



**Interreg
Sudoe**



Co-funded by
the European Union

SMART GREEN WATER

CARACTÉRISATION DES SOLUTIONS NUMÉRIQUES UTILISÉES DANS L'IRRIGATION

Unión de Pequeños
Agricultores y Ganaderos



IRTA



Juin 2024

Distribution publique

Livrable 2.5.1

Activité : *Développement conjoint d'une méthode de caractérisation des solutions disponibles sur le marché.*

Table des matières

Introduction	4
Les différents niveaux de technification dans la numérisation de l'irrigation	6
Le solutions numériques pour l'irrigation en agriculture	9
Niveau 1 : La programmation de l'irrigation	9
Niveau 2 : La surveillance	9
Niveau 3 : L'irrigation de précision	10
Niveau 4 : Les systèmes d'irrigation intelligente	10
Caractérisation des principales solutions numériques pour l'irrigation	11
1. Les systèmes d'irrigation automatisée	12
1.1 Les programmeurs d'irrigation	12
1.2 Les capteurs	13
1.2.1 Les capteurs éloignés ou à distance	13
Les images satellitaires	14
Les images par drone	16
1.2.2 Les capteurs proches	17
Les capteurs de plantes	18
Les capteurs de flux de sève	20
Les capteurs de turgescence de feuille	22
Les capteurs de température de plante	24
L'enregistrement continu du potentiel hydrique de la tige	24
Les capteurs de sol	26
Les capteurs de contenu en eau	26
Les capteurs de contenido de potentiel matriciel	32
Les capteurs résistifs et capacitifs en matériaux poreux	33
Les capteurs de conductivité électrique	34
Les capteurs ambiants	34
SiAR	36
SAGRA	38
Autres	43
Les capteurs de surveillance du système d'irrigation	45
Le débitmètre	45
Le capteur de pression	45
Les capteurs de qualité de l'eau d'irrigation	47
2- Les logiciels de gestión d'irrigation	48

3- Les entreprises du secteur de l'irrigation	50
MODÈLE DE CARACTÉRISATION DES SOLUTIONS NUMÉRIQUES DANS LE DOMAINE DE L'IRRIGATION	51
Bibliographie	54

Index des illustrations

Illustration 1 : Approche très simple de la surveillance et de la gestion de l'irrigation à partir de données.

[Illustration 2 : Approche du suivi et de la gestion de l'irrigation basée sur les données en utilisant un répertoire d'outils et de sources de données disponibles en ligne 7](#)

[Illustration 3 : Approche du suivi et de la gestion de l'irrigation en utilisant une plateforme intégrée de prescription de l'irrigation, qui décharge l'irrigant des tâches routinières de téléchargement et de traitement des données 8](#)

[Illustration 4 : Principaux programmes utilisant des données ouvertes. Source : María José Checa Tragsatec 14](#)

[Illustration 5 : Principaux logiciels commerciaux. Source : María José Checa Tragsatec 14](#)

[Illustration 6 : Architecture de l'agriculture 4.0. Source : Carmen Flores Cayuela, Université de Cordoue 17](#)

[Illustration 7 : Dendromètre. Source : Fernando Casares, Université de Cordoue 18](#)

[Illustration 8 : Capteurs de flux de sève. Source : Fernando Casares Université de Cordoue 21](#)

[Illustration 9 : Capteur de turgescence des feuilles. Source : Francisco Casares Université de Cordoue 21](#)

[Illustration 10 : Équipement pour le suivi continu du potentiel hydrique de la tige basé sur des microtensiomètres installés sur le tronc des vignes 23](#)

[Illustration 11 : Outil de l'entreprise « Vegetal signal », Hydroscore, une application pour surveiller en temps réel l'état hydrique des vignes 24](#)

[Illustration 12 : Capteur capacitif 25](#)

[Illustration 13 : Capteur FDR 26](#)

[Illustration 14 : Capteur TDR 26](#)

[Illustration 15 : Évolution de la teneur en eau d'un sol à différentes profondeurs, où l'on montre le moment où l'irrigation est appliquée 27](#)

[Illustration 16 : Installation du capteur d'humidité à différentes profondeurs 27](#)

[Illustration 17 : Tensiomètres 30](#)

[Illustration 18 : Sonde de tension capacitive de la matrice du sol 31](#)

[Illustration 19 : Sonde de tension résistive de la matrice du sol 31](#)

[Illustration 20 : Station agroclimatique complète 33](#)

[Illustration 21 : Réseau SIAR. Source : Ministère espagnol de l'Agriculture, de la pêche et de l'alimentation 35](#)

[Illustration 22 : Exemples d'informations fournies par une station agroclimatique du réseau SIAR 36](#)

Illustration 23 : Méthodologie de fonctionnement du service d'alerte à l'irrigation 37

Illustration 24 : Réseau de stations météorologiques automatiques - SAGRA 38

Illustration 25 : Utilisateur de SAGRA-NET pour consulter les données journalières (www.cotr.pt) 39

Illustration 26 : Utilisateur de MOGRA 40

Illustration 27 : Le réseau de stations météorologiques actuellement en service en France 41

Illustration 28 : Les outils Sencrop 41

Illustration 29 : Station météorologique d'Isagri 42

Illustration 30 : Outil de gestion de l'irrigation Weenat 42

Illustration 31 : Illustration Digimapa. Plateforme Terre. Recherche d'entreprises d'irrigation 48

Introduction

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

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

La technologie est importante pour maximiser les intrants dans l'agriculture, en particulier l'eau qui est une ressource rare. Dans le cas de l'Espagne, les processus de modernisation de l'irrigation au cours des vingt dernières années ont permis de remplacer les systèmes d'irrigation traditionnels utilisant des conduites ouvertes par des systèmes de conduction sous pression plus efficaces (arrosage et localisation), ce qui a permis de réduire la consommation d'eau de 15 % au cours de ces dix dernières années.

L'optimisation de l'efficacité de l'application de l'eau des systèmes d'irrigation actuels implique que la conception de l'installation et sa gestion soient appropriées. Grâce aux progrès technologiques, il est de plus en plus facile de mesurer, de collecter des données et d'analyser la gestion de l'irrigation. L'utilisation de différents types de capteurs et d'algorithmes permet de calculer automatiquement les besoins en irrigation d'une culture afin d'appliquer la bonne quantité d'eau au bon moment.

C'est ainsi que naît le concept d'irrigation de précision, qui repose sur l'utilisation des technologies disponibles pour connaître l'état du système sol-eau-plante pendant la campagne d'irrigation et pour contrôler l'application de l'irrigation, en fournissant la quantité d'eau que requiert la culture au bon moment.

Il existe une grande variété de solutions technologiques qui sont des composants fondamentaux des systèmes d'irrigation de précision, aussi bien ceux dans lesquels l'irrigant prend la décision finale d'irrigation que les systèmes

d'irrigation de précision autonomes (irrigation intelligente). C'est pour cette raison que ce document a été préparé, dans le cadre du projet européen SUDOE **Smart Green Water**, comme outil pour soutenir les agriculteurs dans le processus de sélection de la technologie la plus appropriée pour leur exploitation.

Ce rapport comprend les principales caractéristiques des technologies numériques appliquées à l'irrigation. Ce document a été préparé dans le cadre de l'activité **Smart Green Water** « *Développement conjoint d'une méthode de caractérisation des solutions disponibles sur le marché* ». Préparé par l'Unión de Pequeños Agricultores y Ganaderos (Espagne), il a également bénéficié de la collaboration de l'Université de Cordoue (Espagne), de l'Instituto de Investigación y Tecnología Agroalimentarias (Espagne), du Centro Operativo e de Tecnologia de Regadio (Portugal), d'Agri Sud-Ouest Innovation (France) et de l'Eurorégion Pyrénées-Méditerranée (France/Espagne).

Les différents niveaux de technification dans la numérisation de l'irrigation

La gestion de l'irrigation consiste surtout à surveiller le bon fonctionnement de l'installation d'irrigation afin d'agir rapidement en cas de pannes ou d'autres anomalies, et à mettre régulièrement à jour les programmes d'irrigation pour les adapter aux conditions météorologiques et à l'évolution de la culture. Dans ce contexte, la gestion de l'irrigation par les données apporte de l'objectivité aux processus impliqués.

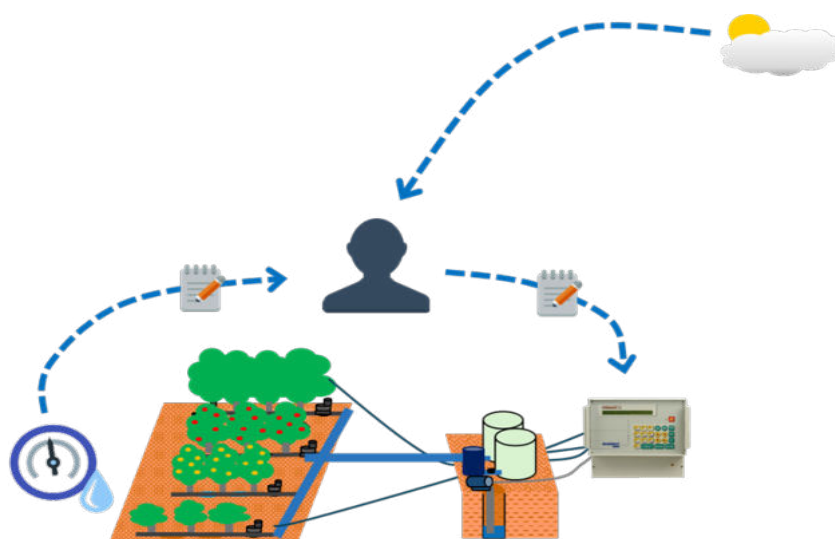


Illustration 1 : Approche très simple de la surveillance et de la gestion de l'irrigation par les données.

Une approche plus numérique peut utiliser les télécommunications pour surveiller et gérer l'irrigation à distance, et tirer parti d'un plus large éventail de données disponibles grâce à diverses technologies. D'une part, les contrôleurs d'irrigation sont souvent accessibles à distance, via des plateformes en ligne ou des applications mobiles. Cela permet une meilleure interaction avec l'utilisateur, ainsi qu'une gestion beaucoup plus approfondie basée sur les données. Le programmeur d'irrigation génère de nombreuses données qui peuvent être

utilisées pour surveiller le processus, l'optimiser et assurer la traçabilité de la gestion de l'irrigation. D'autre part, les capteurs installés sur le terrain sont généralement connectés à une plateforme en ligne, qui facilite l'accès aux données, leur visualisation, leur téléchargement et leur traitement par l'utilisateur. De même, il existe des plateformes en ligne où les données météorologiques peuvent être consultées ou téléchargées. Il existe également des plateformes de télédétection qui contribuent au suivi du développement des cultures. Il existe également des plateformes en ligne pour les recommandations en matière d'irrigation. Tout cela permet de disposer d'une grande variété de données pour la gestion de l'irrigation.

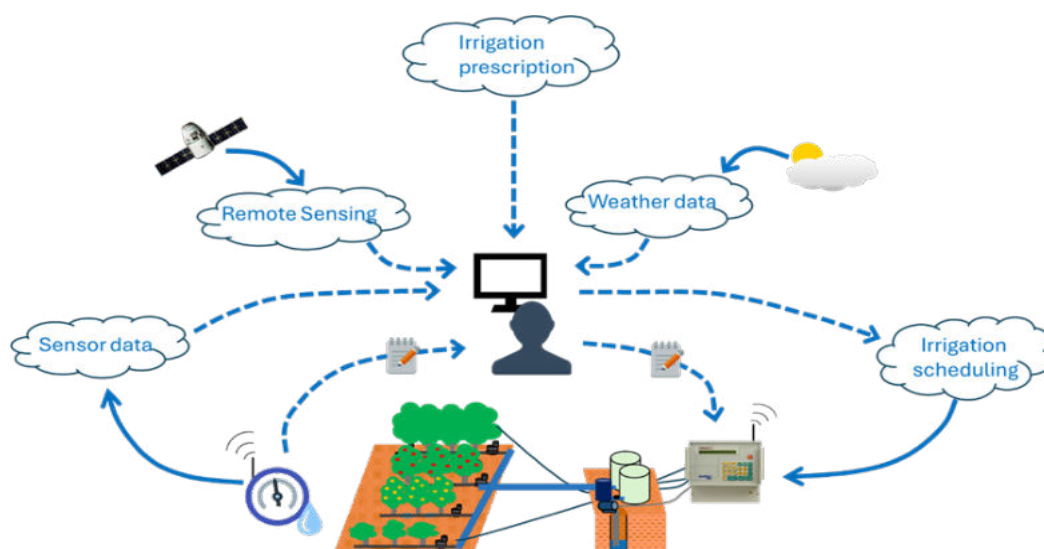


Illustration 2 : Approche de la surveillance et de la gestion de l'irrigation basée sur les données en utilisant un répertoire d'outils en ligne et de sources de données disponibles

Une difficulté commune est précisément la grande variété de plateformes et de solutions publiques ou commerciales qui, d'une manière ou d'une autre, peuvent contribuer au suivi et à la gestion de l'irrigation. L'utilisateur se retrouve souvent submergé par la quantité de données et d'outils à sa disposition. En particulier, il peut être assez complexe et fastidieux pour l'utilisateur de télécharger des données à partir de certains outils et de les saisir dans d'autres.

Face à la variété et à la complexité croissantes des technologies et des sources de données pouvant être utilisées pour la gestion de l'irrigation, il est possible de créer des plateformes qui intègrent l'ensemble du circuit de données, libérant ainsi l'irrigant des tâches routinières de téléchargement, de traitement, etc. Ces plateformes sont chargées d'accéder aux données météorologiques, aux capteurs installés sur le terrain et/ou à la télédétection, et de les traiter, afin de générer des prescriptions d'irrigation qui peuvent être envoyées d'une machine à l'autre, directement au contrôleur d'irrigation.

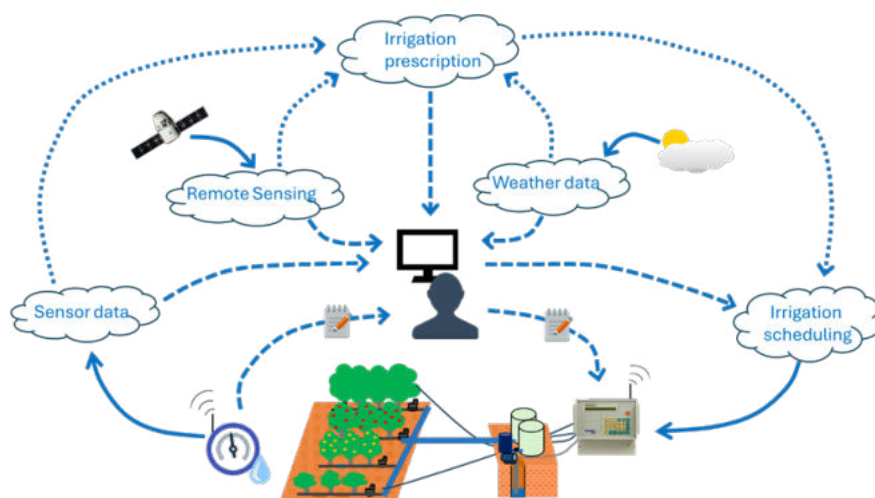


Illustration 3 : Approche du suivi et de la gestion de l'irrigation à l'aide d'une plateforme intégrée de prescription d'irrigation, qui décharge l'irrigant des tâches routinières de téléchargement et de traitement des données.

De cette manière, qui exige beaucoup moins de temps de la part de l'irrigant, le processus de surveillance et de contrôle peut être beaucoup plus évolutif pour un grand nombre de parcelles et peut être mis à jour beaucoup plus fréquemment.

Les solutions numériques pour l'irrigation dans l'agriculture

Comme indiqué ci-dessus, les solutions numériques pour l'irrigation sont essentielles pour accroître l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans l'agriculture, un besoin critique dans de nombreuses régions du monde en raison de la pénurie croissante d'eau. Ces technologies permettent aux agriculteurs d'optimiser leurs ressources en eau, d'améliorer la productivité des cultures et de réduire l'impact sur l'environnement.

En tenant compte des différents niveaux de technification de la numérisation de l'irrigation expliqués ci-dessus, il est possible de distinguer les niveaux suivants de numérisation de la gestion de l'eau :

Niveau 1 : La programmation de l'irrigation

Grâce aux programmeurs d'irrigation, les agriculteurs peuvent programmer leur calendrier d'irrigation et automatiser l'irrigation. Le programmeur peut être utilisé manuellement ou à distance via des appareils mobiles ou des ordinateurs, ce qui leur donne de la flexibilité et un contrôle en temps réel, sans qu'ils aient besoin d'être physiquement sur le terrain.

Niveau 2 : La surveillance

Il s'agit d'enregistrer des informations sur les variables clés de la gestion de l'irrigation à l'aide de capteurs (appareils de mesure) situés soit sur l'exploitation (par exemple, capteurs d'humidité du sol, de climat ou de plantes), soit à distance (satellites et drones). Ces appareils enregistrent des informations en temps réel en envoyant les données via des systèmes de communication sans fil basés sur l'internet des objets (IoT), soit vers un ordinateur, un téléphone portable/une

tablette, soit vers le cloud. Le responsable de l'irrigation peut ainsi savoir comment les différentes variables liées à l'irrigation évoluent sur son exploitation.

Niveau 3 : L'irrigation de précision

En intégrant les informations collectées par le système de surveillance, la connaissance du comportement hydraulique du système d'irrigation, les caractéristiques de la culture et du sol, la stratégie d'irrigation à suivre, entre autres aspects, la programmation de l'irrigation est effectuée, de sorte que la quantité d'eau strictement nécessaire à la culture est appliquée au bon moment pendant la campagne d'irrigation, réduisant ainsi les flux de retour de l'eau par ruissellement et percolation.

Niveau 4 : Les systèmes d'irrigation intelligents

Il s'agit de systèmes avancés d'irrigation de précision qui analysent automatiquement les informations enregistrées par différents types de capteurs (à proximité et à distance) pour décider de manière autonome la quantité, le moment et la durée de l'irrigation, et même faire varier l'irrigation dans l'espace en tenant compte de l'hétérogénéité de la parcelle. Ils contrôlent automatiquement le début et la fin de chaque épisode d'irrigation.

Ces systèmes peuvent même intégrer des modèles prédictifs des besoins en irrigation à différentes échelles de temps, à partir de l'analyse des enregistrements historiques des variables liées aux besoins en irrigation des cultures stockées dans le système de surveillance. Ces systèmes 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 l'énergie.

Compte tenu des différents niveaux de numérisation de l'irrigation, voici les principales solutions numériques pour l'irrigation actuellement commercialisées.

La caractérisation des principales solutions numériques pour l'irrigation

1. Les systèmes d'irrigation automatisée

1.1 Le programmeur d'irrigation

Le programmeur d'irrigation est un dispositif électronique spécialisé dans les fonctions de dosage de l'eau et des engrais appliqués aux cultures. Il s'agit en général d'un équipement essentiel dans les exploitations agricoles dotées d'un système d'irrigation sous pression, qui peut être plus ou moins sophistiqué en fonction du secteur, de la taille de l'exploitation et de son niveau technologique. Le programmeur d'irrigation est le cerveau d'une tête d'irrigation comprenant un ensemble de composants hydrauliques (vannes, pompes, réservoirs d'engrais, doseurs, etc.) coordonnés par le programmeur d'irrigation.

D'un point de vue pratique, les programmeurs d'irrigation sont responsables de l'exécution des programmes d'irrigation et de fertirrigation, ce qui implique l'activation des vannes d'irrigation aux moments convenus, la coordination des systèmes de pompage et d'injection d'engrais. En règle générale, les irrigants précisent les heures de début et la durée de l'irrigation, ainsi que la quantité d'engrais à injecter. Au fil de la saison d'irrigation, les irrigants doivent revoir périodiquement les programmes d'irrigation et de fertirrigation pour les adapter aux conditions météorologiques et au développement de la culture.

Les programmeurs d'irrigation ont un niveau élevé d'autonomie opérationnelle, y compris une réponse programmée à différents types de capteurs locaux (sondes de niveau, pH, conductivité électrique, humidité du sol, etc.). Dans la pratique, les programmeurs d'irrigation peuvent être connectés à l'internet et l'interaction de l'utilisateur avec les programmeurs d'irrigation se fait généralement par l'intermédiaire d'une application web. Les capacités de contrôle des programmeurs d'irrigation avec une certaine autonomie locale peuvent ainsi être complétées par l'interopérabilité avec des systèmes à distance plus complexes, qui marquent les décisions tacites et stratégiques dans une gestion de l'irrigation

basée sur les données, offrant la possibilité d'utiliser un large éventail de technologies sur lesquelles baser la prise de décision.

1.2 Les capteurs

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

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

Les capteurs peuvent être divisés en fonction de leur proximité par rapport à l'objet de l'étude, en télédétection (Remote Sensing) et en télédétection proximale (Proximal Sensing):

1.2.1 Les capteurs éloignés ou à distance

Les capteurs à distance collectent des données à une distance considérable car ils sont installés sur des satellites ou des drones équipés d'une technologie d'imagerie avancée. Ces capteurs peuvent couvrir de grandes surfaces de terrain. L'analyse des images obtenues fournit des informations sur la variabilité spatiale des variables mesurées, ce qui permet d'identifier des zones de stress hydrique, de développement du couvert végétal, d'existence de ravageurs ou de carences nutritionnelles. Nous distinguerons les images satellites des images de drones.

Les capteurs satellitaires

Elles utilisent différentes bandes du spectre électromagnétique pour capter des informations sur l'état des cultures, l'humidité du sol, l'utilisation de l'eau et d'autres facteurs environnementaux. Elles sont utiles pour surveiller régulièrement de grandes étendues de terre.

Ces images permettent d'obtenir des informations sur les variations d'humidité dans différentes parties de la parcelle agricole. Les images peuvent révéler des inefficacités dans les schémas d'irrigation existants, comme une distribution inégale de l'eau, et aider à optimiser les systèmes d'irrigation pour assurer une irrigation uniforme.

Le NDVI (Normalised Difference Vegetation Index - indice de végétation par différence normalisée) (Rouse et al., 1973) est particulièrement utile dans le domaine de l'irrigation. Le NDVI peut être utilisé pour détecter le stress hydrique dans les cultures avant qu'il ne devienne visuellement apparent. Une diminution des valeurs NDVI (les valeurs NDVI varient de -1 à 1) peut indiquer un besoin en eau non satisfait, ce qui permet aux agriculteurs d'ajuster leurs pratiques d'irrigation pour traiter spécifiquement les zones présentant des signes de stress. Cette méthode 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 la couverture végétale est très dense.

Un certain nombre de programmes de données ouvertes sont disponibles pour la visualisation d'images satellite :

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 programmes de données ouvertes. Source : María José Checa Tragsate

€

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 logiciels commerciaux. Source : María José Checa Tragsate

Le programme *Copernicus* offre également des services d'information basés sur des données d'observation de la Terre par satellite (à l'aide du satellite Sentinel) et des données in situ (non spatiales).

Les services et données Copernicus sont fournis gratuitement aux utilisateurs <https://www.copernicus.eu/es>.

Les images par drone

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

Les drones peuvent transporter différents types de capteurs tels que des caméras multispectrales, des caméras thermiques, des capteurs LiDAR (Light Detection and Ranging) et des capteurs proche infrarouge (NIR). Ils fournissent des informations similaires aux images satellites, bien qu'il s'agisse d'images à haute résolution, et à une fréquence variable, en fonction du moment où les vols sont effectués.

Ils peuvent avoir différentes applications dans l'agriculture :

- Les drones équipés de capteurs proche infrarouge (NIR) ou de caméras thermiques peuvent identifier les zones des champs qui présentent des niveaux d'humidité différents.
- Ils peuvent également intégrer des capteurs capables de mesurer des indicateurs clés de la santé du sol et des cultures. Ces informations peuvent être utilisées pour appliquer l'eau et l'engrais de manière plus efficace, en maximisant l'absorption des nutriments et en minimisant le gaspillage.
- Dans certains systèmes plus avancés, les données collectées par les drones peuvent être intégrées directement aux systèmes d'irrigation intelligents. Cela permet de déclencher automatiquement l'irrigation

dans les zones dont les données indiquent qu'elles manquent d'humidité.

Il convient de noter que l'utilisation de drones est subordonnée à un certain nombre d'autorisations et de réglementations qui doivent être consultées au préalable.

1.2.2 Les capteurs proches

Les capteurs proches sont des capteurs qui sont en contact direct avec le sol, les plantes, le système d'irrigation ou qui sont situés dans un environnement proche. Ils fournissent des mesures détaillées et spécifiques au site qui sont cruciales pour les décisions de gestion au niveau du champ.

La plupart des capteurs proches sont aujourd'hui des capteurs sans fil de type IoT, car ils transmettent les informations enregistrées en temps réel sur internet. Les informations sont stockées sur des serveurs accessibles via internet, ou sur un « cloud », auxquels les utilisateurs peuvent accéder à l'aide de leurs ordinateurs, tablettes ou téléphones portables.

La figure suivante montre l'architecture du réseau de surveillance d'une ferme d'irrigation composé de capteurs environnementaux, de sol, de plantes et de systèmes d'irrigation, qui envoient les informations au « cloud » afin qu'elles puissent être analysées avec le logiciel approprié et fournir à l'utilisateur des recommandations d'irrigation à saisir dans le programmeur, ce qui permet au programmeur/contrôleur d'irrigation d'agir automatiquement en appliquant les instructions reçues du logiciel de gestion de l'irrigation.

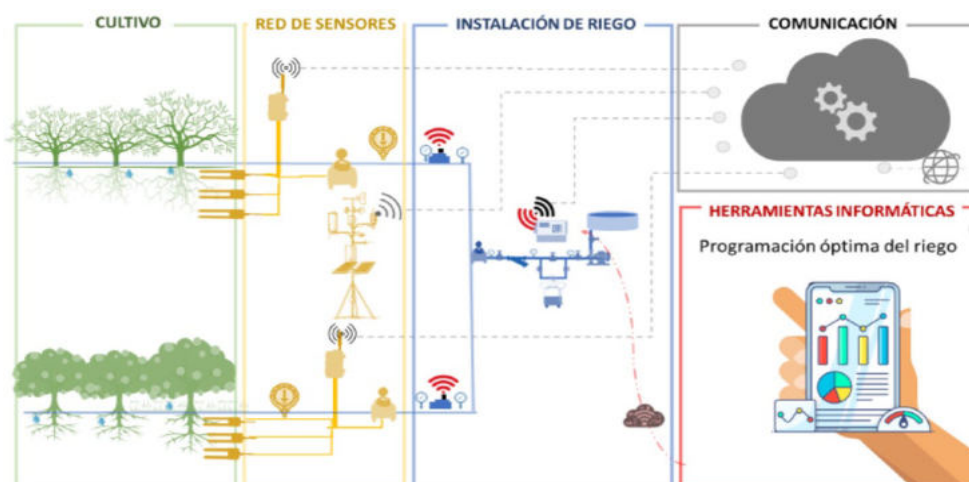


Illustration 6 : Architecture de l'agriculture 4.0. Source : Carmen Flores Cayuela, Université de Cordoue

Les principales caractéristiques et applications des capteurs de proximité sont décrites ci-dessous.

Les capteurs de plantes

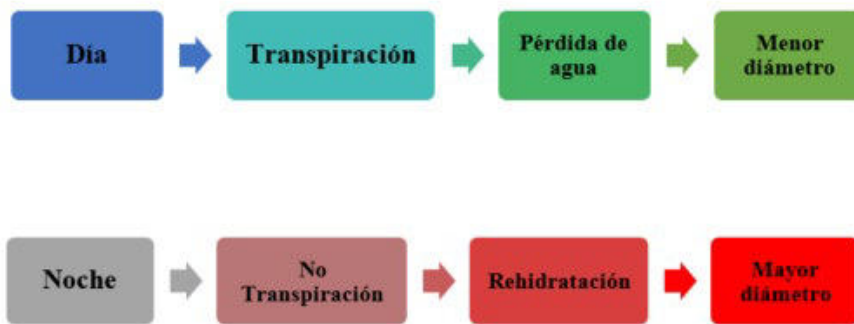
En ce qui concerne les capteurs proches des plantes, nous pouvons souligner les éléments suivants :

Dendromètre : capteur qui mesure 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. Pendant la journée, l'arbre transpire et perd de l'eau, ce qui entraîne une contraction du tronc. La nuit, en revanche, il n'y a pas de transpiration, mais l'eau est absorbée par les racines. L'arbre se réhydrate ainsi, ce qui augmente le diamètre du tronc pendant les heures nocturnes.

Les dendromètres de précision peuvent mesurer les variations journalières du diamètre du tronc, même si elles sont très faibles (de l'ordre de quelques centaines de microns). Grâce à cette information, il est possible de savoir si l'arbre est plus ou moins stressé (plus la variation journalière du diamètre est importante, plus le stress hydrique est grand) et de programmer l'irrigation.

En général, la corrélation suivante peut être recherchée :



Les dendromètres sont placés sur le tronc ou la partie de la plante à mesurer, comme le montre l'illustration suivante.



Illustration 7 : Dendromètre. Source Fernando Casares Université de Cordoue

Dendromètre à bande ou périmétrique: il se compose d'une bande (ou d'un câble) en acier inoxydable qui est enroulée étroitement autour de la circonférence du tronc de l'arbre.

La bande est reliée au capteur de manière à convertir l'expansion 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 d'un capteur non invasif, adapté aux diamètres supérieurs à 5 cm. Ils peuvent être réutilisés sur différents arbres en changeant simplement la bande.

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

Ce dispositif se compose de deux tiges : l'une qui s'enfonce dans la tige pour assurer la stabilité et l'autre qui est placée fermement contre le xylème de la tige. C'est dans la seconde tige que se trouve le capteur, qui enregistre l'expansion et la contraction d'une tige touchant la surface du tronc et la convertit en un signal électrique. Il existe de nombreux types de capteurs : LVTD, potentiométrique, jauge de contrainte, etc

Les capteurs de flux de sève

Ces capteurs mesurent en continu le débit de sève dans le tronc et les branches pour estimer indirectement la transpiration. Ils permettent de calculer les besoins en eau des cultures sur la base de coefficients déterminés pour les différents stades de développement des cultures à partir de la transpiration estimée.

Ces capteurs fonctionnent en appliquant une source de chaleur constante au flux de sève brute (capteur invasif) ou à sa proximité (capteur externe), au

moyen d'une résistance électrique insérée dans une sonde et alimentée par une batterie.

Le capteur externe est alimenté par une batterie. La température à proximité de cette source est affectée par l'intensité plus ou moins grande du flux de sève, la perte de chaleur étant directement proportionnelle à ce flux (débit).

Avec deux ou plusieurs sondes insérées radialement dans le xylème, on mesure les variations de température qui, avec la corrélation appropriée, permettent d'obtenir la valeur de la transpiration en continu et presque en temps réel. Cette corrélation est influencée par le type de plante et par diverses variables climatiques (rayonnement solaire, etc.), de sorte que la sortie du capteur doit être calibrée de manière à ce que la mesure soit proportionnelle au flux de sève. Sans calibrage, l'erreur dans l'estimation de la transpiration peut être de l'ordre de 34 %.

Il est nécessaire de découpler l'effet de la demande évaporative de l'atmosphère de l'information sur le flux de sève, afin d'obtenir une véritable information sur l'état de la culture.

Ils peuvent être utilisés pour les cultures ligneuses et certaines plantes herbacées aux tiges épaisses et coriaces (maïs et tournesol).

Il existe différents procédés pour 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 du pouls thermique.

Jusqu'à présent, l'utilisation de ce type de capteur est concentrée sur la recherche et le développement et est très limitée au niveau commercial.



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

Les capteurs de turgescence des feuilles

Ils mesurent en permanence l'état hydrique de l'arbre grâce à la variation de pression que le jus de la feuille génère dans la paroi cellulaire.

L'enregistrement quotidien de la variation de pression dans les feuilles et de la température ambiante permet de savoir si l'arbre est correctement hydraté ou s'il est stressé par le manque d'eau, et même de distinguer trois états de la plante :

- Bien arrosé
- Stress léger
- Stress sévère



Illustration 9 : Capteur de turgescence des feuilles. Source : Francisco Casares Université de Cordoue

Les capteurs de température des plantes

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

Les inconvénients des capteurs proches des plantes :

- Précision : les réponses données par ces capteurs peuvent parfois être similaires dans une situation de stress hydrique, telle qu'un arrosage excessif. C'est pourquoi il est nécessaire de recevoir des informations supplémentaires provenant d'autres types de dispositifs, tels que des capteurs d'humidité du sol.
- Coût : l'installation de ces dispositifs peut être coûteuse, en particulier sur de grandes superficies.
- Complexité technique : la mise en place et l'entretien des capteurs nécessitent des connaissances techniques spécifiques. Cela peut représenter un défi pour les agriculteurs ou les techniciens qui ne sont pas familiarisés avec ces technologies.
- Dommages et durabilité : sur le terrain, les capteurs sont exposés à des conditions environnementales qui peuvent les endommager ou réduire leur durée de vie, comme la pluie, le vent et l'exposition directe au soleil.

Enregistrement continu du potentiel hydrique des tiges

Des capteurs permettant de surveiller le potentiel hydrique de la tige en continu, basés sur des microtensiomètres, sont apparus récemment sur le marché.



Illustration 10 : Équipement pour la surveillance continue du potentiel hydrique de la tige basé sur des microtensiomètres installés sur le tronc des vignes.

Le microtensiomètre pour la surveillance en continu du potentiel hydrique de la tige des cultures fruitières permet de mieux comprendre les variations de l'état hydrique de la plante car il intègre l'environnement de l'air et du sol ainsi que la physiologie et la gestion de la culture (Lakso *et al.*, 2022). Des informations continues sur ce paramètre améliorent considérablement la capacité à déterminer les pratiques de gestion de l'irrigation, en particulier pour les cultures déficitaires en eau telles que les raisins de cuve ou dans les situations où la disponibilité de l'eau pour l'irrigation est limitée. Les données de surveillance sont disponibles en temps réel sur une plateforme facile à manipuler pour les responsables de l'irrigation.

D'autres innovations sont menées en France à partir de signaux électriques dans les plantes. Il s'agit du capteur à bio-interface VS8 qui enregistre l'activité électrique des plantes. Cette activité végétale permet l'échange d'informations à travers l'organisme végétal. Elle est associée à la capacité de s'adapter rapidement aux stimuli externes, en particulier aux facteurs de stress environnementaux.

On considère aujourd'hui qu'elle joue un rôle clé dans l'adaptation des plantes aux stress biotiques et abiotiques (société Vegetal signal, France)

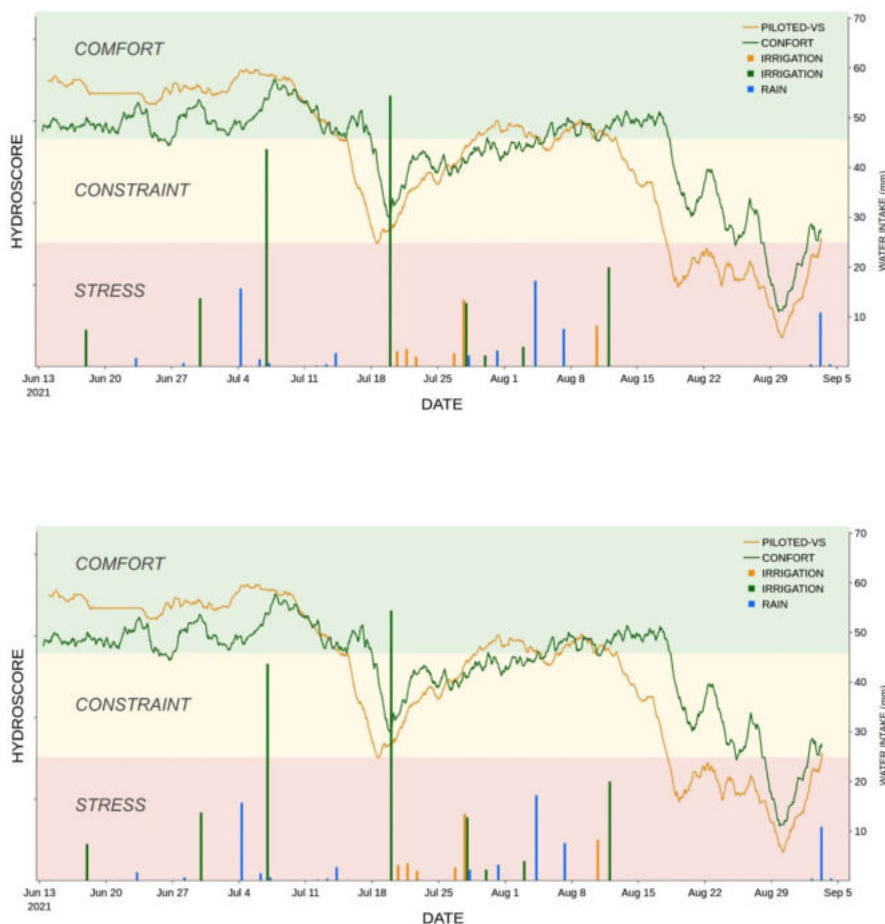


Illustration 11 : L'outil de Vegetal signal, Hydroscore, une application pour le suivi en temps réel de l'état hydrique des vignes.

Les capteurs de sol

Ces capteurs mesurent différentes variables impliquées dans l'irrigation et la fertilisation, telles que la teneur en eau, le potentiel matriciel, la température, la conductivité électrique et la teneur en NPK. Les informations qu'ils fournissent aident à prendre des décisions en matière d'irrigation de précision et de fertirrigation.

Les capteurs de teneur en eau

Ils mesurent la teneur en eau volumétrique, information qui sera utilisée pour la programmation de l'irrigation. Il existe différents types de capteurs en fonction de leur principe de fonctionnement, les plus couramment utilisés étant les sondes diélectriques (capacitives, TDR (Time Domain Reflectometry, réflectométrie de domaine temporaire) et FDR (Frequency Domain Reflectometry, réflectométrie du domaine de la fréquence).

Les différents types de sondes diélectriques déterminent la constante diélectrique du sol (en tant que milieu non conducteur d'électricité) de différentes manières. La constante diélectrique d'un sol varie lorsque le pourcentage d'air et d'eau varie, de sorte que les variations de cette variable sont liées à la teneur en eau volumétrique.

Ils fournissent la teneur en eau volumétrique du sol au fil du temps. La valeur de la teneur en eau enregistrée à un certain moment de la journée est normalement utilisée pour calculer le déficit hydrique du sol, ce qui est nécessaire pour programmer l'irrigation.

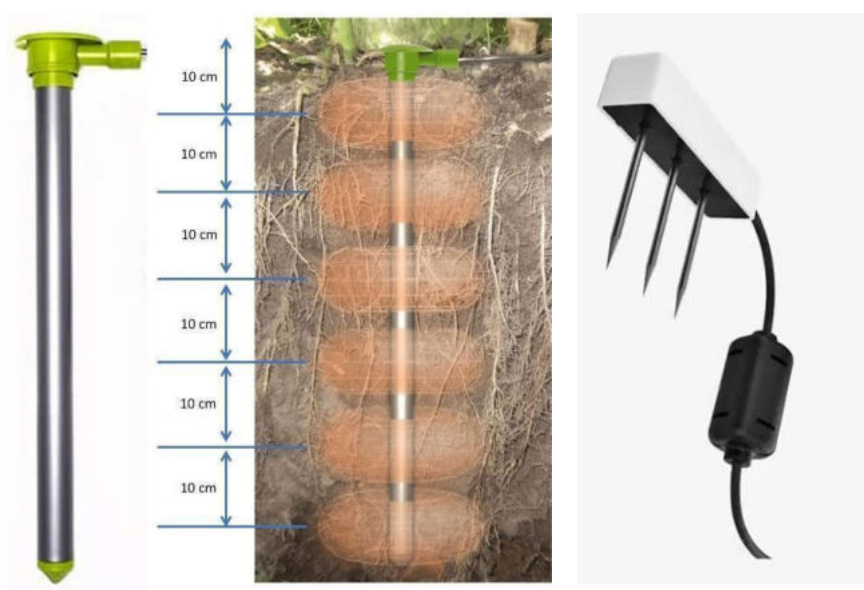


Illustration 12 : Capteur capacitif



Illustration 13 : Capteur FDR



Illustration 14 : Capteur TDR

La teneur en eau du sol varie en fonction de la profondeur, c'est pourquoi des mesures sont effectuées à différentes profondeurs pour déterminer l'évolution de la teneur en eau dans la zone la moins profonde, dans la zone où se concentrent les racines de la culture et dans la zone située au-delà de la portée des racines pour observer l'apparition ou non d'une percolation, comme le montre l'illustration suivante.

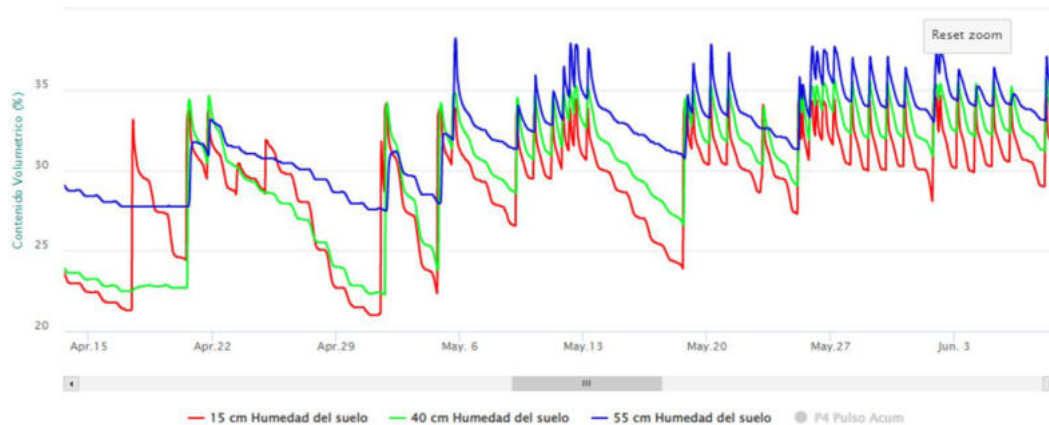


Illustration 15 : Évolution de la teneur en eau d'un sol à différentes profondeurs, montrant quand l'irrigation est effectuée.

L'illustration ci-dessus montre que le capteur capacitif est un capteur tubulaire qui permet de mesurer la teneur en eau à différentes profondeurs, alors que les deux autres types de capteurs nécessitent l'installation d'une sonde à chaque profondeur à mesurer. Le type de sol et les pratiques agricoles sur la parcelle où la sonde doit être installée doivent être pris en compte dans le choix de la sonde, toutes les sondes étant des appareils fiables.



Illustration 16 : Installation de sondes d'humidité à différentes profondeurs

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

Ces appareils sont robustes et résistent aux conditions climatiques défavorables, telles que les températures élevées et l'humidité, ce qui garantit leur fiabilité et leur longue durée de vie sur le terrain (ils peuvent être utilisés pendant plusieurs saisons).

Ils sont conçus pour être faciles à installer et ne nécessitent qu'un minimum d'entretien, ce qui permet de les utiliser dans un large éventail d'environnements agricoles.

Afin de fournir des informations adéquates, il est conseillé de suivre les critères d'installation suivants :

- Installer l'appareil sous la verticale d'un goutteur pour contrôler correctement la teneur en eau du sol après les apports d'irrigation.
- Dans la zone où se trouve le plus grand volume de racines de la culture, pour détecter les variations de l'humidité du sol dues à l'absorption de 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 de l'eau pour la plante.
 - \Rightarrow 45 cm \rightarrow pertes par percolation
- Bon contact avec le sol
 - \Rightarrow Veiller à ne pas perturber la structure du sol.

Les capteurs de potentiel matriciel

Les capteurs de potentiel matriciel du sol (MSP) sont des capteurs qui 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 faible (négative), plus le sol retient l'eau, et vice versa. La fonction reliant 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 le point de flétrissement permanent du sol cultivé et de calculer avec précision le bilan hydrique du sol et donc le taux d'irrigation.

Elles permettent de déterminer le moment de l'irrigation, bien qu'elles ne détectent pas la sur-irrigation.

On sait que la capacité du champ, indépendamment de la texture ou du type de sol, se situe entre -5 et -33 KPa et que le point de flétrissement permanent se situe autour de -1500 KPa. Tous les équipements de mesure du potentiel matriciel ne conviennent pas à tous les types de sol, il est donc très important de savoir dans quelle gamme vous vous situez et de choisir l'équipement adéquat.

Il existe différents types de capteurs matriciels.

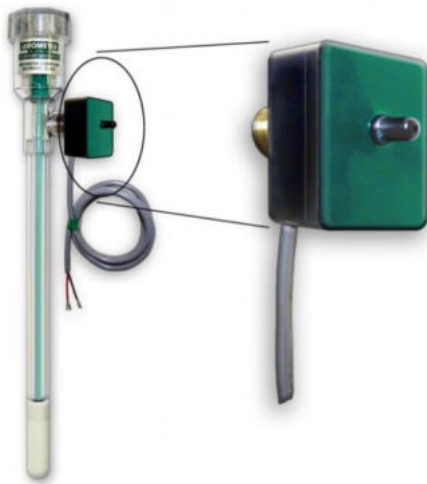
Les tensiomètres. Le capteur se compose d'un tube rempli d'eau, dont l'une des extrémités est une capsule en céramique poreuse, qui est enfoui dans le sol à la profondeur de mesure souhaitée ; l'autre extrémité du tube est reliée à un capteur de pression négative (jauge à vide).

Lorsque le sol se dessèche, la tension matricielle augmente (la valeur absolue du tensiomètre augmente), tandis que lorsqu'il s'humidifie, elle diminue (la valeur absolue du tensiomètre diminue), et des valeurs proches de zéro peuvent être atteintes lorsque le sol est saturé d'eau. Cette propriété permet d'estimer la teneur en eau du sol. Pour les sols horticoles, ce type de capteur est normalement utilisé, car ces sols ont des niveaux d'humidité assez élevés, entre la saturation et

la capacité au champ, et il est plus intéressant de mesurer la tension du sol que l'humidité du sol.

TENSIOMÈTRES avec sortie 4-20 mA (requiert une alimentation, 24 Vcc)

TENSIOMÈTRES avec sortie 0-4,5 V (requiert une alimentation, 5 Vcc)



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



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

Illustration 17 : Des tensiomètres

Les capteurs résistifs et capacitifs en matériaux poreux

Ils sont souvent utilisés dans les cultures ligneuses ou dans les stratégies d'irrigation déficitaire contrôlée, car des niveaux potentiels de -230 KPa peuvent être atteints. Ils appliquent le principe de la résistance électrique variable due aux changements d'humidité du sol ou calculent la constante diélectrique du sol pour déterminer la tension de l'eau dans le sol.



Illustration 18 : Sonde de tension capacitive à matrice de sol



Illustration 19 : Sonde de tension résistive à matrice de sol

Les capteurs de conductivité électrique

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

Les capteurs ambiants

Ces capteurs enregistrent les variables climatiques nécessaires au calcul de l'évapotranspiration de référence, ETo , information de base pour la programmation de l'irrigation (température de l'air, humidité relative et pression atmosphérique relative, rayonnement, vitesse et direction du vent, précipitations). L'enregistrement des variables est continu.

Parmi les capteurs de ce type, on peut citer les suivants :

- le capteur de rayonnement (pyranomètre)

- le capteur de température ambiante
- le capteur d'humidité relative
- le capteur de précipitations
- le capteur de vitesse du vent
- le capteur de direction du vent, etc.

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

Dotés de capacités de communication sans fil, telles que Wifi, Bluetooth ou la connectivité cellulaire, ces capteurs peuvent envoyer des données en temps réel à un système central ou directement à des appareils mobiles, ce qui permet une surveillance continue et des ajustements rapides dans la gestion de l'irrigation.

Ils sont souvent très précis dans leurs mesures et sont robustes, ce qui les rend très durables et résistants.

Ils peuvent être intégrés à des systèmes d'irrigation intelligents pour automatiser l'irrigation en fonction des conditions météorologiques et des besoins spécifiques des plantes, ce qui améliore l'efficacité de l'utilisation de l'eau et réduit le gaspillage.

Les capteurs environnementaux sont généralement faciles à installer et à entretenir. Leur conception permet une installation rapide sur le terrain et une maintenance minimale, ce qui les rend pratiques pour une utilisation agricole à grande échelle.



Illustration 20 : Station agroclimatique complète

SiAR (Sistema de Información Agroclimática para el Regadío - Système d'information agroclimatique pour l'irrigation)

Le ministère de l'agriculture espagnol, par l'intermédiaire de la sous-direction générale de l'irrigation et des infrastructures rurales, met gratuitement à la disposition des utilisateurs toutes les informations collectées par le réseau de stations agrométéorologiques SiAR.

Il s'agit d'une infrastructure qui **recueille**, **enregistre** et **diffuse** les **données climatiques** nécessaires au calcul de la demande en eau dans les zones irriguées.

Elle fournit des informations **utiles**, **rigoureuses** et de **qualité**, qui permettent aux techniciens et aux agriculteurs de calculer les besoins en eau des cultures et de programmer leur irrigation.

Grâce à cet outil, il est possible d'améliorer la planification, la gestion, la manipulation et le contrôle des exploitations irriguées afin de favoriser les

économies d'eau et d'énergie et de répondre aux exigences technologiques des professionnels du secteur.

Il est composé de plus de 500 stations météorologiques, qui couvrent environ 90 % de la zone irrigable de l'Espagne et fournissent les informations nécessaires à la détermination de l'évapotranspiration de référence et au calcul ultérieur des besoins en eau des cultures irriguées.

Il s'agit d'un réseau collaboratif qui associe les stations du ministère et celles des 12 communautés autonomes participantes, qui assurent également un contact direct avec les irrigants, qui sont les utilisateurs finaux des informations du système.

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

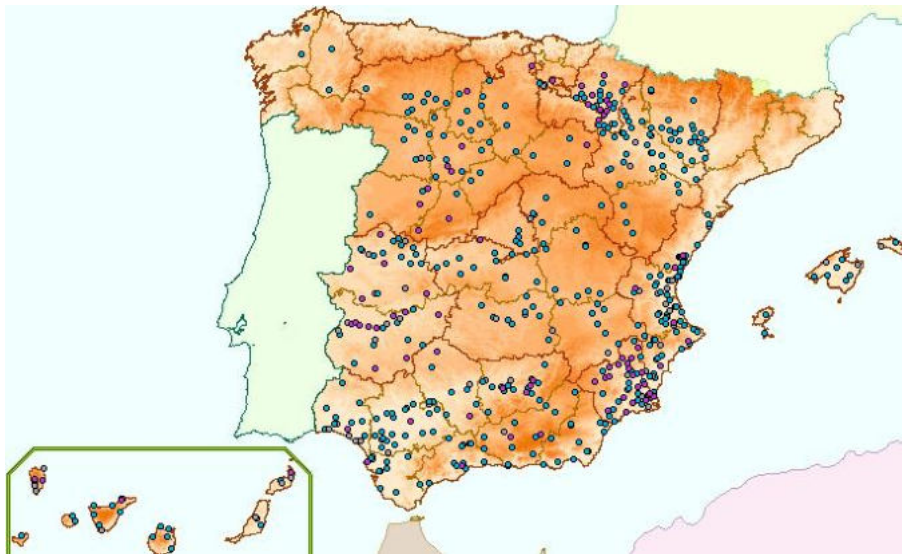


Illustration 21 : Réseau SIAR. Source : Ministère de l'agriculture, de la pêche et de l'alimentation

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

Seleccionar todo **Deseleccionar todo**

☒ 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	4,48	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	77,30	8,43	0,45	0,00	2,23
24/03/2022	14,94	18,23	13:06	12,05	07:40	70,20	94,00	08:00	50,84	16:14	2,91	48,26	8,58	13:08	38,71	6,75	0,00	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	2,97	61,77	7,91	01:33	48,31	6,15	1,00	0,00	1,00
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	58,58	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	66,17	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	42,28	12:52	1,26	96,10	5,39	09:02	61,91		0,00		

Illustration 22 : Exemples d'informations fournies par une station agro-climatique du réseau SIAR.

SAGRA (Sistema Agrometeorológico para la gestión del riego en Alentejo -Système agrométéorologique pour la gestion de l'irrigation dans l'Alentejo)

Le Centro Operativo e de Tecnologia de Regadio (COTR), au Portugal, a été impliqué dans le transfert de technologies d'irrigation, dans les services liés à l'utilisation efficace de l'eau d'irrigation. L'application de l'agrométéorologie a été l'un des principaux domaines de travail, l'objectif principal étant d'estimer les besoins en eau des cultures. Cette activité est en effet considérée comme

fondamentale pour le développement d'une agriculture irriguée durable et compétitive, cherchant non seulement à accroître l'efficacité de l'utilisation de l'eau, mais aussi à atteindre la plus grande précision possible dans le calendrier d'application, en répondant non seulement aux problèmes techniques du secteur, mais aussi aux pressions environnementales.

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

- Le dimensionnement - qui est normalement effectué lorsque la mise en œuvre de l'irrigation est planifiée. Son principal objectif est l'estimation de la consommation annuelle, afin d'établir la superficie irriguée maximale par rapport à la disponibilité existante, et les besoins pendant la période de pointe, ce qui permet de dimensionner le réseau d'irrigation.
- Gestion (avis d'irrigation) - normalement effectuée pendant l'exploitation d'une zone irriguée. Son principal objectif est de déterminer, aussi précisément que possible, la quantité d'eau à appliquer en fonction du stade phénologique de la culture.

Informations de base pour créer un service d'alerte à l'irrigation

- Informations agrométéorologiques de qualité, nécessaires pour estimer l'évapotranspiration de référence de la culture (ET_o) : la température de l'air, l'humidité relative de l'air, la vitesse du vent à 2 m et le rayonnement solaire global. En plus de ces paramètres, il est important de surveiller les précipitations pour établir un bilan hydrique.
- Culture : les informations existantes des bases de données sur les cultures (Allen et al., 1998) sont utilisées, avec la caractérisation des principaux stades de développement végétatif de la culture (durée) et l'identification des périodes pendant lesquelles la culture est plus ou moins sensible au stress. Ces informations sont adaptées aux conditions réelles de la région.

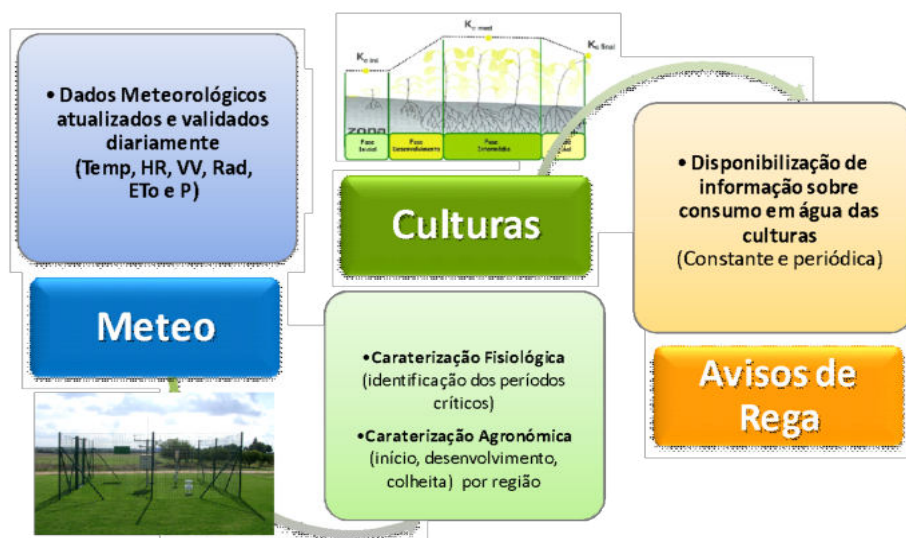


Illustration 23 : Méthodologie de fonctionnement du service d'alerte à l'irrigation

Pour garantir le service d'alerte à l'irrigation dans l'Alentejo, le COTR gère depuis 2001 le réseau SAGRA (Système agrométéorologique pour la gestion de l'irrigation dans l'Alentejo), composé de 14 stations météorologiques automatiques, qui caractérisent les principales zones d'irrigation de l'Alentejo.

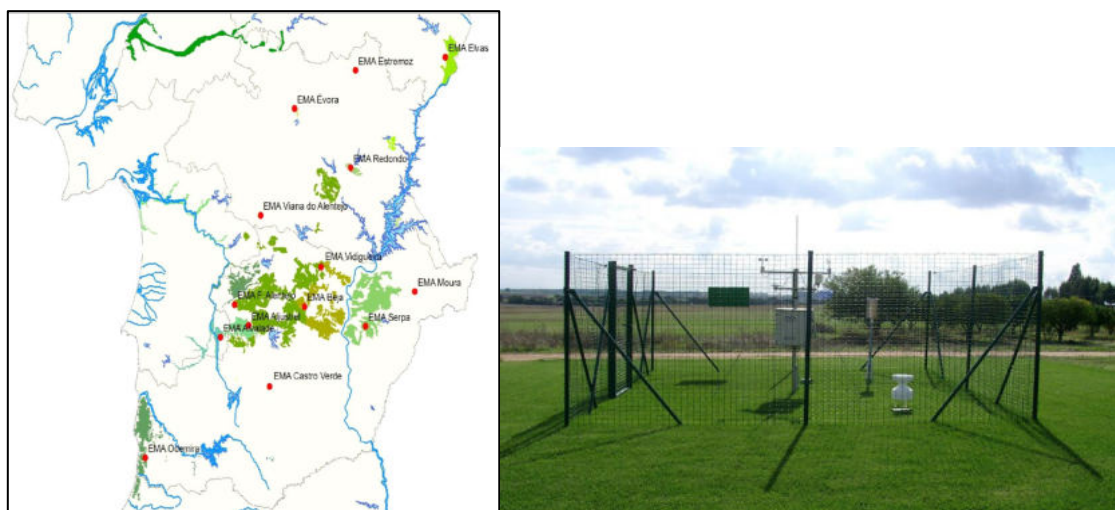


Illustration 24 : Réseau de stations météorologiques automatiques - SAGRA



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

membros.cotr.pt/SagraNet

COTR / Sagra Net

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 : Consultation des données quotidiennes par l'utilisateur de SAGRA-NET (www.cotr.pt)

À partir des informations saisonnières, il est également possible de caractériser une région sur le plan climatique, ce qui peut servir de base à l'étude

de l'adaptabilité 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 indiquent le début du repos végétatif sur la base de la température horaire moyenne et l'identification des phénomènes météorologiques extrêmes (trombes d'eau, tornades, etc.).

Parallèlement au service d'alerte à l'irrigation, COTR a développé le service MOGRA - Modèle de gestion de l'irrigation pour l'Alentejo (www.cotr.pt/mogra), soutenu par le réseau de stations météorologiques automatiques et basé sur la technique du bilan hydrique, qui permet d'accéder à un service en ligne. 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 l'eau facilement utilisable s'épuise) et un calendrier d'irrigation réel permet à l'utilisateur de visualiser le comportement de sa gestion de l'irrigation, avec l'introduction des irrigations effectuées, et donc de décider de l'opportunité de l'irrigation. Des équipements de surveillance du sol ou des plantes peuvent être utilisés pour compléter ces informations.



Illustration 26 : Utilisateur de MOGRA

Autres

En France, il existe de nombreux réseaux de stations météorologiques dédiés à la population, gérés par Météo France, mais aussi dédiés à l'agriculture avec Sencrop, une plateforme agrométéorologique connectée aux stations météorologiques locales. Les coopératives créent également des stations météorologiques collaboratives, et l'Union des Coopératives Agricoles de l'Allier (UCAL) compte aujourd'hui plus de 40 stations connectées.



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

La société française ISAGRI propose même une plateforme de stations météorologiques agricoles connectées, tout comme weenat, qui permet aux

agriculteurs de suivre la météo en direct de leurs champs via des réseaux météorologiques connectés.



Illustration 28 : Outils de Sencrop

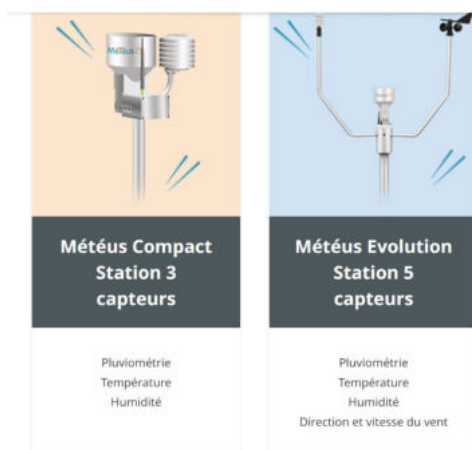


Illustration 29 : Station météorologique Isagri



Illustration 30 : Outil de gestion de l'irrigation Weenat

Les capteurs de surveillance du système d'irrigation

La mise en œuvre de l'irrigation de précision implique le suivi des principales variables hydrauliques : le débit et le volume d'eau utilisé et la pression dans le réseau d'irrigation. Il est également souhaitable de connaître la qualité de l'eau.

La figure ci-jointe montre un réseau d'irrigation dans lequel les points de contrôle du débit et de la pression peuvent être vus en détail.

Le débitmètre

Il s'agit d'un capteur qui mesure le débit d'un fluide sur une surface. À partir de maintenant, nous ne parlerons que des débitmètres qui sont utilisés pour mesurer le débit de l'eau passant dans une canalisation. Les types de débitmètres suivants sont couramment utilisés dans les réseaux d'irrigation sous pression :

- les débitmètres électromagnétiques
- les débitmètres à ultrasons
- les débitmètres mécaniques avec émetteurs d'impulsions.

Le capteur de pression

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

Les capteurs de pression pour l'eau sont généralement des transducteurs, c'est-à-dire qu'ils transforment la pression mesurée par l'élément sensible en une sortie électrique analogique normalisée. On trouve principalement des capteurs avec une sortie 4-20 mA ou 0-10 V, bien que dernièrement, en raison des exigences d'adaptation des nœuds IoT, d'autres sorties électriques soient utilisées : 1-5 V, 0-5 V, 0,5-4,5 V et sortie RS-485 avec ModBus. Le signal électrique fourni est analogue à la

valeur de la pression mesurée, moins la valeur qui nous est donnée par les communications, les transmetteurs, qui nous donnent directement la pression dans l'unité choisie.

Les plages de pression de mesure sont très larges, tout comme les caractéristiques du capteur, telles que les connexions électriques, les connexions de processus, le type de sortie électrique, le type de mesure, etc. Il existe donc une multitude de variantes sur le marché.

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

- connaître l'évolution du processus de distribution et d'impulsion de l'eau.
- améliorer la qualité de l'irrigation : si la pression est surveillée dans la parcelle, il est possible d'obtenir la meilleure uniformité d'irrigation possible en contrôlant la pression d'irrigation.
- étudier l'efficacité de la distribution de l'eau : grâce à plusieurs capteurs, il est possible de déterminer les pertes de pression qui se produisent dans les différents éléments de la distribution de l'eau (chaudières, filtres, etc.) et dans des sections de celle-ci. Grâce à la collecte et à l'analyse de ces données, nous pouvons prévoir les éventuelles défaillances futures et rechercher des solutions et des remèdes avant qu'elles ne se produisent, ce qui permet de minimiser les pertes d'eau.
- étudier l'efficacité des pompes : si les performances du système de pompage sont surveillées et que des données historiques sont disponibles, il est possible d'établir des seuils d'efficacité minimaux de sorte que si l'efficacité tombe en dessous de ces valeurs, des alarmes sont générées et des mesures correctives peuvent être prises.
- indirectement, le niveau d'eau dans un réservoir peut être mesuré (capteurs de pression hydrostatique) ainsi que le débit dans une conduite (débitmètres à pression différentielle).

Les capteurs de qualité de l'eau d'irrigation

Il est nécessaire de connaître la qualité de l'eau d'irrigation pour déterminer si l'eau d'irrigation disponible est adaptée aux caractéristiques de la culture. La principale source d'accumulation de sel dans le sol est l'eau d'irrigation.

La sonde de conductivité électrique de l'eau d'irrigation mesure la conductivité électrique de l'eau, un facteur qui conditionne la production des cultures.

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

Les informations fournies par le capteur de conductivité électrique permettent de calculer la fraction de lessivage du sel.

Une description complète des systèmes de surveillance décrits et de leur application à la gestion de l'irrigation est disponible sur la plateforme d'apprentissage en ligne du site web du projet Interreg Espagne-Portugal Hub Iberia Agrotech (HIBA), <https://learningdata.hubiberiaagrotech.eu/> et dans la documentation de la conférence organisée par le Ministère de l'Agriculture espagnol, intitulée « Use of big data, sensorics and remote sensing for the calculation of irrigation dose » (utilisation de données massives, de la sensorique 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-sostenible-regadios/formacion-difusion/documentacion/detalle.aspx?id=tcm:30-682067-16>

2- Les logiciels de gestion de l'irrigation

Ils fournissent une plateforme d'intégration de 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 programmes proposent des analyses avancées qui permettent de prévoir les besoins en eau et d'ajuster les programmes d'irrigation en conséquence.

Les principales caractéristiques de ces programmes :

- Ils peuvent intégrer des données provenant de diverses sources, notamment des capteurs sur le terrain, des stations météorologiques, des images satellite et des drones. Cela permet d'obtenir une vision globale de l'état des champs et des besoins en irrigation.
- Automatisation de l'irrigation : permet de programmer et de contrôler automatiquement les systèmes d'irrigation en fonction de l'état du sol, des conditions météorologiques et des besoins spécifiques des cultures. Elle permet notamment d'ajuster les programmes 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 visualiser l'état actuel de leur système d'irrigation, l'humidité du sol, les conditions météorologiques et d'autres facteurs pertinents directement à partir de leurs appareils mobiles ou de leurs ordinateurs.
- Ils fournissent des outils d'analyse qui aident les agriculteurs à comprendre les performances de leurs pratiques d'irrigation, à identifier les tendances et les zones problématiques, et à prendre des décisions éclairées pour en améliorer l'efficacité.
- Certains logiciels avancés intègrent des fonctions prédictives qui utilisent des modèles météorologiques et de culture pour prévoir les

besoins futurs en eau, ce qui permet aux agriculteurs de planifier à l'avance et d'ajuster leurs stratégies d'irrigation.

- Les systèmes comprennent souvent des paramètres d'alerte qui informent les utilisateurs des conditions critiques nécessitant une attention particulière, telles que les défaillances potentielles du système, les conditions de stress hydrique des cultures ou les 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'expertise technologique.
- Ils sont compatibles avec un large éventail de systèmes d'irrigation et d'équipements, et peuvent s'adapter aux petites exploitations comme aux grandes.

Les vendeurs de ces logiciels proposent généralement une assistance technique et des mises à jour régulières pour s'assurer que le système fonctionne correctement et qu'il est équipé des 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- Les entreprises du secteur de l'irrigation

En ce qui concerne les entreprises qui fournissent des solutions numériques pour l'irrigation, il existe un moteur de recherche, qui appartient au Ministère de l'Agriculture espagnol, qui mérite d'être mentionné en raison de son importance pour les professionnels du secteur agricole. Il s'agit de l'outil **digimapa**, hébergé sur la plateforme Tierra. Il s'agit d'un outil de recherche d'entreprises agroalimentaires: <https://digimapa.plataformatierra.es/>

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

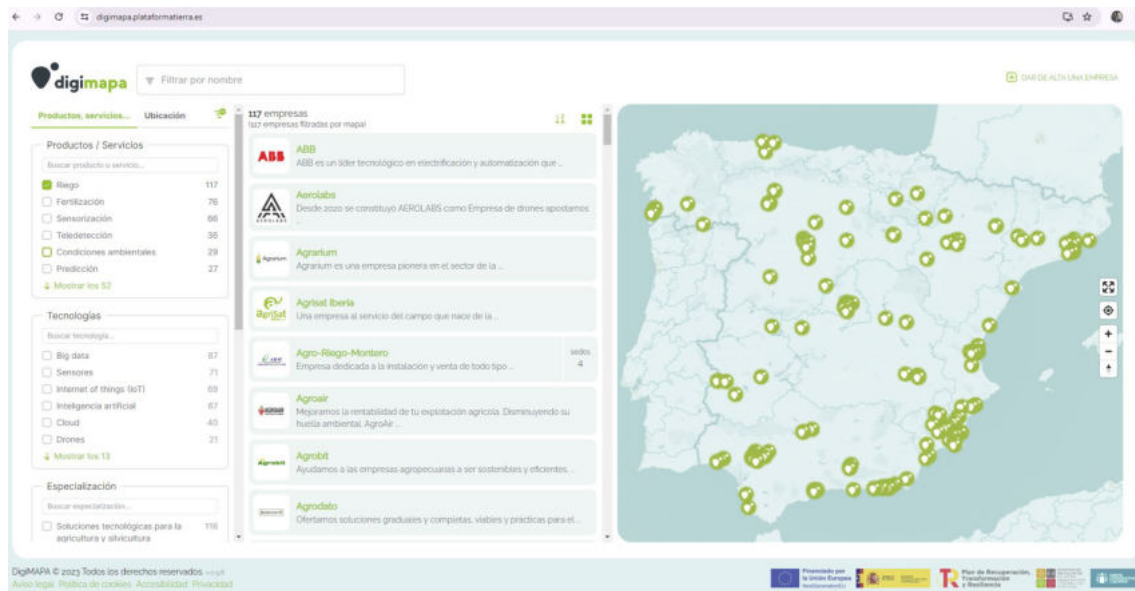


Illustration 31 : Illustration Digimapa. Plate-forme Tierra. Recherche d'entreprises d'irrigation

En outre, afin de contribuer à la réalisation de tous les objectifs du projet **Smart Green Water**, le modèle suivant a été développé pour caractériser certaines solutions numériques spécifiques qui existent sur le marché, dans le but d'aider les agriculteurs et les professionnels du secteur à rechercher des informations sur ces solutions. L'idée est que le modèle soit rempli par les entreprises du secteur de l'irrigation et que ces informations soient mises à la disposition des agriculteurs.

**MODÈLE DE CARACTÉRISATION DES SOLUTIONS NUMÉRIQUES DANS LE
DOMAINE DE L'IRRIGATION****Nom de l'entreprise :****CIF :****Nom de la solution commercialisée :**

Veillez indiquer si votre entreprise développe 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 bureaux d'études.

La solution commercialisée :

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

Si elle utilise des capteurs, sont-ils :

- À distance
 - de satellites
 - de drones
 - autres
- Proches
 - au sol
 - dans l'air ambiant
 - sur la plante

Paramètres pris en compte par la solution

- Tranches horaires
- Données directes de la culture (suivre la prescription selon les études publiées)
- Données indirectes sur la culture (prévisions pluviométriques, données d'observatoires...)

La solution permet-elle de gérer l'irrigation à distance ?

S'agit-il d'un outil d'aide à la décision pour l'irrigant (oui/non) et si oui, sur quoi apporte-t-il des informations ?

- Quand irriguer
- Quelle quantité irriguer
- Où irriguer

Veuillez expliquer si l'outil permet de programmer plusieurs parcelles en même temps, ou s'il est nécessaire d'établir différents calendriers d'irrigation ?

Peut-il être utilisé en cas d'irrigation déficitaire ?

Veuillez énumérer les cultures pour lesquelles il est optimisé :

La solution est-elle testée dans une région agro-climatique ?

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

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


Propriété des données : après la collecte des données d'irrigation, les 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 procède-t-il à une adaptation de l'algorithme aux conditions de l'agriculteur, sur la base des données fournies par les parcelles, ou, au contraire, utilise-t-il le même algorithme pour tous les agriculteurs ?

Interface utilisateur :

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

Assistance et entretien

 **Possibilités d'assistance :**

- Aide technique (24/7, heures ouvrables, etc.)
- Canaux de support (téléphone, e-mail, chat, etc.)

Entretien :

Assistance et entretien

Possibilités d'assistance :

- Aide technique (24/7, heures ouvrables, etc.)
- Canaux de support (téléphone, e-mail, chat, etc.)

Entretien :

- Services d'entretien préventif et correctif
- Mises à jour des logiciels

Tarification et modèles de financement

Modèle de tarification :

- Abonnement.
- Paiement unique
- Modèles hybrides

Fourchette de prix :

- Coût approximatif ou fourchette de prix.

Options de financement :

- Financement propre
- Collaboration avec des institutions financières

Bibliographie

- Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Levante. (2023). Catalogue de solutions de numérisation de l'irrigation dans le cadre de l'appel PERTE pour la numérisation du cycle de l'eau. Extrait de <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). Les opportunités de la numérisation en Amérique latine : défis et stratégies. Extrait de <https://repositorio.cepal.org>
- ISAGRI (2024). <https://www.isagri.fr/meteus/meteus-la-station-meteo-au-coeur-de-vos-champs>
- Lamo, J., & Garrido, A., (2024). Irrigation et sécurité alimentaire. La situation en Espagne. 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 technique général. Centro de Publicaciones & Cajamar Caja Rural (2023). Observatorio para la Digitalización del Sector Agroalimentario Análisis del estado actual de la digitalización del sector agroalimentario español.
- 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 cultivées et les rendements. Analyse des terres irriguées en Espagne.
- Ministère de l'agriculture, de la pêche et de l'alimentation (2023). Stratégie de numérisation du secteur agroalimentaire et forestier et de l'environnement 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 et forestier et de l'environnement rural. https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/estrategia-digitalizacion-sector-agroalimentario/estrategia_digitalizacion_sector_agroalimentario_forestal_medio_rural_ve_tcm30-509645.pdf
- Ministère de la transition écologique et du défi démographique (2023). Les bases du PERTE pour la numérisation du cycle de l'eau pour l'irrigation. Extrait de <https://www.camaradeaguas.com>
- SENCROP (2024). <https://sencrop.com/fr/>
- Trillo Guardia, C. (2023). Vers une numérisation durable de l'irrigation. Chambre de l'eau de l'île de Tenerife. Extrait de <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/>