

Technologies numériques pour les plans de contingence en cas de sécheresse.



I

Programme de formation pour les irrigants

Informations sur le livrable

Numéro du livrable	E.2.2.2
Date de livraison prévue	
Date de livraison effective	15/09/2026
Chef de file du projet	IRTA

Auteurs		
Prénom	Nom(s)	Organisme
Francesc	Camps	IRTA
Jordi	Oliver	IRTA

Technologies numériques pour les plans de contingence en cas de sécheresse.....	1
1. Introduction	4
2.Plans de contingence sécheresse.....	5
3. Technologies numériques pour les plans de contingence en cas de sécheresse.....	7
3.1.- Numérisation de la gestion des infrastructures.	8
3.2.- Numérisation de l'information.....	11

4. Résumé	19
-----------------	----

I. Introduction

La sécheresse est un phénomène récurrent qui n'est propre à aucun type de climat en particulier. Elle se produit sur tous les continents et peut varier en intensité, en durée et en étendue spatiale. Les sécheresses commencent par un déficit de précipitations et, si ce déficit persiste, elles s'étendent aux sols, aux rivières, aux aquifères et aux réservoirs. Au final, l'ensemble du cycle de l'eau est perturbé et les usages de l'eau, tant naturels que ceux induits par les activités humaines, sont affectés. Par ailleurs, la gravité de la sécheresse dépend aussi des besoins en eau des activités humaines et de la végétation, aussi bien spontanée que cultivée, qui ont un fort impact sur le bilan hydrique. L'impact et la gravité d'une sécheresse dépendent du niveau de vulnérabilité des systèmes touchés, car les impacts seront perçus différemment selon l'appartenance à tel ou tel groupe social ou secteur, même au sein d'un même épisode de sécheresse. La sécheresse se distingue de l'aridité par son caractère temporaire et se distingue de la pénurie d'eau par le fait qu'il s'agit d'un phénomène exclusivement naturel.

La gestion des risques liés à la sécheresse est complexe, car elle fait intervenir de multiples secteurs, échelles et temporalités. Elle exige, à l'échelle territoriale, la participation coordonnée d'institutions et d'acteurs divers, tels que les ministères, les autorités locales, le secteur privé, les centres technologiques et de recherche et les groupes vulnérables, dans des domaines comme la préparation, le suivi, l'alerte précoce, l'atténuation et l'évaluation. Le passage d'une gestion réactive à une gestion proactive suppose de repenser les cadres institutionnels afin d'anticiper, au lieu de se contenter de réagir aux crises.

Un plan de contingence est un ensemble de procédures alternatives et de mesures préventives visant à assurer la continuité opérationnelle et à protéger les ressources d'une organisation face à des événements indésirables ou à des situations d'urgence. Pour l'irrigation agricole, qu'elle soit collective (communautés d'irrigants, collectivités, ...) ou individuelle (exploitation, parcelle, ...), le manque d'eau disponible a un impact économique moindre s'il peut être anticipé. Cette anticipation permet de réorganiser l'irrigation en fonction de la disponibilité en eau, des différents stades phénologiques de la culture et de leur sensibilité au déficit hydrique, afin d'en réduire l'impact sur la production. Le plan doit prévoir aussi bien des mesures stratégiques que des mesures ponctuelles.

2.Plans de contingence sécheresse.

Les plans sécheresse, à l'échelle territoriale, sont un instrument de gestion élaboré par les administrations de l'eau dans le but de prévenir les situations de sécheresse, de gérer les ressources en eau disponibles et d'en atténuer les effets. Ces plans territoriaux sont déjà définis dans la Directive-cadre sur l'eau de l'UE.

Outre ces plans territoriaux, en Espagne, et selon le district hydrographique (demarcación hidrográfica), seule l'élaboration de plans sécheresse pour l'approvisionnement en eau urbain des circonscriptions de plus de 20.000 habitants est obligatoire. Quoi qu'il en soit, planifier face à des scénarios défavorables est la manière la plus intelligente de relever les nouveaux défis ; c'est pourquoi, face aux situations de manque d'eau, qui seront de plus en plus fréquentes, il est indispensable de planifier la manière d'y faire face plutôt que d'improviser.

C'est pourquoi les communautés d'irrigants (comunidades de regantes) doivent disposer de ces documents, élaborés et approuvés par leurs assemblées générales, afin de maintenir la cohésion et la discipline dans la gestion de l'eau, dans le but de causer le moindre impact économique au collectif d'agriculteurs-irrigants. Le plan de contingence sécheresse d'une communauté d'irrigants doit être élaboré à partir des dispositions prévues dans le plan sécheresse du district hydrographique et transposer ses restrictions au sein de la communauté avec connaissance, discernement et transparence, en veillant à une répartition équitable et efficiente de l'eau en fonction des contraintes des infrastructures de la communauté.

Pour cela, il faut assurer un suivi des indicateurs de sécheresse utilisés par le plan du district hydrographique avec une anticipation suffisante pour prévoir leur activation au cours de la campagne d'irrigation.

La transparence dans la gestion des situations de pénurie d'eau doit être une exigence indispensable ; pour cela, la mesure et le contrôle des consommations sont nécessaires afin de garantir l'équité sur la base des critères que la communauté a définis en situation normale dans son plan sécheresse.

Il est évident que, pour faire face aux situations de sécheresse et améliorer l'efficience de l'eau en situation de pénurie, il est important d'agir avec connaissance, précision et rapidité. Pour cela, il

est indispensable de disposer d'installations d'irrigation modernisées (réseau de distribution d'eau sous pression permettant d'utiliser des systèmes d'irrigation goutte-à-goutte ou par aspersion) et d'en avoir une connaissance parfaite.

3. Technologies numériques pour les plans de contingence en cas de sécheresse.

Pour gérer efficacement les restrictions d'eau en cas de sécheresse dans un périmètre irrigué, il faut disposer d'informations fiables, à jour et complètes afin de prendre rapidement la meilleure décision à chaque instant. En ce sens, les systèmes d'information géographique (SIG) permettent de représenter l'information répartie sur un territoire géographique.

Un système d'information géographique (SIG) est un système informatique capable d'intégrer, de stocker, de modifier, d'analyser, de partager et d'afficher des informations géoréférencées. De manière plus générale, il s'agit d'un outil grâce auquel les utilisateurs peuvent effectuer des requêtes interactives (recherches définies par l'utilisateur), analyser l'information spatiale et modifier leurs données. Tout objet d'un SIG est décrit par sa localisation et sa position à la surface terrestre au moyen de coordonnées géographiques et par les informations alphanumériques qui lui sont associées.

Pour les communautés d'irrigants, le système d'information géographique doit comprendre au minimum les informations suivantes :

1. Recensement des usagers et des parcelles du périmètre irrigué.
2. Infrastructures de captage et de distribution de la communauté.
3. Gestion de l'irrigation, avec la possibilité de formuler des demandes et de gérer les tours d'eau.
4. Plans de culture.
5. Contrôle des quotas ou dotations

D'une manière ou d'une autre, ces systèmes de gestion de l'information doivent être mis à jour en permanence avec des informations fiables et quantifiables ; leur connexion aux données numériques des capteurs de terrain et des capteurs de télédétection, avec une fréquence de lecture adaptée, est donc indispensable.

Si ces informations géolocalisées sont mises à jour périodiquement et que la prise de décision suit une logique, il est possible de développer un système SCADA (combinaison de matériel et de

logiciel permettant de superviser, de contrôler et d'automatiser des processus) avec des automates programmables (PLC) et de prendre des décisions de gestion automatiques. Ce type de système est courant dans les processus industriels. Il est plus difficile à mettre en œuvre dans des systèmes où les éléments et les appréciations humaines influencent les processus, et d'autant plus lorsque ceux-ci évoluent dans le temps.

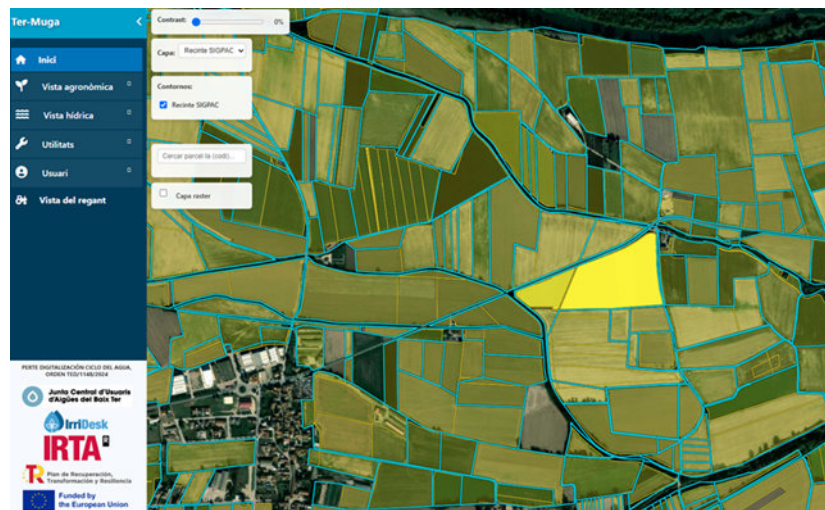


Figure 1.- Système d'information géographique, avec le recensement des usagers et des parcelles, les infrastructures de la communauté d'irrigants et les plans de culture.

3.1.- Numérisation de la gestion des infrastructures.

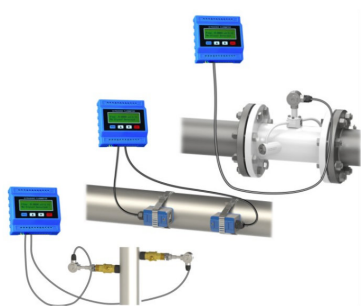
3.1.1. Contrôle du volume et de la pression de l'eau.

Le volume d'eau doit pouvoir être quantifié, aussi bien au captage initial que dans les différents tronçons de distribution, lors du retour au milieu naturel et lors de la livraison finale à chaque usager. La quantification du captage initial est obligatoire selon les dispositions légales de l'espace SUDOE. Ce contrôle est généralement réalisé au moyen de compteurs. Les plus courants sont :

Électromagnétiques : ils reposent sur la loi d'induction électromagnétique de Faraday, selon laquelle, lorsqu'un fluide conducteur traverse un champ magnétique généré par le compteur, il se produit une tension électrique directement proportionnelle à la vitesse du fluide.

À ultrasons : L'appareil émet des impulsions ultrasonores alternativement dans le sens du courant et à contre-courant, et un compteur d'impulsions calcule la différence de temps exacte entre les deux trajets. Cette variation permet de déterminer avec une précision absolue la vitesse et le débit réel de l'eau

La gestion de la pression dans les conduites se fait au moyen de manomètres numériques, de transducteurs de pression (qui convertissent la pression en signal électrique) ou de pressostats (qui activent ou désactivent un circuit électrique lorsqu'un niveau de pression prédéfini est atteint).



Figures : (2) Compteurs à ultrasons. (3) Compteur électromagnétique. (4) Transducteur de pression à jauge de contrainte.

3.1.2. Contrôle de la qualité de l'eau.

En cas d'utilisation d'eaux issues de stations d'épuration des eaux urbaines ou d'aquifères souterrains proches de la mer et soumis à l'intrusion saline, il est conseillé d'installer des capteurs de conductivité afin de pouvoir prendre des décisions lorsque la concentration en sels risque de nuire aux cultures à irriguer.

Ces capteurs mesurent la capacité de l'eau à conduire l'électricité, calculant directement et de manière systématique la concentration en sels dissous et ajustant automatiquement la valeur mesurée aux variations de température de l'eau.

Il existe également aujourd'hui des systèmes de mesure en continu des ions (Cl^- ; Na^+ ; NO_3^- ; Br^- ; NH_4^+ ; Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; K^+ ; etc.) dans les eaux d'irrigation, si leur mise en place s'avère nécessaire.



Figure 5. Exemple d'appareil de mesure de la qualité de l'eau d'irrigation.

3.1.3.- Contrôle du niveau des bassins d'irrigation ou des eaux souterraines.

Les irrigants qui ont un accès direct à des réserves d'eau en surface (bassins d'irrigation) ont besoin de mesurer le niveau d'eau dans le bassin afin de prendre des décisions pertinentes et d'anticiper les scénarios. Dans ce cas, les bassins sont généralement équipés de capteurs de niveau. Il existe divers types de capteurs pour déterminer le niveau d'un bassin. Les plus courants sont : la sonde de pression hydrostatique, la sonde radar et la sonde à ultrasons.

Pour le contrôle des niveaux de nappe en cas d'exploitation d'un aquifère, la mesure se fait à l'aide d'une sonde de pression hydrostatique installée dans un piézomètre ou un puits. La sonde est installée de façon permanente et mesure la pression exercée par la colonne d'eau située au-dessus du capteur, laquelle est proportionnelle à sa hauteur. Le câble comporte un petit tube capillaire qui permet de soustraire automatiquement la pression atmosphérique extérieure et de garantir que seule la pression de l'eau est mesurée.



Figures 6 : Types de capteurs pour contrôler le niveau d'eau d'un bassin : (à gauche) sonde de pression hydrostatique, (au centre) sonde radar, (à droite) sonde à ultrasons. Figure 7 : Capteur de pression hydrostatique, enregistreur de données (datalogger) et système de transmission de données à installer dans le piézomètre.

3.2.- Numérisation de l'information.

Pour relever les défis de la distribution de l'eau en situation de pénurie, il est nécessaire de disposer d'informations exactes et précises sur les prévisions de culture dans les différentes parcelles. On peut ainsi, dans un second temps, établir la prévision de leurs besoins en eau, qui peut être corrigée grâce aux informations d'un réseau de capteurs mesurant l'eau du sol disponible pour les cultures, et confirmée par la télédétection satellitaire en libre accès et la modélisation du système. Aujourd'hui, le développement de technologies telles que les jumeaux numériques permet d'intégrer toute l'information numérique (capteurs, télédétection et modèles) en temps réel avec un traitement automatique, et de simuler différents scénarios qui servent de guide à la décision immédiate et future. Même s'il existe des technologies très avancées et en constante évolution qui facilitent et affinent le diagnostic, il convient de souligner

que leur utilisation requiert un personnel techniquement très compétent dans le domaine de l'irrigation moderne pour qu'elles soient efficaces, performantes et décisives.

3.2.1. Inventaire des parcelles et des cultures.

Si disposer d'informations sur les prévisions de cultures à implanter dans les différentes parcelles est déjà utile en situation normale, il est indispensable de disposer de ces informations en situation de pénurie, afin de pouvoir répartir l'eau conformément au Plan de gestion de la sécheresse approuvé par la Communauté.

Ces informations peuvent être obtenues par une déclaration de l'irrigant et intégrées numériquement dans le système d'information géographique de la Communauté elle-même. Elles peuvent ensuite être vérifiées par télédétection. Pour les cultures herbacées, les outils de télédétection identifient les cultures avec précision dès que celles-ci couvrent plus de 20 % de la surface

Disposer de ces informations permet aux techniciens de la Communauté d'irrigants de concevoir une répartition de l'eau selon les critères suivants :

- a) Priorité à la survie des cultures ligneuses pluriannuelles, comme le prévoient certains Plans sécheresse des confédérations hydrographiques (organismes de bassin espagnols), estimée à 35 % des besoins productifs.
- b) Quantification de la surface en cultures irriguées et détermination du volume par unité de surface pouvant être réparti, après déduction de l'efficacité du transport et de la distribution de l'eau dans les infrastructures collectives.

3.2.2. Estimation des besoins en irrigation. Pilotage de l'irrigation.

Le calcul du bilan hydrique d'un sol repose sur l'estimation de la différence entre les entrées d'eau du système (irrigation et pluie) et les sorties d'eau (essentiellement l'évapotranspiration de la culture, ETc), la percolation profonde et le ruissellement superficiel).

L'ETc est déterminée par le produit de l'évapotranspiration de référence (ETo) et d'un coefficient cultural (kc). L'ETo est une grandeur conceptuelle qui intègre les informations climatiques et les caractéristiques d'un gazon bien alimenté en eau de 10 cm de hauteur, ainsi que d'autres

paramètres constants, permettant de déterminer l'eau transpirée par ce gazon et évaporée par le sol. En de nombreux endroits, l'ET_o peut être téléchargée directement depuis des stations météorologiques publiques. Les *k_c* sont des coefficients empiriques propres à chaque culture (*k_c*), largement étudiés, qui convertissent l'ET_o en ET_c de la culture. Diverses publications proposent des tables de *k_c* pour différentes cultures, comme les bulletins FAO-56 et FAO-66.

Ces informations peuvent être précisées selon les caractéristiques de chaque exploitation (station météorologique de référence, données et cycles phénologiques des cultures, type d'irrigation) grâce à un abonnement gratuit, et les recommandations d'irrigation peuvent être reçues chaque semaine sur le moyen de communication choisi, une fois les caractéristiques de la parcelle définies selon le schéma suivant :

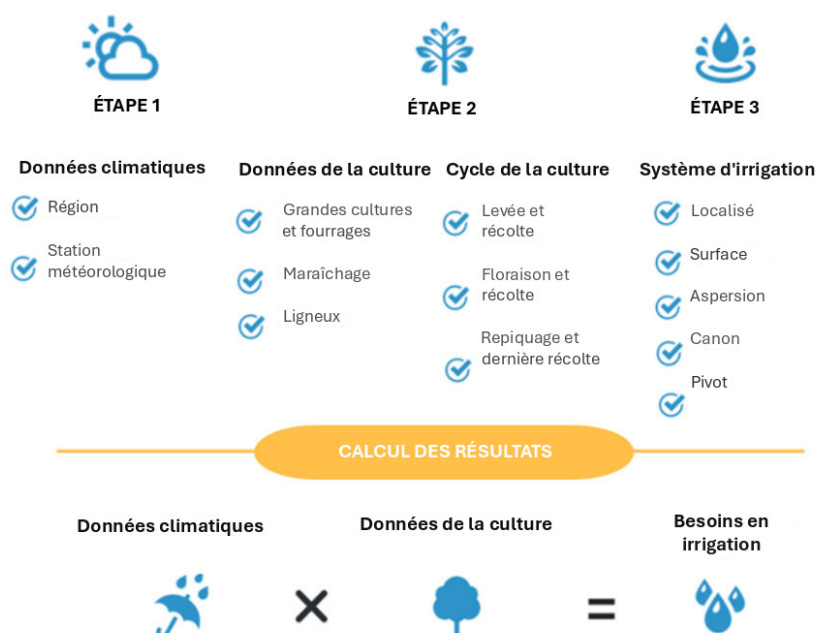


Figure 8 : Schéma conceptuel de l'élaboration des informations de pilotage de l'irrigation

Pour en savoir plus : <https://www.fao.org/4/xo490s/xo490s01.pdf>

3.2.3 Capteurs de mesure de l'eau du sol

Les capteurs d'humidité du sol mesurent l'humidité du sol en temps réel, ce qui permet d'ajuster précisément l'irrigation pour éviter l'excès ou le manque d'eau. À partir des lectures automatisées de ces capteurs et de leur analyse, il est possible de maintenir l'eau du sol disponible pour les racines de la culture entre des limites qui permettent de réduire drastiquement les pertes d'eau (drainage, ruissellement, évaporation, ...) et, par conséquent, d'accroître l'efficacité tout en optimisant la production. Ces limites dépendent principalement du type de culture, du stade de développement et de croissance de la culture, des caractéristiques du sol et de la demande évaporative de l'atmosphère.



L'évolution des lectures des capteurs à différentes profondeurs permet d'analyser le mouvement vertical de l'eau dans le sol en minimisant les pertes d'eau par drainage, tandis qu'une disposition horizontale des capteurs permet d'analyser la variabilité spatiale de l'humidité du sol, ce qui est particulièrement utile en irrigation localisée.

Figure 9 : Mise en place dans le sol de capteurs d'humidité intégrés dans un même instrument, en culture maraîchère.

Une bonne analyse des capteurs d'humidité du sol permet de restituer l'eau transpirée au cours des jours ou des heures précédents dans une plage hydrique de confort, qui se situe généralement entre la capacité au champ et le pourcentage de la fraction d'épuisement admissible de l'eau du sol sans incidence sur la production de la culture.

Il est évident que ces systèmes de pilotage de l'irrigation sont mieux adaptés aux systèmes d'irrigation sous pression (aspersion, goutte-à-goutte, micro-aspersion, ...) qu'à l'irrigation gravitaire, puisqu'ils permettent de restituer l'eau consommée par la culture à haute fréquence et, par conséquent, d'éviter les pertes d'eau habituelles de l'irrigation gravitaire.

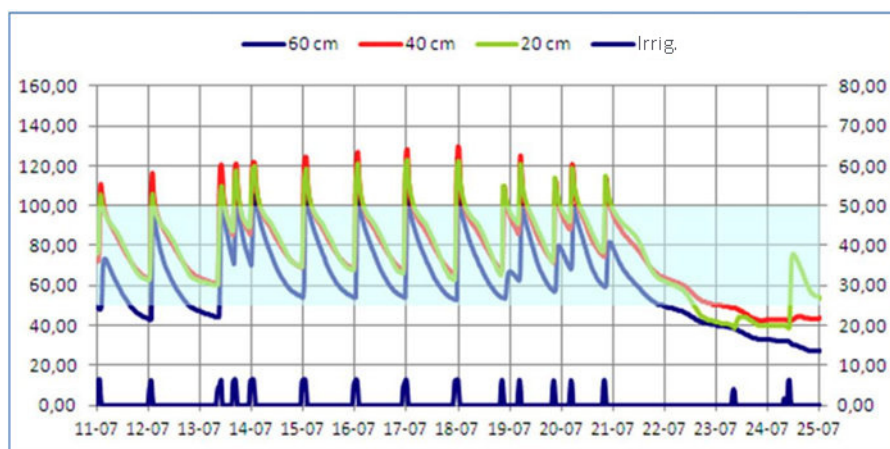


Figure 10 : Évolution de la teneur en eau à trois profondeurs du sol (20, 40 et 60 cm) en pourcentage de la réserve facilement utilisable d'une culture de pommiers et doses d'irrigation localisée appliquées.

Pour en savoir plus : <https://interreg-sudoe.eu/proyecto-interreg/smart-green-water/>.

3.2.4 Télédétection. Modélisation des cultures et jumeaux numériques.

La télédétection est un outil qui permet d'obtenir des informations sur des objets situés à la surface de la Terre sans contact physique direct. Elle repose sur la détection et l'enregistrement de l'énergie réfléchi ou émise par les objets, au moyen de capteurs spécialisés.

La télédétection peut être passive ou active selon que le rayonnement capté est naturel (lumière visible ou bandes de l'infrarouge réfléchi et thermique) ou émis par le capteur puis réfléchi par les objets (radar, laser).

La télédétection va des capteurs installés sur la parcelle, à haute résolution temporelle et grande précision mais couvrant une surface très réduite et à coût élevé, aux caméras spectrales embarquées sur des drones ou des avions légers, à haute résolution et précision et à une échelle de surface optimale au niveau de la parcelle mais à coût élevé, jusqu'à l'utilisation d'images satellitaires de faible résolution spatio-temporelle, mais capables d'analyser de grandes surfaces pour un coût faible, voire nul.

La télédétection est en progrès constant et permet aujourd'hui de déterminer, avec une précision qui dépend de la résolution spatio-temporelle du système utilisé et avec un niveau de maturité technologique élevé, des paramètres tels que la culture implantée sur chaque parcelle, la vigueur ou les paramètres biophysiques des cultures, le fait qu'une parcelle soit irriguée ou non, ou

encore d'estimer l'évapotranspiration de la culture ou de fournir des informations sur l'état hydrique des cultures.

Ces déterminations sont réalisées par l'analyse d'images qui mesurent le rayonnement réfléchi ou absorbé par les cultures dans différentes bandes du spectre, visible aussi bien que proche infrarouge ou thermique. Par exemple, l'évapotranspiration des cultures est estimée à l'aide de la bande de l'infrarouge thermique, qui permet d'estimer le bilan énergétique.

Cette mesure peut servir à restituer par l'irrigation le volume évapotranspiré sur une parcelle. Aujourd'hui, la télédétection permet d'estimer avec une certaine précision l'eau évapotranspirée sur de vastes territoires, comme l'ensemble d'une communauté d'irrigants, et d'assurer un suivi automatisé et périodique des surfaces irriguées, des surfaces cultivées et des consommations totales d'eau, ou des zones présentant une tendance au stress hydrique.

Outre son utilisation directe, la télédétection peut être une source de données robuste et peu coûteuse pour le calage et la validation de la modélisation en continu des paramètres biophysiques et de la demande en eau des cultures, ce qui permet d'ajuster le bilan hydrique aussi bien des parcelles agricoles, pour une recommandation d'irrigation précise, que de grands systèmes, pour ajuster avec une grande exactitude l'eau à lâcher en tête de réseau.

Les jumeaux numériques pour l'irrigation sont une réplique virtuelle exacte d'un système d'irrigation, du sol, du climat et des cultures d'une exploitation agricole. Cette technologie, alimentée en données en temps réel par des dispositifs de l'Internet des objets (IoT), permet aux agriculteurs et aux gestionnaires de simuler, de prévoir et d'optimiser l'usage de l'eau avant de prendre toute décision physique sur le terrain.

Le système se compose de trois couches principales qui fonctionnent en boucle continue :

Acquisition des données au champ : des capteurs répartis sur la parcelle mesurent en continu l'humidité et la salinité du sol à différentes profondeurs, ainsi que le débit et la pression dans les conduites. Ces mesures sont complétées par des stations météorologiques locales et des images satellitaires (comme l'évapotranspiration ou la vigueur de la culture).

Traitement et simulation virtuelle : la réplique numérique reçoit ces données en temps réel. À l'aide d'algorithmes d'intelligence artificielle et de modèles agronomiques, elle prévoit comment la culture et le sol réagiront dans les prochains jours.

Automatisation et commande à distance : le jumeau numérique ne se contente pas d'analyser : il peut renvoyer des ordres au monde physique, en activant ou en fermant des pompes, des secteurs et des électrovannes, automatiquement ou via une application mobile.

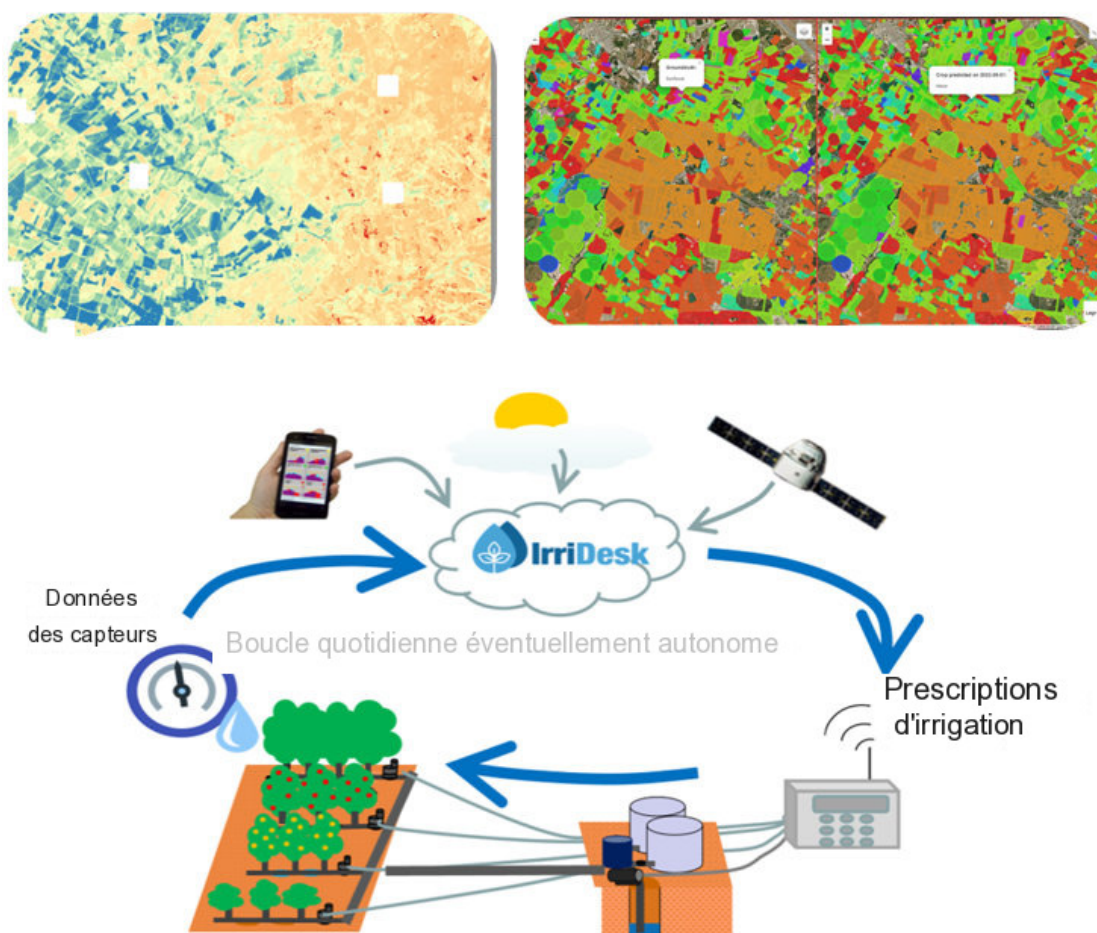


Figure 11 : Schéma du fonctionnement d'un système de recommandations d'irrigation fondé sur l'identification des cultures, les prévisions météorologiques, la modélisation des cultures et les informations de télédétection satellitaire, qui alimente un jumeau numérique donnant des instructions à un programmeur d'irrigation.

Pour en savoir plus :

Télédétection : <https://www.mapa.gob.es/dam/jcr:8aba0f64-7fef-436d-9051-d2aac330d585/riegoyteledeteccionfernandodelacruz.pdf>

Jumeaux numériques : <https://smartgreenwater.com/digital-twins/>

Modélisation des cultures : <https://www.fao.org/aquacrop/en> (modèle AquaCrop de la FAO)

4. Résumé

La stratégie territoriale pour faire face aux épisodes de sécheresse en irrigation doit couvrir aussi bien des aspects de gestion (intégrer les restrictions dans les règlements de la communauté et dans le processus d'attribution de l'eau) que l'équipement en infrastructures et la formation adéquate des irrigants et des techniciens, afin de permettre et de contrôler des répartitions d'eau équitables et transparentes en situation de déficit.

Pour cela, il est souvent nécessaire d'œuvrer pour disposer de périmètres irrigués modernisés, d'eau sous pression pour irriguer par aspersion ou goutte-à-goutte à un coût énergétique minimal, et de se doter collectivement d'outils numériques permettant de déterminer les besoins, de mesurer les consommations et de contrôler l'eau, tant à l'échelle de la communauté qu'à celle de l'exploitation agricole.

Les situations de déficit des dotations d'irrigation engendrent, tout au long de la chaîne de gestion de l'eau d'irrigation (de l'administration de l'eau jusqu'à l'irrigant, en passant par les différents niveaux de la communauté d'irrigants), des situations de stress qui peuvent parfois être très conflictuelles. Pour que ces situations génèrent le moins de tensions sociales possible, il est nécessaire de les anticiper et d'organiser les formations, journées techniques et débats approfondis nécessaires pour préparer les agriculteurs à surmonter ces situations.

La numérisation doit apporter transparence et efficacité dans la prise de décision au bénéfice de l'ensemble des irrigants ; pour cela, il est nécessaire de disposer de technologies numériques qui captent des variables physiques (état de la culture, pression dans les conduites, débits, ...) et les convertissent en informations utiles pour le gestionnaire de la communauté, et d'en avoir l'expérience. Le succès de la bonne rédaction et de la bonne exécution d'un plan de gestion de la sécheresse dans les communautés d'irrigants dépend de la disponibilité de données fiables, robustes et transparentes, afin que les personnes concernées puissent avoir confiance dans le respect des critères du plan.

Aujourd'hui, nous disposons de capteurs de terrain fiables et robustes, qui nous permettent d'obtenir les informations nécessaires pour mettre en œuvre des technologies numériques

efficaces afin de gérer l'irrigation et de faire face aux périodes de pénurie avec beaucoup plus d'efficacité.