous-direction générale de l'Irrigation et des Infrastructures rurales, met gratuitement à disposition des utilisateurs toutes les informations recueillies via le Réseau SiAR de stations Agrométéorologiques.

Il s'agit d'une infrastructure qui **collecte, enregistre et diffuse les données climatiques** nécessaires au calcul des besoins en eau dans les zones irriguées.

Elle fournit des informations **utiles, rigoureuses et de qualité**, permettant aux techniciens et aux agriculteurs de calculer les besoins en eau des cultures et de programmer leurs irrigations.

Cet outil permet d'améliorer la planification, la gestion et le contrôle des exploitations irriguées pour favoriser les économies d'eau et d'énergie, et répondre aux demandes technologiques des professionnels du secteur.

Il comprend plus de 500 stations météorologiques, qui couvrent environ 90 % de la superficie irrigable en Espagne, et fournissent les informations nécessaires pour déterminer l'évapotranspiration de référence et calculer ensuite les besoins hydriques des cultures irriguée.

Il s'agit d'un réseau collaboratif qui regroupe les stations appartenant au Ministère et celles des 12 communautés autonomes participantes, lesquelles assurent également le lien direct avec les irrigants, destinataires finaux des informations fournies par le système.

<https://eportal.mapa.gob.es/websiar/Inicio.asp>

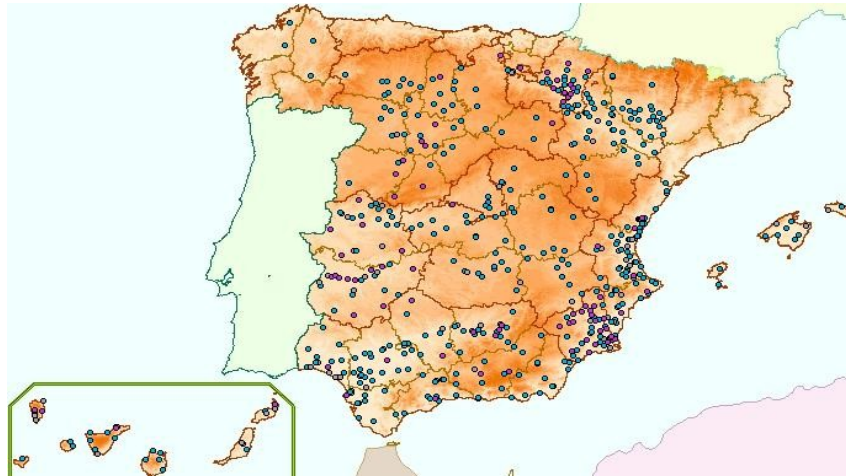


Illustration 21 : réseau SIAR. Source : Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation

Seleccionar estaciones:

Comunidad Autónoma:

☒ Filtrar por provincias ☐ Filtrar por Comunidad de Regantes

Provincia:

Estación:

Estaciones seleccionadas:

Seleccionar el tipo de dato de la consulta:

Tipo de dato:

Seleccionar rango de fechas:

Fecha inicial:

Fecha final:

Seleccionar parámetros de consulta:

☒ Temperatura ☒ Humedad ☒ Vel. Viento ☒ Dir. Viento ☒ Precipitación ☒ Radiación ☐ Temp. Suelo ☒ Eto

☒ Temp Media (°C) ☒ Temp Max (°C) ☒ Hora Temp Max ☒ Temp Mínima (°C) ☒ Hora Temp Min

☒ Humedad Media (%) ☒ Humedad Max (%) ☒ Hora Hum Max ☒ Humedad Min (%) ☒ Hora Hum Min

☒ VelViento (m/s) ☒ VelVientoMax (m/s) ☒ Hora VelMax

☒ DirViento (°) ☒ Dir viento Vel Max (°)

☒ Precipitación (mm) ☒ P. Efect (mm)

☐ Radiación (MJ/m2)

☐ Temp Suelo 10 cm (°C) ☐ Temp Suelo 30 cm (°C)

☒ Eto (mm)

Consulta de datos diarios

[Exportar el informe de datos a un archivo CSV](#)

Córdoba

Fecha	Temp Media (°C)	Temp Max (°C)	Hora T° Max	Temp Min (°C)	Hora T° Min	Hum Media (%)	Hum Max (%)	Hora Hum Max	Hum Min (%)	Hora Hum Min	Vel Viento (m/s)	Dir Viento (°)	Vel V. Max (m/s)	Hora Vel Max V.	Dir V. Vel Max (°)	Rad (MJ/m2)	Precip (mm)	P. Efect (mm)	Eto (mm)
22/03/2022	14,26	19,42	15:24	11,92	05:56	86,90	99,40	02:08	52,74	14:06	1,16	42,30	5,97	16:34	201,90	13,65	11,20	6,48	2,31
23/03/2022	13,99	18,63	16:52	11,51	04:52	78,60	99,40	05:22	54,24	16:04	2,73	47,13	7,88	17:02	77,90	8,43	0,40	0,00	2,23
24/03/2022	14,94	18,23	13:06	12,05	07:40	70,20	94,00	00:00	50,94	16:14	2,91	48,26	8,58	13:08	38,71	6,75	0,80	0,00	2,29
25/03/2022	13,96	16,49	13:34	10,03	23:58	73,40	99,50	22:54	52,51	01:56	2,07	61,77	7,91	01:33	48,31	6,15	1,80	0,00	1,80
26/03/2022	13,99	18,96	14:06	8,56	07:04	77,80	99,50	00:30	48,91	15:12	1,13	58,50	4,25	14:07	34,49		0,40		
27/03/2022	14,65	21,18	15:40	8,15	06:24	69,21	95,30	06:30	39,79	16:12	1,52	60,17	5,07	12:36	67,24		0,00		
28/03/2022	15,10	21,24	13:22	10,17	04:56	72,10	97,70	23:20	42,29	12:52	1,26	98,10	5,39	09:02	61,91		0,00		

Illustration 22 : exemples d'informations fournies par une station agroclimatique du réseau SIAR

SAGRA (Système agrométéorologique pour la gestion de l'irrigation dans l'Alentejo)

Le Centre Opérationnel et de Technologie de l'Irrigation (COTR), au Portugal, s'est engagé dans le transfert de technologies en matière d'irrigation, notamment dans le cadre de services liés à l'utilisation efficace de l'eau d'irrigation. L'application de l'agrométéorologie a constitué l'un des principaux axes de travail, avec pour objectif principal d'estimer les besoins en eau des cultures. Cette activité est considérée comme fondamentale pour le développement d'une agriculture irriguée durable et compétitive, visant non seulement à accroître l'efficacité de l'utilisation de l'eau,

mais aussi à atteindre la plus grande précision possible quant au moment de l'irrigation, répondant à la fois aux exigences techniques du secteur et aux pressions environnementales.

La détermination des besoins en eau des cultures poursuit deux objectifs principaux :

- Dimensionnement – généralement effectué lors de la planification de la mise en place de l'irrigation. Son objectif principal est d'estimer la consommation annuelle, afin de déterminer la surface maximale irriguée en fonction de la disponibilité existante, ainsi que les besoins pendant la haute saison, ce qui permet de dimensionner le réseau d'irrigation.
- Gestion (notifications d'irrigation) – généralement effectuée pendant l'exploitation d'une zone irriguée. Son principal objectif est de déterminer, avec la plus grande précision possible, la quantité d'eau à apporter en fonction du stade phénologique de la culture.

Informations de base pour créer un service de notification d'irrigation

- Des données agrométéorologiques de qualité, nécessaires pour estimer l'évapotranspiration de référence des cultures (ET₀) : température de l'air, humidité relative de l'air, vitesse du vent à 2 m et rayonnement solaire global. À ces paramètres s'ajoute l'importance de surveiller les précipitations afin d'établir un bilan hydrique.
- Culture : on utilise les informations disponibles dans les bases de données sur les cultures (Allen et al., 1998), avec la description des principales étapes du développement végétatif de la culture (durée) et l'identification des périodes durant lesquelles la culture est plus ou moins sensible au stress. Ces informations sont adaptées aux conditions réelles de la région.

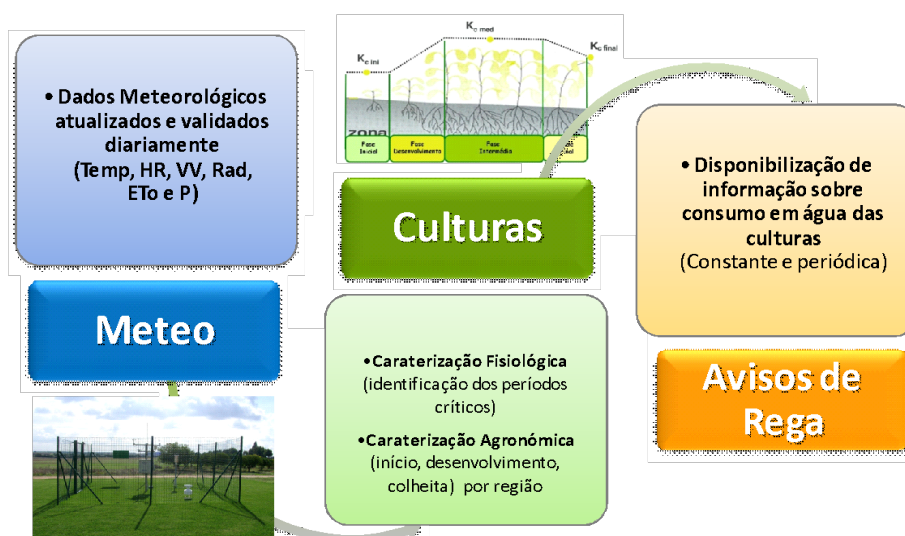


Illustration 23 : méthodologie de fonctionnement du service de notification d'irrigation

Afin d'assurer le service de notification d'irrigation dans l'Alentejo, le COTR exploite depuis 2001 le réseau SAGRA (Système agrométéorologique pour la gestion de l'irrigation dans l'Alentejo), composé de 14 stations météorologiques automatiques qui couvrent les principales zones irriguées de l'Alentejo.

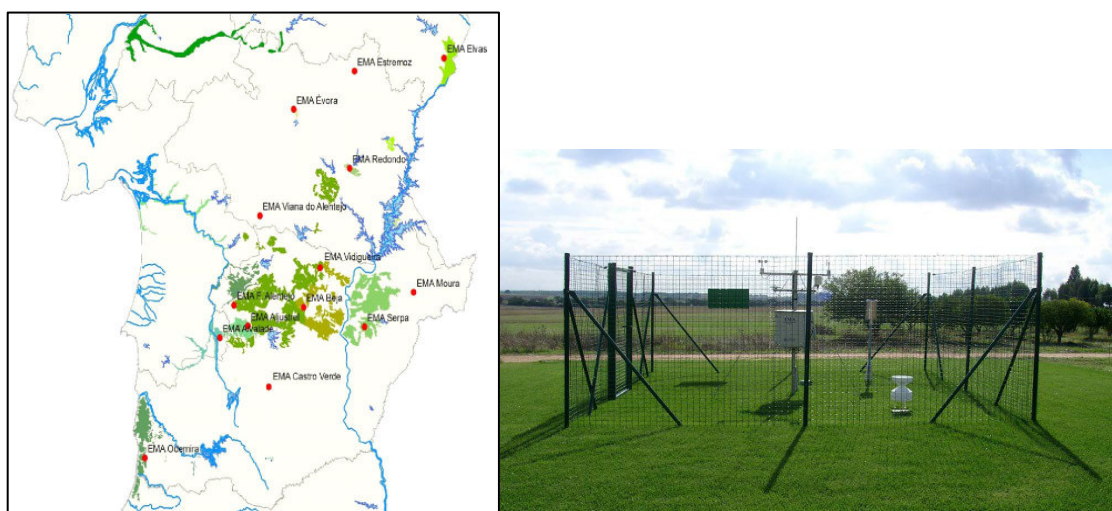


Illustration 24 : réseau de Stations Météorologiques Automatiques - SAGRA

SAGRA-Net

O SAGRA Net dá-lhe acesso directo à informação diária das estações meteorológicas do SAGRA. Este serviço oferece ainda a possibilidade de descarregar para o computador local a informação visualizada on-line.

Pesquisa

Selecione Estação Meteorológica Automática: **Quinta da Saúde**

Indique data de início da pesquisa: 06/12/2016

Indique data de fim da pesquisa: 23/05/2018

Pesquisar

SAGRA-Net - COTR

Pesquisa Tabela Exportar

Selecione Estação Meteorológica Automática: **Quinta da Saúde**

Indique data de início da pesquisa: 06/12/2016

Indique data de fim da pesquisa: 23/05/2018

Pesquisar

Data	Tmed (°C)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	HRmed (%)	HRmax (%)	HRmin (%)	RSGr (kJ/m²)	DV (graus)	VVmed (m/s)	VVmax (m/s)	P (mm)	Tmed Relva(°C)	Tmax Relva(°C)	Tmin Relva(°C)	ET0 (mm)
06/12/2016 23:58:59	14,53	22,85	9,73	81,50	92,44	55,87	9741,03	110,31	1,43	4,05	0,00	13,42	17,26	11,03	1,74
07/12/2016 23:58:59	13,68	19,44	8,48	85,45	95,90	66,02	8566,71	112,32	1,40	4,14	0,10	13,46	17,13	10,64	1,48
08/12/2016 23:58:59	11,69	16,96	7,86	82,48	95,21	60,62	7725,78	101,98	1,85	5,43	0,10	12,47	15,36	10,08	1,35
09/12/2016 23:59:00	12,90	19,10	7,20	81,30	92,20	62,10	9525,40	127,60	2,70	8,00	0,00	12,80	16,20	9,90	1,80
10/12/2016 23:59:00	13,40	19,10	8,60	85,60	95,90	66,90	9383,00	132,90	1,90	6,20	0,10	13,60	17,10	11,00	1,60
11/12/2016 23:59:00	12,70	19,00	9,60	83,20	94,40	57,90	9302,20	88,00	1,20	3,10	0,10	12,60	16,20	9,80	1,50
12/12/2016 23:59:00	12,00	19,10	7,00	81,20	94,50	56,20	9612,40	98,40	0,80	2,60	0,00	11,00	15,00	8,40	1,60
13/12/2016 23:58:59	10,31	14,93	3,97	88,97	95,07	77,42	9543,26	132,24	1,62	4,49	0,10	11,19	14,60	7,75	1,33

Illustration 25 : utilisateur SAGRA-NET pour consulter les données quotidiennes (www.cotr.pt)

À partir des données saisonnières, il est également possible de déterminer le climat d'une région, ce qui peut servir de base pour étudier la capacité d'adaptation de

nouvelles cultures. Il est également possible de développer des produits agrométéorologiques tels que les degrés-jours, qui indiquent le développement phénologique, les unités de froid, qui servent d'indicateur de l'entrée en dormance végétative en fonction de la température moyenne horaire, et l'identification de phénomènes météorologiques extrêmes (trombes d'eau, tornades, entre autres).

Parallèlement au service de notification d'irrigation, COTR a développé le service MOGRA - Modèle de Gestion de l'Irrigation pour l'Alentejo (<https://cotr.pt/servicos/mogra.php>), qui s'appuie sur le réseau de stations météorologiques automatiques et repose sur la technique du bilan hydrique, permettant ainsi d'accéder à un service en ligne. Il s'agit d'un service de programmation de l'irrigation selon la méthodologie proposée par la FAO et utilisant des bases de données sur les sols, les cultures et les technologies d'irrigation. Le modèle fournit un calendrier d'irrigation optimal (la stratégie consiste à irriguer lorsque la réserve facilement utilisable (RFU) est épuisée et un calendrier d'irrigation réel permet à l'utilisateur de visualiser l'évolution de sa gestion de l'irrigation, en saisissant les données des irrigations effectuées, et ainsi de décider du moment opportun pour irriguer. Pour compléter ces informations, il est possible d'utiliser des équipements de surveillance des sols ou des plantes.

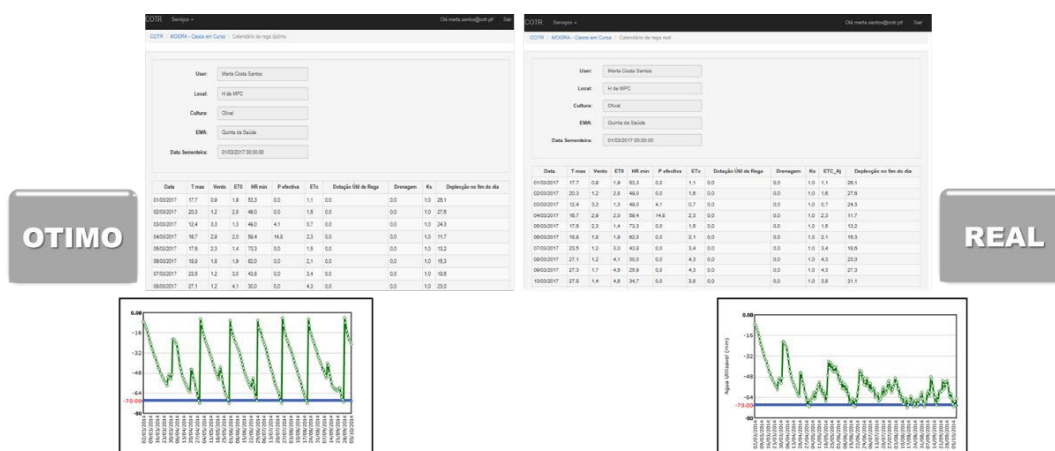


Illustration 26 : utilisateur MOGRA

Autres

En France, il existe de nombreux réseaux de stations météorologiques destinés à la population, gérés par Météo France, mais également dédiés à l'agriculture comme Sencrop, une plateforme agrométéorologique reliée aux stations météorologiques locales. Les coopératives mettent également en place des stations météorologiques collaboratives, et l'Union des Coopératives Agricoles de l'Allier (UCAL) compte actuellement plus de 40 stations connectées.



Illustration 27 : le réseau de stations météorologiques actuellement en service en France

L'entreprise française ISAGRI propose également une plateforme de stations météorologiques agricoles connectées, à l'instar de Weenat, qui permet aux

agriculteurs de suivre la météo en direct depuis leurs parcelles grâce à des réseaux météorologiques connectés.



Illustration 28 : outils de Sencrop

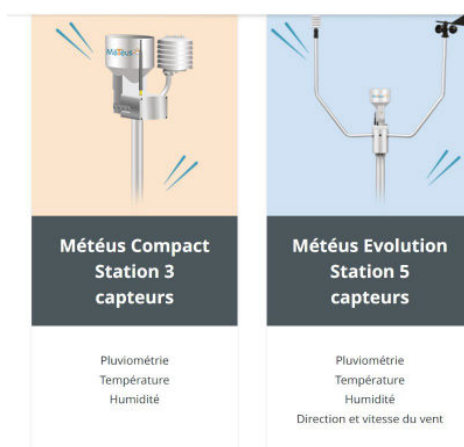


Illustration 29 : station météorologique Isagri



Illustration 30 : outil de gestion de l'irrigation de Weenat

Capteurs de surveillance du système d'irrigation

La mise en place d'un système d'irrigation de précision implique la surveillance des variables hydrauliques clés : le débit et le volume d'eau utilisés, ainsi que la pression dans le réseau d'irrigation. Il est également utile de connaître la qualité de l'eau.

Débitmètre

Il s'agit d'un capteur qui mesure le passage d'un fluide à travers une surface. Ci-après, nous ne parlerons que des débitmètres utilisés pour mesurer le débit d'eau circulant dans une conduite. Dans les réseaux d'irrigation sous pression, on utilise généralement les types de débitmètres suivants :

- Débitmètres électromagnétiques
- Débitmètres à ultrasons
- Compteurs mécaniques à émetteurs d'impulsions.

Capteur de pression

Il mesure la pression (force par unité de surface) exercée par l'eau en un point donné d'une installation hydraulique. L'unité de mesure de la pression dans le système international est le Pascal (N/m²), mais en pratique, d'autres unités sont utilisées, telles que le bar, l'atmosphère ou le PSI (livres par pouce carré).

Les capteurs de pression pour l'eau sont généralement des transducteurs, c'est-à-dire qu'ils transforment la pression mesurée par l'élément capteur en un signal électrique analogique, normalisé et standard. On trouve principalement des capteurs avec une sortie 4-20 mA ou 0-10 V, même si récemment, en raison des exigences d'adaptation pour les nœuds IoT, d'autres sorties électriques sont également utilisées : 1-5 V, 0-5 V, 0,5-4,5 V et sortie RS-485 avec ModBus. Le signal électrique fourni est proportionnel à la valeur de pression mesurée, à l'exception des transmetteurs qui nous donnent directement la pression dans l'unité choisie.

Les plages de mesure de pression sont très larges, tout comme les caractéristiques des

capteurs, qu'il s'agisse des connexions électriques, des raccordements aux processus, du type de sortie électrique, du type de mesure, etc. C'est pourquoi on trouve sur le marché une multitude de variantes.

La connaissance de la pression en différents points d'un réseau permet :

- De comprendre comment se déroule le processus de distribution et de mise en pression de l'eau.
- D'améliorer la qualité de l'irrigation : en surveillant la pression à la parcelle, il est possible d'obtenir la meilleure uniformité d'irrigation possible en contrôlant la pression de celle-ci.
- D'évaluer l'efficacité de la distribution d'eau : à l'aide de plusieurs capteurs, nous pouvons déterminer les pertes de pression qui ont lieu au niveau d'éléments spécifiques du réseau de distribution d'eau (réservoirs sous pression, filtres, etc.) et sur certaines sections de celui-ci. Grâce à la collecte et à l'analyse de ces données, il est possible d'anticiper d'éventuelles défaillances et de rechercher des solutions et des mesures correctives avant qu'elles ne surviennent, afin de minimiser les pertes d'eau.
- De contrôler le rendement des pompes : si l'on surveille les performances du système de pompage et que l'on dispose d'historiques, il est possible de définir des seuils de rendement minimal de sorte que, si le rendement passe en dessous de ces valeurs, des alarmes se déclenchent et des mesures correctives puissent être prises.
- De mesurer indirectement le niveau d'eau dans un réservoir (capteurs de pression hydrostatique) ainsi que le débit circulant dans une conduite (débitmètres à pression différentielle).

Capteurs de qualité de l'eau d'irrigation

Il est nécessaire de connaître la qualité de l'eau d'irrigation afin de déterminer si l'eau d'irrigation disponible est adaptée aux caractéristiques de la culture. La

principale source d'accumulation de sels dans le sol provient de l'eau d'irrigation.

Le capteur de conductivité électrique de l'eau d'irrigation mesure la conductivité électrique de l'eau, un facteur qui conditionne le rendement de la culture.

Une conductivité électrique supérieure à 1,5 dS/m présente un risque modéré de salinité.

Les données fournies par le capteur de conductivité électrique permettent de calculer le taux de lessivage des sels.

Une description détaillée des systèmes de surveillance mentionnés et de leur utilisation dans la gestion de l'irrigation, est disponible sur la plateforme E-learning du site web du projet Interreg Espagne-Portugal Hub Iberia Agrotech (HIBA), <https://learningdata.hubiberiaagrotech.eu/> et dans la documentation de la journée organisée par le Ministère de l'Agriculture du Gouvernement espagnol, intitulée « Utilisation du big data, de la capteurique et de la télédétection pour le calcul de la dose d'irrigation » (23 avril 2024).

<https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-soutenable-regadios/formation-diffusion/documentation/detail.aspx?id=tcn:30-682067-16>

2- Logiciels de gestion de l'irrigation

Ils offrent une plateforme permettant d'intégrer toutes les données des capteurs et des contrôleurs, ce qui permet aux agriculteurs de visualiser, d'analyser et de gérer leurs opérations d'irrigation. Ces logiciels proposent des analyses avancées capables de prévoir les besoins en eau et d'ajuster les plans d'irrigation en conséquence.

Principales caractéristiques de ces logiciels :

- Ils peuvent intégrer des données provenant de diverses sources, y compris des capteurs sur le terrain, des stations météorologiques, des images satellites et des drones. Cela offre une vision globale de l'état de la parcelle et des besoins en irrigation.
- Automatisation de l'irrigation : ces logiciels permettent la programmation et le contrôle automatique des systèmes d'irrigation en fonction des conditions du sol, du climat et des besoins spécifiques des cultures. Cela inclut la possibilité d'ajuster les horaires d'irrigation et la quantité d'eau appliquée, optimisant ainsi la consommation d'eau.
- Ils offrent des capacités de surveillance en temps réel qui permettent aux agriculteurs de consulter l'état actuel de leur système d'irrigation, l'humidité du sol, les conditions météorologiques et d'autres facteurs pertinents directement depuis leurs appareils mobiles ou ordinateurs.
- Ils fournissent des outils d'analyse qui aident les agriculteurs à comprendre l'efficacité de leurs pratiques d'irrigation, à identifier les tendances et les zones problématiques, et à prendre des décisions éclairées pour améliorer leur efficacité.
- Certains logiciels avancés intègrent des fonctionnalités prédictives qui utilisent des modèles météorologiques et cultureux pour prévoir les besoins futurs en eau, permettant ainsi aux agriculteurs de planifier à l'avance et d'ajuster leurs stratégies d'irrigation.

- Ces systèmes comprennent généralement des paramètres d'alerte qui informent les utilisateurs des situations critiques nécessitant une intervention, telles que d'éventuelles défaillances du système, des conditions de stress hydrique dans les cultures ou des recommandations d'ajustement de l'irrigation en fonction des prévisions météorologiques.
- Ils sont conçus avec des interfaces intuitives qui facilitent leur utilisation par les agriculteurs et les techniciens, quel que soit leur niveau d'expérience technologique.
- Ils sont compatibles avec un large éventail de systèmes d'irrigation et de matériel informatique, et peuvent s'adapter aussi bien aux petites qu'aux grandes exploitations agricoles.
- Les fournisseurs de ces logiciels proposent généralement une assistance technique et des mises à jour régulières afin de garantir le bon fonctionnement du système et de s'assurer qu'il intègre les dernières technologies et fonctionnalités.

Quelques exemples de logiciels de gestion de l'irrigation.

Irridesk

<https://irridesk.com/>

Irriolea

https://play.google.com/store/apps/details?id=com.rafacode.hiba_app&pcampaignid=web_share

Reutivar

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.rafacode.reutivarapp&hl=es>

3- Entreprises du secteur de l'irrigation

Concernant les entreprises qui proposent des solutions numériques d'irrigation, il existe un moteur de recherche, géré par le Ministère de l'Agriculture du Gouvernement espagnol, qui mérite d'être cité en raison de son importance pour les professionnels du secteur agricole. Il s'agit de l'outil **digimapa**, hébergé sur la plateforme Tierra. C'est un outil de recherche d'entreprises **agrotech** : <https://digimapa.plataformatierra.es/>

Si nous appliquons le filtre « irrigation », le résultat de la recherche fait apparaître 117 entreprises.

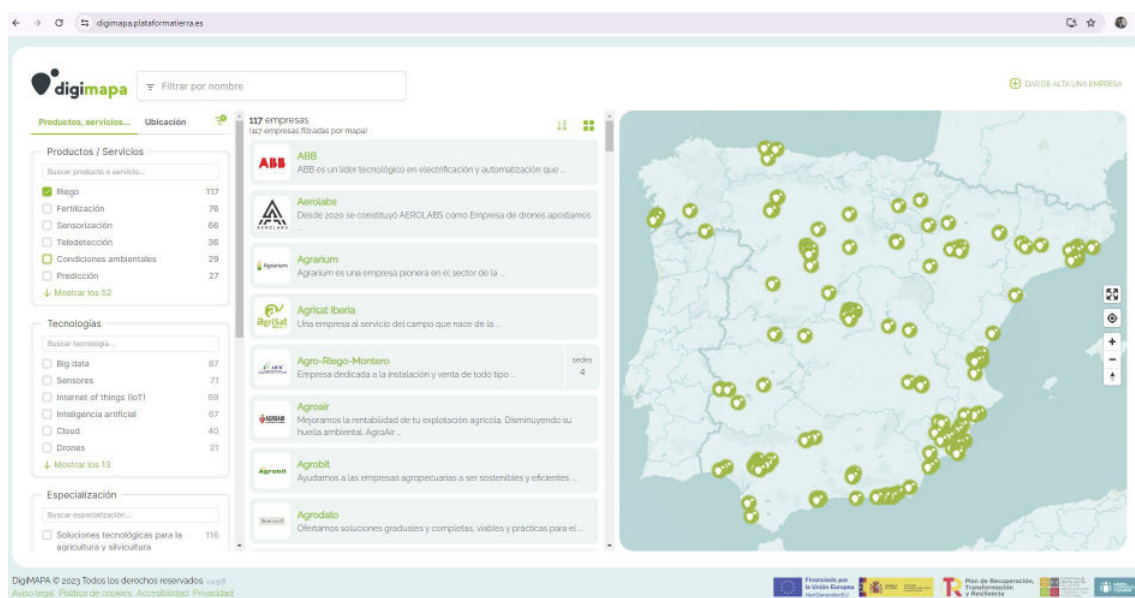


Illustration 31 : illustration Digimapa. Plateforme Tierra. Recherche d'entreprises d'irrigation

De plus, afin de contribuer à la réalisation de l'ensemble des objectifs du projet **Smart Green Water**, le modèle suivant a été élaboré pour présenter certaines solutions numériques spécifiques disponibles sur le marché, afin d'aider les agriculteurs et les professionnels du secteur à trouver des informations sur ces solutions. L'idée est que ce modèle soit rempli par les entreprises du secteur de l'irrigation, et que ces informations soient mises à la disposition des agriculteurs.

MODÈLE DE PRÉSENTATION DES SOLUTIONS NUMÉRIQUES D'IRRIGATION

Nom de l'entreprise :

NUMÉRO D'IDENTIFICATION FISCALE :

Nom de la solution commercialisée :

Veuillez indiquer si votre entreprise développe elle-même la solution numérique qu'elle commercialise ou si elle se concentre sur la commercialisation de solutions créées par des tiers, comme c'est le cas pour les cabinets de conseil.

La solution commercialisée :

- ☐ Automatise-t-elle l'irrigation ?
- ☐ Utilise-t-elle des capteurs ?
- ☐ Utilise-t-elle des modèles prédictifs ?

Si elle utilise des capteurs, ceux-ci sont :

- ☐ Des capteurs distants
 - Satellites
 - Drones
 - Autres
- ☐ Des capteurs de proximité
 - Capteurs de sol
 - Capteurs environnementaux
 - Capteurs de plante

Paramètres pris en compte par la solution

- ☐ Plages horaires
- ☐ Données directes de la culture (suivre les recommandations issues des études publiées)
- ☐ Données indirectes de la culture (prévisions de pluie, données d'observatoire...)

La solution permet-elle une gestion à distance de l'irrigation ?**S'agit-il d'un outil d'aide à la décision pour l'irrigant ? (Oui/Non) Et dans l'affirmative, sur quels aspects fournit-elle des informations ?**

- Quand irriguer
- Quelle quantité irriguer
- Où irriguer

Veuillez indiquer si l'outil permet de programmer plusieurs parcelles simultanément, ou s'il est nécessaire d'établir différents plans d'irrigation.

Peut-il être utilisé pour l'irrigation déficitaire ?

Veillez citer les cultures pour lesquelles il est optimisé :

La solution a-t-elle été testée dans une région agroclimatique ?

Est-elle compatible avec d'autres systèmes et solutions ?

Comment l'authenticité, l'intégrité et la disponibilité des données des utilisateurs sont-elles garanties ?

Propriété des données. Une fois les données d'irrigation collectées, ces données deviennent-elles la propriété de l'entreprise ou restent-elles la propriété exclusive de l'agriculteur ?

Dans le cas de solutions prédictives, l'outil adapte-t-il l'algorithme aux conditions propres à l'agriculteur, à partir des données fournies sur les parcelles, ou utilise-t-il le même algorithme pour tous les agriculteurs ?

Interface utilisateur :

- Application mobile
- Plateforme web
- Autres interfaces (à préciser)

Assistance et maintenance**Options d'assistance :**

- ☐ Assistance technique (24h/24, 7j/7, heures ouvrables, etc.)
- ☐ Supports d'assistance (téléphone, e-mail, chat, etc.)

Maintenance :

- ☐ Services de maintenance préventive et corrective
- ☐ Mises à jour logicielles

Prix et modèles de financement**Modèle de tarification :**

- ☐ Abonnement.
- ☐ Paiement unique
- ☐ Modèles hybrides

Fourchette de prix :

- Coût approximatif ou fourchettes de prix

Options de financement :

- ☐ Financement propre
- ☐ Partenariat avec des établissements financiers

Bibliographie

- Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Levante. (2023). Catálogo de Soluciones de Digitalización del Regadío en el marco de la convocatoria del PERTE de digitalización del ciclo del agua. Disponible ici : <https://www.coial.org/catalogo-de-soluciones-de-digitalizacion-del-regadio-en-el-marco-de-la-convocatoria-del-perte-de-digitalizacion-del-ciclo-del-agua/>
- Commission économique pour l'Amérique latine et les Caraïbes. (2020). Las oportunidades de la digitalización en América Latina: Desafíos y estrategias. Disponible ici : <https://repositorio.cepal.org>
- ISAGRI (2024). [https://www.isagri.fr/meteus/meteus-la-station-meteo-au-coeur de vos champs](https://www.isagri.fr/meteus/meteus-la-station-meteo-au-coeur-de-vos-champs)
- Lamo, J., & Garrido, A., (2024). Regadío y Seguridad Alimentaria. La situación en España.. Édition : Cajamar Caja Rural.
- Lakso, A.N. ; Santiago, M. ; Stroock, A.D. (2022). Monitoring Stem Water Potential with an Embedded Microtensiometer to Inform Irrigation Scheduling in Fruit Crops. *Horticulturae* 8(12), 1207 ; <https://doi.org/10.3390/horticulturae8121207>
- Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation. Secrétariat Général Technique. Centre de Publications & Cajamar Caja Rural. (2023). Observatoire de la numérisation du secteur agroalimentaire. Analyse de l'état actuel de la numérisation du secteur agroalimentaire espagnol.
- Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation. Sous-secrétariat à l'Agriculture, à la Pêche et à l'Alimentation. Sous-direction générale de l'Analyse, de la Coordination et des Statistiques. (2022). Enquête sur les superficies cultivée et les rendements. Analyse de l'irrigation en Espagne.
- Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation (2023). Stratégie de numérisation du secteur agroalimentaire, forestier et du milieu rural. https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/estrategia-digitalizacion-sector-agroalimentario/ii-plan-accion-estrategia-digitalizacion-2021-2023_tcm30-583049.pdf
- Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation (2024). Stratégie de

numérisation du secteur agroalimentaire, forestier et du milieu rural.

https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/estrategia-digitalizacion-sector-agroalimentaire/strategie_num%C3%A9risation_secteur_agroalimentaire_forestier_m%C3%A9dio_rural_ve_tcm30-509645.pdf

- Ministère de la Transition écologique et du Défi démographique. (2023). Las bases del PERTE de digitalización del ciclo del agua para regadío. Disponible ici : <https://www.camaradeaguas.com>
- SENCROP (2024). <https://sencrop.com/fr/>
- Trillo Guardia, C. (2023). Hacia una digitalización sostenible del regadío. Cámara Insular de Aguas de Tenerife. Disponible ici : <https://www.camaradeaguas.com/hacia-una-digitalizacion-sostenible-del-regadio/>
- Union des Coopératives Agricoles de l'Allier (2024). <https://www.ucal.coop/>
- WEENAT (2024). <https://weenat.com/>